

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS CASTELADAS DE AÇO COM ÊNFASE NA FLAMBAGEM DO MONTANTE DE ALMA

NUMERICAL SIMULATION OF STRUCTURAL BEHAVIOR OF CASTELLATED STEEL BEAMS WITH FOCUS ON WEB-POST BUCKLING

Washington Batista Vieira¹, Gustavo de Souza Veríssimo², José Carlos Lopes Ribeiro³, José Luiz Rangel Paes⁴

¹Doutor em Engenharia Civil, Professor Adjunto na Universidade Federal de Itajubá, MG
E-mail: wbatistavieira@yahoo.com.br

²Doutor em Engenharia Civil, Professor Adjunto na Universidade Federal de Viçosa, MG
E-mail: gustavo@ufv.br

³Doutor em Engenharia Civil, Professor Adjunto na Universidade Federal de Viçosa, MG
E-mail: jcarlos.ribeiro@ufv.br

⁴Doutor em Engenharia da Construção, Professor Associado na Universidade Federal de Viçosa, MG
E-mail: jlrange@ufv.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo numérico sobre o comportamento de vigas casteladas fabricadas a partir de perfis laminados, com ênfase na instabilidade do montante de alma. As análises foram realizadas utilizando um modelo de elementos finitos, desenvolvido com o *software* ABAQUS, validado com resultados de quatro programas experimentais. O modelo considera a influência de tensões residuais e imperfeições iniciais e inclui análise de instabilidade e análise não linear material e geométrica, simulando o comportamento da viga durante todo o carregamento, inclusive na fase pós-flambagem. Foram modeladas e analisadas algumas séries de vigas casteladas, formadas a partir de perfis brasileiros, variando-se alguns parâmetros geométricos e de carregamento. Os resultados obtidos demonstram aspectos importantes do comportamento estrutural relacionados a diferentes padrões geométricos de vigas casteladas, considerando a variação da esbelteza da alma do perfil e a presença de chapa expansora.

Palavras-chave: vigas casteladas, simulação numérica, método dos elementos finitos, flambagem do montante de alma.

ABSTRACT

This paper presents a numerical study on the behavior of castellated beams made from hot rolled I-sections, emphasizing the instability of the web-post. The analyses were performed using a finite element model, developed with ABAQUS software, validated with results of four experimental programs. The model considers the influence of residual stresses and initial imperfections and includes instability analysis and nonlinear geometric and material analysis, simulating the behavior of the beam throughout the loading, including post-buckling stage. Some series of castellated beams formed from Brazilian steel sections were modeled and evaluated varying some geometric and loading parameters. The results demonstrate important aspects of structural behavior related to different geometric patterns of castellated beams, considering the variation of the web slenderness and the presence of spacer plate.

Keywords: castellated beams, numerical simulation, finite element method, web-post buckling.

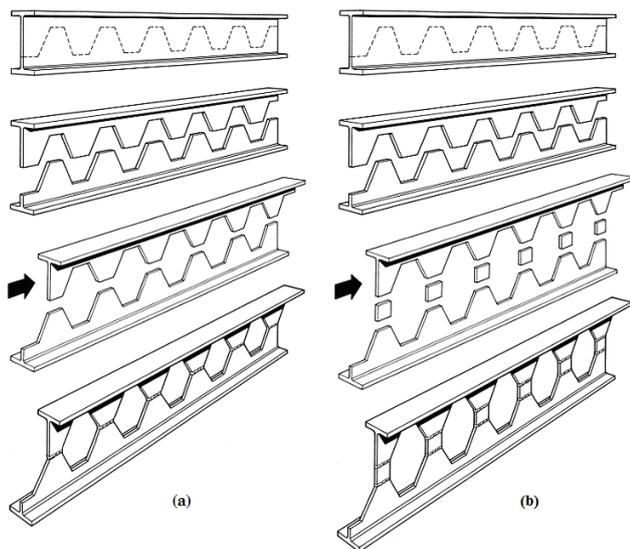
1 – INTRODUÇÃO

A construção com estruturas de aço ganhou um grande impulso na primeira metade do século XX, com a invenção da solda elétrica no final dos anos 1920. A solda possibilitou uma série de novas alternativas para elementos e ligações estruturais de aço. Uma das soluções inovadoras criadas na época foi a viga castelada, obtida a partir do corte longitudinal de um perfil I de aço laminado convencional, segundo um traçado especial, de modo que as duas metades obtidas podem ser deslocadas de um certo comprimento e soldadas, conforme mostrado na Figura 1(a). Como resultado desse processo, obtém-se uma viga de aço com uma sequência de aberturas hexagonais na alma, com altura superior à do perfil original e, portanto, maior rigidez e maior resistência à flexão. As vigas casteladas são

interessantes em estruturas leves, capazes de vencer grandes vãos, e possuem boa rigidez para manter os deslocamentos dentro dos limites de norma.

Em casos especiais, a altura da viga pode ser ampliada inserindo-se chapas intermediárias, como mostrado na Figura 1(b). Neste caso obtém-se uma viga com alvéolos octogonais.

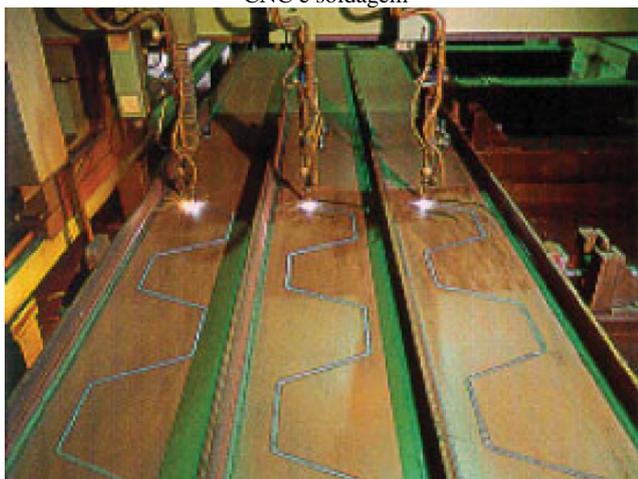
Figura 1 – Esquema do procedimento utilizado na fabricação de vigas casteladas (a) sem chapa intermediária e (b) com chapa intermediária



Fonte: Grünbauer (2011)

As vigas casteladas foram muito utilizadas nos países desenvolvidos até a década de 1960, tendo, posteriormente, caído em desuso devido ao aumento do custo da mão-de-obra envolvida no corte e solda dos perfis. A partir dos anos 1990, avanços na área de automação e controle viabilizaram a fabricação das vigas casteladas a custos competitivos novamente, motivando o ressurgimento do interesse por esses elementos estruturais, tendo em vista as vantagens estruturais e arquitetônicas que elas oferecem. Na Figura 2 é mostrada a execução do corte com máquina de CNC¹.

Figura 2 – Fabricação de viga castelada: corte com máquinas CNC e soldagem



Fonte: Gemperle (2007)

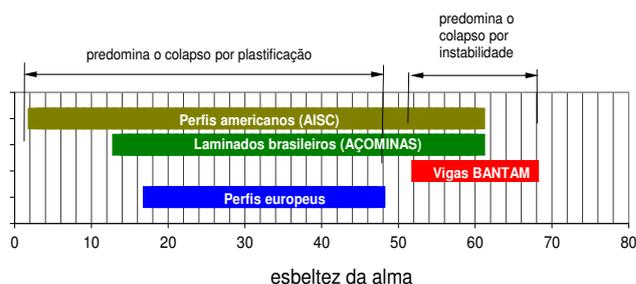
O ressurgimento do interesse pelas vigas casteladas coincidiu com o início da produção de perfis laminados no Brasil, a partir de 2002, quando a siderúrgica Açominas

(atualmente Gerdau) ativou sua linha de laminação. No entanto, embora haja na literatura americana e europeia metodologias de cálculo para vigas casteladas, sua aplicação hoje é questionável por diversos motivos discutidos a seguir. Os modelos de cálculo desenvolvidos até a década de 1960 são baseados em resultados de experimentos com aços e perfis diferentes dos utilizados atualmente. Além disso, invariavelmente admitiam análise elástica e adotavam os critérios do Método das Tensões Admissíveis (em desuso). Nas últimas décadas diversas novas ligas para aço estrutural foram desenvolvidas e o processo de laminação foi aprimorado permitindo a fabricação de seções mais esbeltas que as utilizadas no passado. Esses dois fatos novos afetam o comportamento estrutural das vigas casteladas, notadamente no tocante aos modos de colapso que envolvem fenômenos de instabilidade dos elementos constituintes da seção transversal.

Em estudos experimentais realizados no passado, as vigas foram construídas a partir de perfis laminados com seção compacta, situação em que prevalece o colapso por plastificação da seção (DEMIRDJIAN, 1999). Na década de 1990 pesquisadores canadenses realizaram um programa experimental com vigas casteladas originárias de uma série de perfis laminados esbeltos (vigas Bantam), constatando a predominância do colapso por instabilidade, notadamente por flambagem do montante de alma (ZAAROUR; REDWOOD, 1996).

No gráfico mostrado na Figura 3 são apresentadas as faixas de esbeltez de alma para os perfis europeus, para os perfis Bantam, para os perfis laminados fabricados no Brasil pela Gerdau-Açominas e para os perfis americanos. Pode-se observar que alguns perfis brasileiros e alguns americanos possuem alma esbelta.

Figura 3 – Faixas de variação da esbeltez da alma para perfis europeus, Bantam e laminados brasileiros



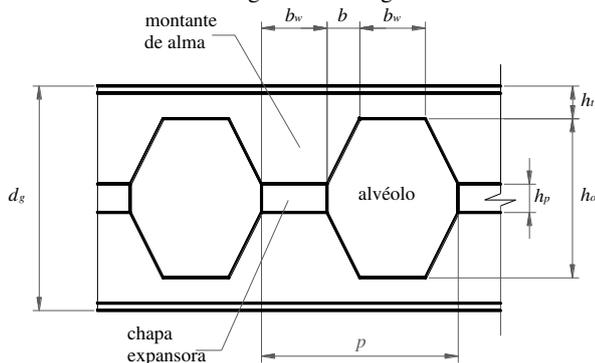
Neste trabalho é apresentado um estudo numérico sobre o comportamento de vigas casteladas fabricadas a partir de perfis brasileiros, com ênfase naqueles cujo colapso se dá por instabilidade do montante de alma. As análises foram realizadas pelo Método dos Elementos Finitos, utilizando-se o *software* ABAQUS (SIMULIA, 2009).

2 – SIMBOLOGIA E DEFINIÇÕES

Na Figura 4 são apresentados os componentes geométricos e a simbologia utilizada neste trabalho para uma viga castelada genérica, com chapa intermediária.

¹ Comando Numérico Computadorizado

Figura 4 – Simbologia adotada para os elementos geométricos de uma viga castelada genérica



Na Figura 5 e na Figura 6 são apresentados, respectivamente, os padrões Peiner (GRÜNBAUER, 2011) e Anglo-Saxão (BS 5950-1:2000), que são dois dos três padrões de corte mais utilizados. O terceiro padrão, chamado Litzka, é muito similar ao Peiner, com a diferença que no primeiro o hexágono é regular.

Figura 5 – Geometria do padrão Peiner

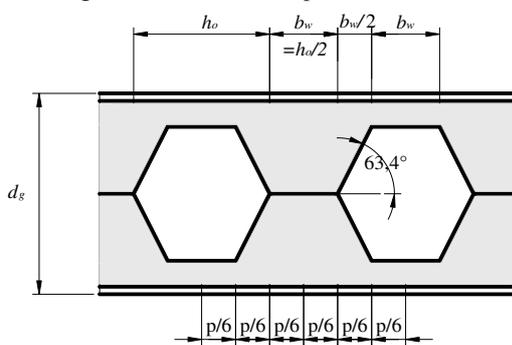
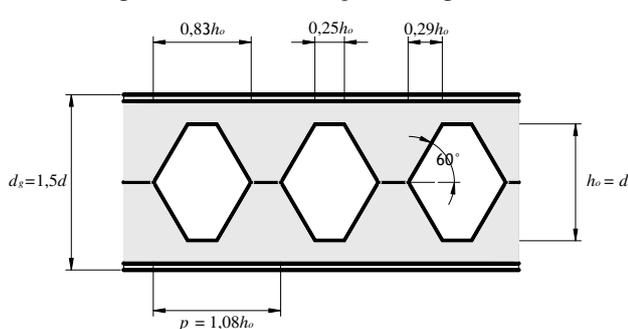


Figura 6 – Geometria do padrão Anglo-Saxão



3 – PRINCIPAIS MODOS DE COLAPSO EM VIGAS CASTELADAS

As vigas casteladas apresentam um comportamento estrutural diferente das vigas de alma cheia. A presença das aberturas na alma impõe uma série de diferenças em relação aos perfis de alma cheia: o caminhamento das tensões muda; tem-se uma viga de inércia variável; surgem pontos de concentração de tensões; as deformações por cisalhamento não são desprezáveis e as condições de contorno das porções de alma na borda dos alvéolos caracterizam um elemento não-apoiado, favorecendo a

instabilidade da seção. Com todas essas diferenças, as vigas casteladas exibem modos de colapso diferentes dos observados nas vigas de alma cheia. Estudos experimentais realizados nas últimas décadas identificaram diversos modos de colapso em vigas alveolares (KERDAL; NETHERCOT, 1984; DEMIRDJIAN, 1999), a saber: formação de mecanismo por flexão; flambagem lateral com torção; formação de mecanismo Vierendeel; ruptura da solda no montante de alma e flambagem do montante de alma.

- Mecanismo por flexão: em vigas casteladas com seções compactas, a carga máxima é atingida pela plastificação dos tês formados acima e abaixo das aberturas na seção de momento máximo, formando uma rótula plástica nessa região;
- Flambagem lateral com torção: vigas com comprimento sem contenção lateral podem sofrer colapso por FLT; alguns estudos do comportamento de vigas casteladas à flambagem lateral com torção tem sido desenvolvidos nos últimos anos (RADIC; MARKULAK, 2007; SHOWKATI, 2008; SONCK; BELIS, 2015);
- Mecanismo Vierendeel: caracterizado pela formação de rótulas plásticas nos cantos das aberturas – o aço atinge a resistência ao escoamento nas extremidades dos tês devido à combinação de tensões normais e de cisalhamento – ocorre com maior frequência em vigas com alvéolos largos (SOLTANI; BOUCHAÏR; MIMOUNE, 2012) e em vigas com vãos curtos em que a influência da força cortante é importante (KERDAL; NETHERCOT, 1984);
- Ruptura do montante de alma por cisalhamento: ocorre quando o material na região da solda atinge o escoamento por cisalhamento;
- Flambagem do montante de alma: apresentado na Seção 3.1.

3-1 – Flambagem do montante de alma

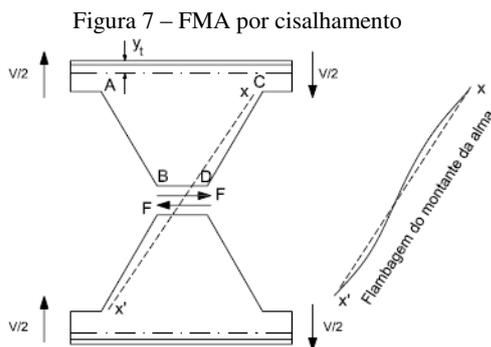
De um modo geral, a flambagem de elementos de aço pode ser inelástica, quando ocorre após o início da plastificação, ou elástica, quando ocorre antes que tenha início a plastificação. Kerdal e Nethercot (1984) relatam diversos casos de colapso de vigas casteladas devido à flambagem do montante de alma (FMA), a maioria em regime inelástico.

Delesques (1968) desenvolveu uma formulação matemática para descrever a FMA em regime elástico, mas fazendo experimentos concluiu que a FMA sempre se dá em regime inelástico, ou seja, sempre ocorre alguma plastificação da seção antes que o montante de alma sofra flambagem. Aglan e Redwood (1974) realizaram análises de vigas casteladas por meio de uma aproximação por diferenças finitas com um material elastoplástico com encruamento e constataram que os montantes de alma estariam num estágio avançado de plastificação antes da ocorrência da FMA.

A instabilidade dos montantes de alma pode ocorrer de duas formas: por cisalhamento ou por compressão dos montantes.

3.1.1 – Flambagem do montante de alma por cisalhamento

Por analogia com uma viga Vierendeel, um montante de alma de uma viga castelada possui forças internas como mostrado na Figura 7. A força cisalhante F ao longo da junta soldada solicita o montante de alma à flexão. A borda AB do montante é solicitada por tensões de tração, enquanto a borda CD está sujeita a tensões de compressão, podendo ocasionar a flambagem do montante. Ocorrendo a flambagem do montante de alma, o deslocamento lateral será acompanhado de torção da linha diagonal xx' (Figura 7). Esse modo de colapso é denominado flambagem do montante de alma por cisalhamento.



Fonte: adaptado de Kerdal e Nethercot (1984)

Na Figura 8 é mostrado um detalhe de uma viga celular ensaiada por Nadjai *et al.* (2008) que sofreu colapso por instabilidade do montante de alma por cisalhamento

A flambagem do montante de alma por cisalhamento é influenciada pelas seguintes relações geométricas: h_o/h_g ; h_o/b_w ; b_w/t_w ; h_p/h_o ; h_p/t_w (ZAAROUR; REDWOOD, 1996; REDWOOD; DEMIRDJIAN, 1998), em que: h_o é a altura dos alvéolos; h_g é a altura da viga castelada; h_p é a altura da chapa expansora; b_w é a largura mínima do montante de alma e t_w é a espessura da alma.

Figura 8 – Flambagem do montante de alma de uma viga mista celular



Fonte: Nadjai *et al.* (2008)

3.1.2 – Flambagem do montante de alma por compressão

A flambagem do montante de alma por compressão acontece normalmente em pontos de carga concentrada sobre o montante ou em apoios, principalmente na ausência de enrijecedores. Esse modo de falha é similar ao

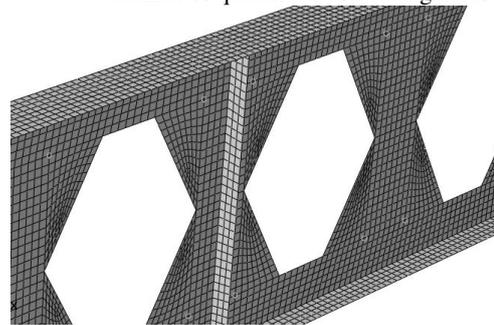
enrugamento da alma que se observa em uma viga de alma cheia submetida a uma carga concentrada. Ao contrário do que ocorre em um montante de alma que flamba por cisalhamento, o deslocamento lateral do montante que flamba por compressão não é acompanhado de torção.

4 – MODELAGEM NUMÉRICA

Para simulação do comportamento estrutural das vigas casteladas desenvolveu-se um modelo numérico com o *software* ABAQUS, utilizando-se o Método dos Elementos Finitos, com as seguintes características (VIEIRA, 2011): (a) Modelo tridimensional do tipo casca fina, representando as superfícies médias das chapas de aço que compõem a viga castelada;

(b) Foram aplicados elementos do tipo S3 (elementos triangulares de casca fina com três nós) nas regiões triangulares formadas nas proximidades das aberturas e elementos do tipo S4R (elementos quadrilaterais de casca fina com quatro nós e integração reduzida) no restante da viga (Figura 9).

Figura 9 – Malha de elementos finitos de um modelo com elementos quadrilaterais e retangulares



A objetividade da malha foi atingida utilizando-se elementos com lados de 10 mm.

Para a representação do comportamento do aço foi adotado um modelo constitutivo elastoplástico perfeito sem encruamento.

Para cada simulação foi realizada uma análise de flambagem elástica para obtenção dos autovalores e autovetores correspondentes, os autovalores representando o fator de carga para o qual ocorre a instabilidade e os autovetores o modo de flambagem.

À análise de instabilidade segue-se a análise não-linear material e geométrica, que simula o comportamento da estrutura durante todo o carregamento, inclusive na fase pós-flambagem. Para a verificação do equilíbrio a cada passo de carga utilizou-se o método de Riks modificado, aplicando-se uma imperfeição inicial ao modelo correspondente ao modo de flambagem selecionado na análise de flambagem elástica. Desta forma foi possível caracterizar a carga máxima que a estrutura era capaz de suportar.

No processo de calibração do modelo, utilizou-se uma distribuição simplificada de tensões residuais, considerando tensão uniforme de tração nas mesas e tensão uniforme de compressão na alma, calculadas a partir da distribuição parabólica de Young (1972), *apud* Szalai e Papp (2005), de

modo que a força resultante na alma e nas mesas do modelo simplificado fosse igual à do modelo parabólico. Os valores de tensão residual utilizados para a alma e para as mesas podem ser calculados pelas Equações (1) e (2), respectivamente (em MPa):

$$f_{r,alma} = \frac{100 t_w (h - t_f)}{9 t_f \cdot b_f} + \frac{230}{3} \quad (\text{compressão}) \quad (1)$$

$$f_{r,mesa} = \frac{225 t_w (h - t_f)}{4 t_f \cdot b_f} - \frac{25}{3} \quad (\text{tração}) \quad (2)$$

O modelo numérico foi validado por meio da análise de 14 vigas casteladas provenientes de quatro programas experimentais distintos. Na Tabela 1 é apresentada uma síntese dessa validação, com os resultados experimentais de Redwood; Demirdjian (1998), Zaarour; Redwood (1996), Toprac; Cooke (1959) e Bazile; Texier (1968), *apud* Zaarour (1995), cujos ensaios são identificados, neste trabalho, pelas iniciais RD, ZR, TC e BT, respectivamente.

A melhor concordância com os resultados experimentais ocorreu quando se utilizou uma imperfeição inicial da ordem de 1/2000 da altura total da viga castelada.

Tabela 1 – Validação do modelo numérico

Viga	Carga máxima experimental P_{exp} (kN)	Carga máxima numérica P_{num} (kN)	P_{exp}/P_{num}	Modo de colapso (exp. e num.)
RD 10-5a	96,8	100,3	0,97	FMA
RD 10-5b				
RD 10-6	94,8	89,7	1,06	FMA
RD 10-7	84,4	85,3	0,99	FMA
ZR 10-2	58,7	66,1	0,89	FMA
ZR 12-2	98,3	105,0	0,94	FMA
TC G	90,6 (4 x 22,65)	85,9	1,05	Vierendeel
TC H	98,1 (4 x 24,53)	96,8	1,01	FLM
TC I	84,7 (4 x 21,18)	90,4	0,94	Vierendeel
BT A	805 (8 x 100,6)	904,0	0,89	FMA
BT B	685 (8 x 85,6)	689,6	0,99	FMA
BT C	600 (8 x 75,0)	620,8	0,97	FMA
BT D	620 (8 x 77,5)	601,9	1,03	FMA
BT E	280,0 (8 x 35)	287,2	0,97	FMA
Média			0,98	

5 – ANÁLISE NUMÉRICA

Nesta Seção são apresentados as características e os resultados das análises numéricas realizadas.

5.1 – Parâmetros dos modelos e condições de contorno

Depois da validação do modelo numérico foram modeladas e analisadas algumas séries de vigas casteladas formadas a partir de perfis brasileiros, variando-se alguns parâmetros geométricos e de carregamento. Para efeito de comparação entre os diversos elementos modelados, os seguintes parâmetros foram fixados:

- A razão de expansão de todas as vigas foi de 1,5;
- As vigas foram admitidas simplesmente apoiadas;
- O deslocamento longitudinal foi restringido em um dos apoios;

- Adotou-se um travamento lateral contínuo ao longo dos eixos das mesas, com a finalidade de impedir a ocorrência da flambagem lateral com torção;
- Admitiu-se um aço com $f_y = 345$ MPa;
- A distribuição das aberturas ao longo da viga foi realizada de modo que a largura dos montantes de extremidade fosse no mínimo igual à largura dos demais montantes;
- Foram colocados enrijecedores em todos os pontos de aplicação de carga concentrada e nos apoios.

As vigas utilizadas nas modelagens foram definidas a partir de perfis selecionados de três séries do catálogo da Açominas: W310, W360 e W410. Para cada uma dessas séries foram tomados três perfis: o de maior esbeltez de alma, o de menor esbeltez de alma e o de esbeltez de alma intermediária. Na Tabela 2 são mostradas as propriedades geométricas dos perfis utilizados, em que d é a altura do perfil, b_f é a largura das mesas e t_f e t_w são as espessuras da mesa e da alma, respectivamente.

Na Tabela 3 e na Tabela 4 são apresentadas as características das vigas casteladas analisadas neste trabalho. O grupo A é formado por vigas com relação $L/d_g \approx 3,2$ – a mesma utilizada em um experimento realizado por Redwood e Demirdjian (1998) – e variando-se a esbeltez da alma (h_g/t_w). Nos grupos B, C e D foram analisadas vigas com a alma esbelta, reproduzidas nos padrões Anglo-Saxão e Peiner, com e sem adição de chapa expansora. As vigas dos grupos B e D foram modeladas com vão de 3.000 mm e as do grupo C com vão de 6.000 mm. Nos grupos A, B e C aplicou-se uma carga concentrada no centro do vão e no grupo D foi aplicado carregamento uniformemente distribuído ao longo do vão.

Tabela 2 – Propriedades geométricas dos perfis originais das vigas modeladas

Designação	d (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)
W310x21,0	303	101	5,7	5,1
W310x28,3	309	102	8,9	6,0
W310x52,0	317	167	13,2	7,6
W360x32,9	349	127	8,5	5,8
W360x51,0	355	171	11,6	7,2
W360x79,0	354	205	16,8	9,4
W410x38,8	399	140	8,8	6,4
W410x60,0	407	178	12,8	7,7
W410x85,0	417	181	18,2	10,9

Tabela 3 – Características geométricas das vigas analisadas

ID.	Perfil Original	d_g mm	h_g/t_w	L mm	Padrão
A1	W310x21,0	454,5	86,9	1.454	AS
A2	W310x28,3	463,5	74,3	1.483	AS
A3	W310x52,0	475,5	59,1	1.522	AS
A4	W360x32,9	523,5	87,3	1.675	AS
A5	W360x51,0	532,5	70,7	1.704	AS
A6	W360x79,0	531,0	52,9	1.699	AS
A7	W410x38,8	598,5	90,8	1.915	AS
A8	W410x60,0	610,5	76,0	1.954	AS
A9	W410x85,0	625,5	54,0	2.002	AS
B1	W310x21,0	454,5	86,9	3.000	AS
B2	W310x21,0	554,5	106,5	3.000	AS
B3	W310x21,0	454,5	86,9	3.000	PN
B4	W310x21,0	554,5	106,5	3.000	PN
B5	W360x32,9	523,5	87,3	3.000	AS
B6	W360x32,9	623,5	104,6	3.000	AS
B7	W360x32,9	523,5	87,3	3.000	PN
B8	W360x32,9	623,5	104,6	3.000	PN
B9	W410x38,8	598,5	90,8	3.000	AS
B10	W410x38,8	698,5	106,4	3.000	AS
B11	W410x38,8	598,5	90,8	3.000	PN
B12	W410x38,8	698,5	106,4	3.000	PN
C1	W360x32,9	523,5	87,3	6.000	AS
C2	W360x32,9	623,5	104,6	6.000	AS
C3	W360x32,9	523,5	87,3	6.000	PN
C4	W360x32,9	623,5	104,6	6.000	PN
D1	W360x32,9	523,5	87,3	3.000	AS
D2	W360x32,9	623,5	104,6	3.000	AS
D3	W360x32,9	523,5	87,3	3.000	PN
D4	W360x32,9	623,5	104,6	3.000	PN

L – vão livre da viga

$$h_g = d_g - 2 \cdot t_f$$

Grupos A, B e C – Carga concentrada no centro do vão

Grupo D – Carga distribuída

Tabela 4 – Características geométricas dos alvéolos das vigas analisadas

ID.	h_o mm	h_p mm	b_w mm	p mm	N
A1	303	-	75,8	327,2	4
A2	309	-	77,3	333,7	4
A3	317	-	79,3	342,4	4
A4	349	-	87,3	376,9	4
A5	355	-	88,8	383,4	4
A6	354	-	88,5	382,3	4
A7	399	-	99,8	430,9	4
A8	407	-	101,8	439,6	4
A9	417	-	104,3	450,4	4
B1	303	-	75,8	327,2	8
B2	403	100	75,8	327,2	8
B3	303	-	75,8	327,2	6
B4	403	100	75,8	327,2	6
B5	349	-	87,3	376,9	7
B6	449	100	87,3	376,9	7
B7	349	-	87,3	376,9	5
B8	449	100	87,3	376,9	5
B9	399	-	99,8	430,9	6
B10	499	100	99,8	430,9	6
B11	399	-	99,8	430,9	4
B12	499	100	99,8	430,9	4
C1	349	-	87,3	376,9	15
C2	449	100	87,3	376,9	15
C3	349	-	174,5	523,5	11
C4	449	100	174,5	523,5	11
D1	349	-	87,3	376,9	7
D2	449	100	87,3	376,9	7
D3	349	-	174,5	523,5	5
D4	449	100	174,5	523,5	5

N – número de aberturas da viga

Grupos A, B e C – Carga concentrada no centro do vão

Grupo D – Carga distribuída

5.2 – Resultados

Na Tabela 5 são apresentados os resultados das análises das vigas modeladas, obtidos pela simulação numérica, em termos de carga de flambagem, carga última e modo de colapso observado. Na segunda coluna da Tabela 5 são apresentados os valores da carga de flambagem elástica do montante de alma. Nos casos em que o valor da carga crítica de flambagem elástica é coincidente com o valor da carga última, pode-se concluir que a flambagem ocorre em regime elástico. Quando se observa o modo de colapso por flambagem, mas a carga última é menor que a carga de flambagem elástica, indica a ocorrência da flambagem em regime inelástico (Figura 10). Na quarta coluna da Tabela 5 são indicadas as relações entre a carga última obtida pela análise não-linear e a carga de flambagem elástica. Valores de P_{max}/P_{cr} menores que a unidade indica que a flambagem ocorreu em regime inelástico ou que o colapso não se deu por flambagem. Por outro lado, razões P_{max}/P_{cr} maiores ou iguais à unidade podem ocorrer em duas situações distintas:

- Quando a flambagem acontece em regime elástico, ou seja a carga última é igual à carga crítica de flambagem elástica;
- Quando a flambagem ocorre em regime inelástico, mas com redistribuição de esforços na viga, conferindo uma capacidade de carga de pós-flambagem à viga.

Tabela 5 – Resultados numéricos: capacidade resistente e modo de colapso das vigas analisadas.

ID.	Carga de flambagem elástica (P_{cr}) kN	Carga máxima (P_{max}) kN	$\frac{P_{max}}{P_{cr}}$	Modo de Colapso
A1	227,9	214,5	0,94	FMA
A2	397,0	305,2	0,77	FMA
A3	864,9	462,4	0,53	Flexão; FMA
A4	322,1	289,6	0,90	FMA
A5	641,4	455,0	0,71	FMA
A6	1481,2	670,0	0,45	Flexão; RMC
A7	369,4	353,4	0,96	FMA
A8	682,8	529,0	0,77	FMA
A9	1868,7	886,0	0,47	Flexão; RMC
B1	206,0	168,6	0,82	Flexão
B2	138,3	125,3	0,91	FMA
B3	192,5	154,4	0,80	Vierendeel
B4	140,0	146,6	1,05	FMA
B5	296,5	266,7	0,90	FMA
B6	206,3	182,2	0,88	FMA
B7	294,2	269,1	0,91	FMA
B8	216,1	222,0	1,03	FMA
B9	344,9	320,6	0,93	FMA
B10	254,2	235,8	0,93	FMA
B11	334,4	325,7	0,97	FMA
B12	257,3	236,3	0,92	FMA
C1	271,0	175,0	0,65	Flexão
C2	184,0	166,3	0,90	FMA
C3	268,9	168,7	0,63	Flexão
C4	194,6	193,8	1,00	FMA
D1	114,7	107,8	0,94	FMAC
D2	75,0	70,7	0,94	FMAC
D3	123,5	118,6	0,96	FMAC
D4	87,4	84,3	0,96	FMAC

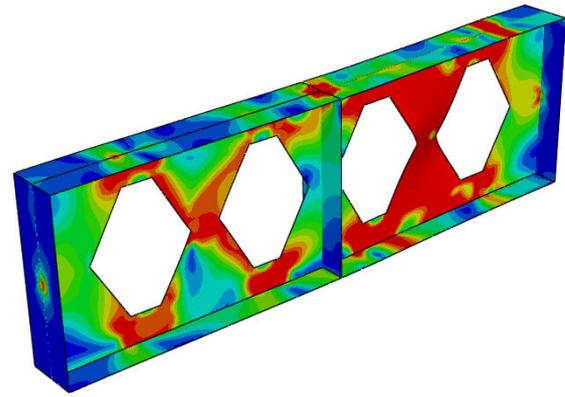
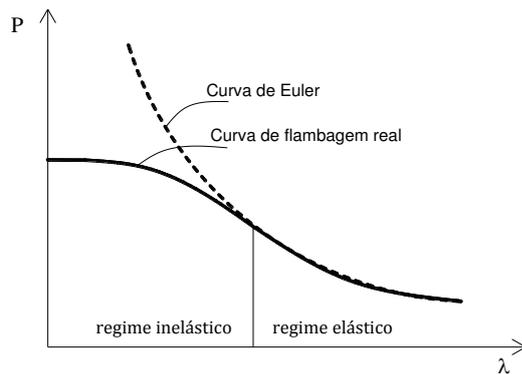
Notas:

FMA – Flambagem do montante de alma por cisalhamento

FMAC – Flambagem do montante de alma por compressão

RMC – Ruptura do montante por cisalhamento

Figura 10 – Curva de flambagem real e curva de flambagem elástica



(b)

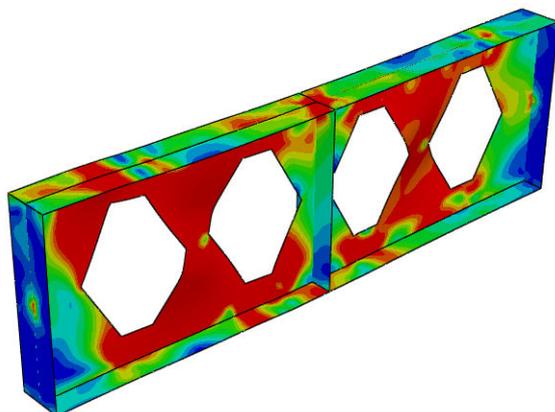
5.3 – Discussão

No grupo A, foram modeladas nove vigas com uma relação $L/d_g \approx 3,2$. Embora essa relação não seja usual em construções convencionais, Redwood; Demirdjian (1998) ensaiaram vigas casteladas com essa relação vão-altura, no Canadá, com perfis de alma esbelta, que colapsaram por flambagem do montante de alma (FMA). Para efeito de comparação quanto ao modo de colapso, essas vigas foram analisadas variando-se a esbelteza da alma.

Notou-se que, nas vigas com esbelteza da alma (h_g/t_w) superior a 60 ocorreu o colapso por FMA, enquanto nas vigas mais compactas ($h_g/t_w < 60$), observaram-se outros modos de colapso: formação de mecanismo plástico devido ao momento fletor e ruptura na região de emenda dos montantes de alma por cisalhamento.

Pôde-se notar, também, que em todos os casos, mesmo para vigas com alma esbelta a flambagem ocorre em regime inelástico ($P_{\max}/P_{cr} < 1,0$), havendo alto grau de plastificação das seções transversais quando ocorre a FMA, como pode ser visto na Figura 11. As zonas mais escuras na Figura 11, na região dos montantes, atingiram a tensão de escoamento do material.

Figura 11 – Distribuição de tensões nos modelos (a) A4 e (b) A8



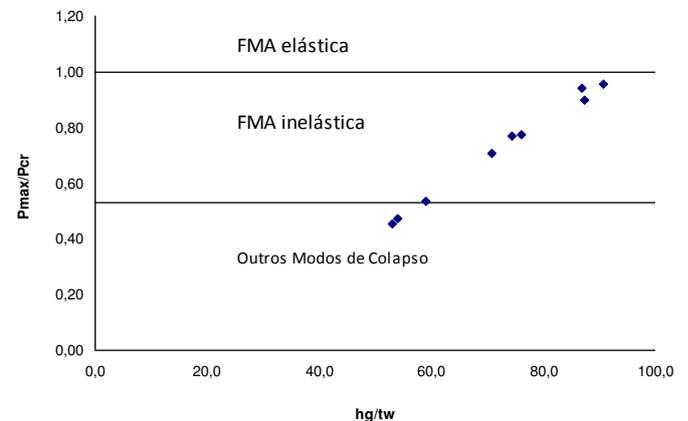
(a)

Na Figura 12 é apresentada a relação entre a esbelteza da alma castelada (h_g/t_w) e a razão P_{\max}/P_{cr} para as vigas do grupo A, indicando-se três regiões: FMA elástica (que não ocorre em nenhum caso), FMA inelástica e outros modos de colapso. Pode-se observar que existe uma forte relação entre a razão P_{\max}/P_{cr} e a esbelteza da alma das vigas.

Nos grupos B, C e D foram modeladas vigas casteladas formadas a partir de perfis com alma esbelta, a fim de se estudar a ocorrência da flambagem do montante de alma nessas vigas. Observando-se os resultados da Tabela 5, nota-se que, nessas vigas, a adição da chapa expansora reduz a capacidade última, pois implica em acréscimo na esbelteza da alma e, conseqüentemente, da carga crítica de flambagem.

Observa-se, também, que nos grupos de vigas cujo colapso se dá pela flambagem do montante de alma, a carga de colapso da viga padrão Peiner é maior que a da viga correspondente padrão Anglo-Saxão. Isto é explicado pelo fato de o montante da viga padrão Anglo-Saxão ser mais estreito e, assim, mais susceptível ao colapso pela flambagem do montante de alma (ZAAROUR; REDWOOD, 1996).

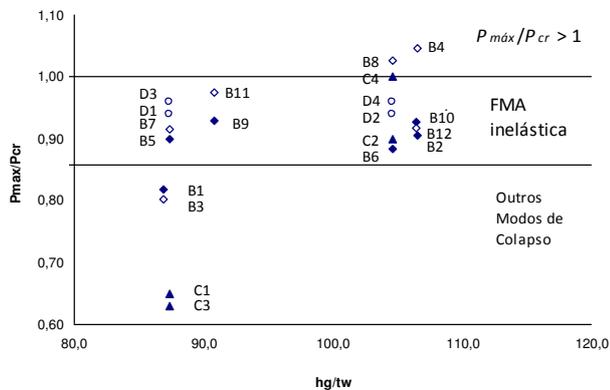
Figura 12 – Esbelteza da alma (h_g/t_w) \times relação P_{\max}/P_{cr} e modos de colapso das vigas do grupo A



Na Figura 13 são apresentados os valores da razão P_{\max}/P_{cr} relacionados com a esbelteza da alma das vigas casteladas (h_g/t_w) e os modos de colapso para as vigas dos grupos B, C e D. Apesar de todas as vigas serem formadas a partir de perfis com alma esbelta, ainda se observam

alguns casos onde o colapso não foi determinado pela instabilidade do montante de alma.

Figura 13 – Esbeltez da alma (h_g/t_w) \times relação P_{max}/P_{cr} e modos de colapso das vigas dos grupos B, C e D

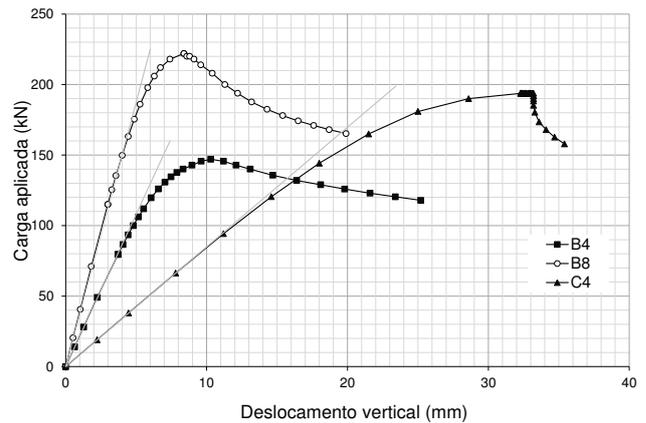


A carga correspondente ao estado limite de formação de mecanismo plástico devido ao momento fletor (FMP) de uma viga é função do vão livre da viga. Aumentando-se o vão, a carga de colapso por flexão será menor. Por outro lado, a carga correspondente ao estado limite de instabilidade do montante de alma independe do vão da viga. Deste modo, vigas com geometrias similares que sofrem colapso por FMA em vãos curtos terão sua capacidade determinada por outros estados limites, quando se aumenta o vão, nomeadamente, pelo estado limite último de FMP ou pelo estado limite de serviço de deformação excessiva.

Observa-se, dos resultados apresentados, que os modelos B5 e B7, com vão de 3.000 mm ($L/d_g \approx 5,7$) apresentaram colapso por FMA, enquanto os modelos similares, C1 e C3, respectivamente, com vão de 6.000 mm ($L/d_g \approx 11,5$) colapsaram por flexão.

São observados, na Figura 13, três casos nos quais a relação P_{max}/P_{cr} foi maior que 1,0. A princípio supôs-se que se tratava da ocorrência de FMA em regime elástico, já que em todos os casos, a viga castelada era originada de perfis com alma esbelta, além de terem a adição de chapa expansora, que aumenta ainda mais a esbeltez da alma da viga. Para se verificar o comportamento dessas vigas quanto à FMA foram obtidas as curvas carga-deslocamento, apresentadas na Figura 14.

Figura 14 – Curva carga-deslocamento das vigas com relação $P_{max}/P_{cr} > 1,0$



A trajetória das curvas carga-deslocamento das vigas, apresentada na Figura 14, mostra que as vigas entram em regime inelástico antes da carga última. Deste modo, tudo indica que a relação P_{max}/P_{cr} maior que a unidade se deva a uma carga pós-flambagem, associada a uma redistribuição de esforços na viga.

CONCLUSÕES

Com o início da produção de perfis I de aço laminados no Brasil, a partir de 2002, tem havido um interesse crescente da indústria brasileira pelas vigas casteladas, no segmento das estruturas de aço. As vigas casteladas são fabricadas expandindo-se a alma de perfis de aço I ou H laminados, de modo que a viga tenha maior rigidez na direção da maior inércia mantendo a mesma massa do perfil original. Neste trabalho, apresenta-se um estudo do comportamento de vigas casteladas de aço, com ênfase na instabilidade do montante de alma, realizado por meio de modelos numéricos utilizando o Método dos Elementos Finitos. Para a análise numérica, as vigas foram analisadas por meio do *software* ABAQUS, considerando-se o comportamento elastoplástico do material e a não-linearidade geométrica da estrutura. Os resultados numéricos obtidos apresentam excelente concordância com resultados experimentais disponíveis na literatura. Utilizando-se os modelos numéricos desenvolvidos, foi realizado um estudo paramétrico que permitiu avaliar a influência de diversas variáveis sobre a instabilidade do montante de alma em vigas casteladas. Foram modeladas, principalmente, vigas com alma esbelta e pôde-se constatar que, para vãos longos – o que é usual em vigas metálicas – existe pouca possibilidade de ocorrência de flambagem dos montantes de alma e, quando ocorre, na maior parte dos casos esta se dá em regime inelástico.

REFERÊNCIAS

- AGLAN, A. A.; REDWOOD, R. G. Web buckling in castellated beams. **Procedure Institution of Civil Engineers**, London, UK, Part 2, v. 57, p. 307-320, 1974. <http://dx.doi.org/10.1680/iicep.1974.4059>.
 BS 5950-1:2000 Structural use of steelwork in building – Part 1: Code of practice for design – Rolled and welded

- sections. **British Standards Institution**, 2000.
- DELESQUES, R. Stabilité des montants de poutres ajourées. **Construction Métallique**, v. 3, p. 26-33, 1968.
- DEMIRDJIAN, S. **Stability of castellated beam webs**. Montreal, Master Thesis. Canada: McGill University, 1999.
- GEMPERLE, C. Vereinfachte Vordimensionierung von Wabenträgern. **Stahlbau**, v. 76, p. 530-536, 2007. <http://dx.doi.org/10.1002/stab.200710055>.
- GRÜNBAUER BV. **What makes castellated beams so desirable as a constructional element?** Disponível em: <<http://www.grunbauer.nl/eng/waarom.htm>>. Acesso em: 26 jan. 2011.
- KERDAL, D.; NETHERCOT, D. A. Failure modes for castellated beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 4, n. 4, p. 295-315, 1984.
- NADJAI, A.; GOODFELLOW, N.; VASSART, O.; ALI, F.; CHOI, S. Simple calculation method of composite cellular beams at elevated temperatures. **Fifth International Conference on Structures in Fire**, p. 551-559, 2008.
- RADIC, I; MARKULAK, D. Lateral buckling of castellated beams. **Tehnički Vjesnik**, v. 14, p. 25-35, 2007.
- REDWOOD, R. G.; DEMIRDJIAN, S. Castellated beam web buckling in shear. **Journal of Structural Engineering**, v. 124, n. 10, p. 1202-1207, 1998. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1998\)124:10\(1202\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:10(1202)).
- SHOWKATI, H. Lateral-torsional buckling of castellated beams. **Iranian Journal of Science & Technology**, v. 32, p. 153-156, 2008.
- SIMULIA, **Dassault Systèmes Corp.**, Abaqus Documentation, v. 6.9, RI, USA, 2009.
- SOLTANI, M. R.; BOUCHAÏR, A.; MIMOUNE, M. Nonlinear FE analysis of the ultimate behavior of steel castellated beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 70, p. 101-114, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.10.016>.
- SONCK, D., BELIS, J. Lateral-torsional buckling resistance of cellular beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 105, p. 119-128, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.11.003>.
- SZALAI, J.; PAPP, F. A new residual stress distribution for hot-hollowed I-shaped sections. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 61, n. 6, p. 845-861; 2005.
- TOPRAC, A. A.; COOKE, B. R. **An experimental investigation of open-web beams**, p. 1-16, 1959.
- VIEIRA, W. B. **Simulação numérica do comportamento de vigas casteladas de aço com ênfase na flambagem do montante de alma**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, MG, Brasil, 2011.
- ZAAAROUR, W. J. **Web buckling in thin webbed castellated beams**. Master Thesis, McGill University, Canada, 1995.
- ZAAAROUR, W. J.; REDWOOD, R. G. Web buckling in thin webbed castellated beams. **Journal of Structural Engineering**, v. 122, n.8, p. 860-866, 1996. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:8\(860\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:8(860)).