

DETERMINAÇÃO DO MOMENTO FLETOR RESISTENTE À FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO DE VIGAS DE AÇO CELULARES

Laura M. P. de Abreu ^{a,b}, Ricardo H. Fakury ^a e Ana Lydia R. de Castro e Silva ^a

^a*Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627 - Bloco 1 - 4o andar, sala 4215, Pampulha, Belo Horizonte – MG, analydiarcs@gmail.com, fakury@dees.ufmg.br, www.pos.dees.ufmg.br*

^b*Usiminas Mecânica S/A, Superintendência de Pontes e Estruturas, Av. Professor José Vieira de Mendonça, 3011, 3º andar, Eng. Nogueira, Belo Horizonte – MG, laurapaes@gmail.com, www.usiminasmecanica.com.br*

Palavras Chave: Flambagem Lateral com Torção, Vigas Celulares, Estruturas de Aço.

Resumo: Neste trabalho é proposto um procedimento para determinação do momento fletor resistente nominal de vigas de aço celulares, para o estado-limite último de flambagem lateral com torção, para os casos em que as vigas possuem vínculo de garfo (empenamento livre e torção impedida) nas extremidades do comprimento destravado e estejam submetidas aos casos de momento uniforme e carga uniformemente distribuída. É projetada e aferida uma modelagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos, para análise não-linear, prevendo comportamentos elástico e inelástico e a influência das tensões residuais, usando o Programa ABAQUS. O procedimento, de fácil utilização prática, adota formulação similar à da norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 para vigas de alma sólida, utilizando as propriedades da seção transversal no centro das aberturas, com ajustes nos valores do comprimento destravado correspondente ao início do escoamento e do momento máximo alcançado. Os resultados obtidos são consistentes e apresentam boa concordância com os valores da análise numérica.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Embora praticamente sem uso no Brasil, as vigas com aberturas sequenciais na alma são bastante empregadas em outros países, especialmente naqueles do chamado primeiro mundo. Quando as aberturas têm a forma circular, essas vigas são denominadas vigas celulares (outras formas de abertura são usadas, como a hexagonal, formando as chamadas vigas casteladas).

A fabricação das vigas celulares é feita a partir de um perfil I laminado, no qual são efetuados dois cortes longitudinais, sendo cada corte constituído por módulos contínuos formados por uma semicircunferência seguida de um pequeno segmento reto (Figura 1-a). Posteriormente, as duas metades são defasadas e soldadas entre si (Figura 1-b) pelos segmentos retos. O resultado é uma viga que, com praticamente a mesma quantidade de aço do perfil laminado original, possui capacidade resistente à flexão muito superior à deste último, em decorrência da maior altura da seção transversal (esse aumento de altura pode superar 50%).

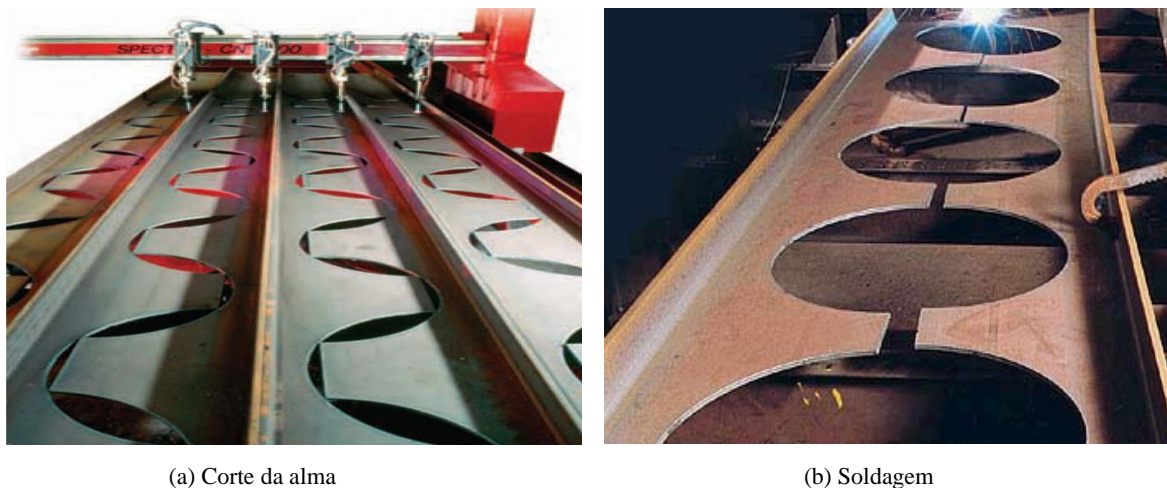


Figura 1 – Fabricação de vigas celular (fonte: www.asdwestok.co.uk – acessado em 14/09/2010)

Outra importante vantagem das vigas celulares é a possibilidade da passagem de dutos de utilidades dentro das aberturas (Figura 2), evitando corte na alma ou aumento da altura da construção, que ocorre necessariamente quando os dutos passam sob as vigas.



Figura 2 – Passagem de dutos através das aberturas (fonte: www.asdwestok.co.uk – acessado em 14/09/2010)

Segundo Ward (1994), as vigas celulares são utilizadas para vencer grandes vãos, principalmente quando atua um carregamento uniformemente distribuído, pois possuem capacidade resistente ao cisalhamento bastante reduzida sob cargas concentradas.

1.2 Características Geométricas

As vigas celulares podem ser produzidas com inúmeras combinações entre altura da seção transversal, diâmetro da abertura e distância entre centros de aberturas. Apesar disso, uma combinação consagrada e utilizada na maioria das vezes, pois oferece resultados compensadores, é mostrada na Figura 3 (Harper, 1994).

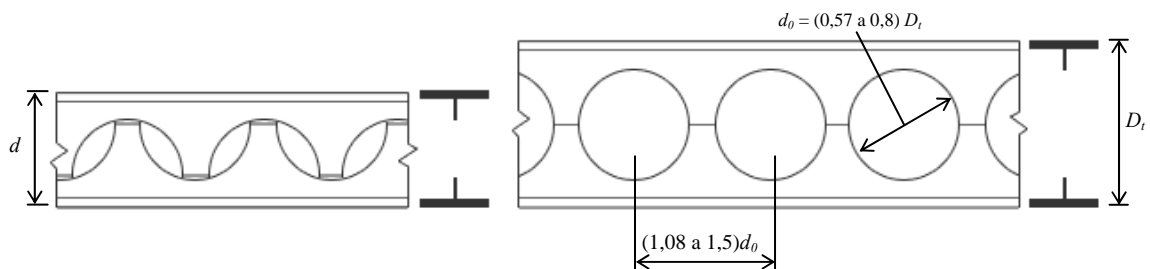


Figura 3 – Geometria para fabricação das vigas celulares

1.3 Considerações sobre a Flambagem Lateral com Torção

Um dos modos de falha das vigas celulares é a flambagem lateral com torção. Como é bem conhecido, trata-se de um estado-limite último aplicável às vigas com perfil I, causado pelo momento fletor atuante em relação ao eixo de maior momento de inércia da seção transversal (eixo x, perpendicular à alma), e caracterizado por movimentos de translação lateral $\mu(z)$ e torção $\varphi(z)$, conforme ilustra a Figura 4. Esses dois movimentos, que ocorrem simultaneamente, podem ser explicados pelo fato de a parte comprimida da seção transversal ser ligada continuamente por meio da alma à parte tracionada (a parte comprimida tende a se deslocar lateralmente, mas é parcialmente contida pela parte tracionada).

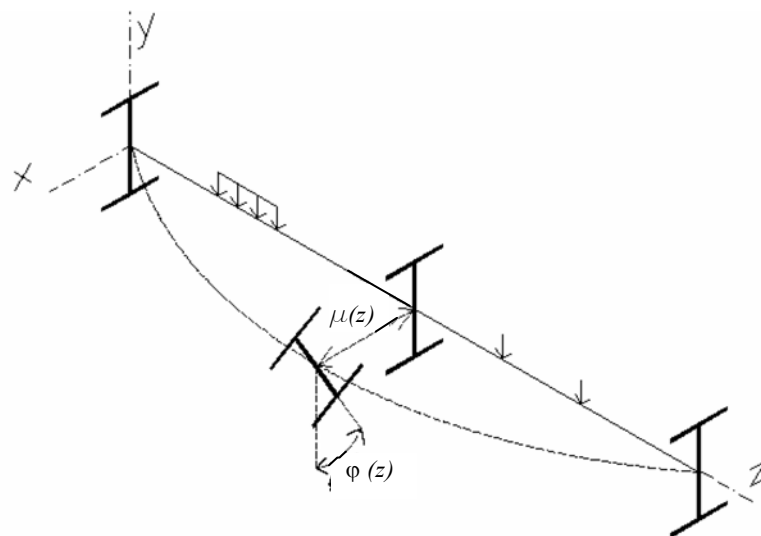


Figura 4 - Flambagem lateral com torção

De acordo com Reis (1996), a resistência das vigas à flambagem lateral com torção depende de diversos fatores, entre os quais o comprimento do trecho sem contenção à flambagem lateral com torção (comprimento destravado), as condições de contorno nas extremidades do comprimento destravado (especialmente se a torção e o empenamento são ou não impedidos – quando a torção é impedida e o empenamento é liberado, tem-se o chamado vínculo de garfo e, se ambos os deslocamentos são impedidos, vínculo rígido), o diagrama de momento fletor, o nível de aplicação das cargas em relação ao centro de torção e a distribuição e a intensidade das tensões residuais.

Segundo Galambos (1998), no estudo da flambagem lateral há três intervalos observados de comportamento:

- (a) flambagem elástica, comum em vigas com grandes comprimentos destravados;
- (b) flambagem inelástica, quando a instabilidade ocorre depois que alguma parte da seção transversal tenha se plastificado, situação que se manifesta para comprimentos destravados intermediários;
- (c) comportamento plástico, quando o comprimento destravado é suficientemente pequeno para que a plastificação total da seção transversal ocorra antes de qualquer tipo de instabilidade.

A respeito do dimensionamento à flambagem lateral com torção, a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 não trata das vigas celulares, limitando seu escopo às vigas de alma sólida. Já a norma britânica BS 5950-1 (2000) apresenta uma regra para verificação de vigas alveolares a esse tipo de fenômeno, que consiste no emprego das mesmas expressões das vigas de alma sólida, porém utilizando as propriedades geométricas da seção transversal líquida no centro das aberturas. Ward (1994) recomenda que, na ausência de resultados experimentais, as vigas celulares sejam verificadas por essa regra.

1.4 Objetivo deste Trabalho

Este trabalho é composto de uma análise numérica não-linear, utilizando o programa comercial ABAQUS (Hibbit *et al.*, 1998) para obtenção do momento fletor resistente nominal de vigas de aço celulares para o estado-limite último de flambagem lateral com torção. Os resultados são comparados com os valores do momento resistente de vigas similares de aço em perfil I de alma sólida e com as vigas originais (vigas formadas pelos perfis que deram origem às vigas celulares). Os resultados são comparados também com o procedimento da norma britânica BS 5950-1:2000 que, conforme explicitado em 1.3, consiste na aplicação da expressão do momento resistente de vigas de alma sólida, mas tomando as propriedades geométricas da seção líquida no centro da abertura da viga (nesse caso, é usada a expressão de momento resistente de vigas de alma sólida da ABNT NBR 8800:2008). Ao final, tendo como elementos balizadores as comparações citadas, é proposto um procedimento para determinação do momento fletor resistente nominal das vigas celulares para o estado-limite em estudo.

2 ANÁLISE NUMÉRICA

2.1 Generalidades

Utilizando o programa ABAQUS (Hibbit *et al.*, 1998), são obtidos valores do momento fletor resistente nominal para o estado-limite último de flambagem lateral com torção de vigas celulares.

Inicialmente é feita uma análise linearizada de estabilidade para se chegar à deformada correspondente à flambagem lateral com torção, utilizando a opção *Buckle*. Em seguida essa

deformada é transformada em um modelo com curvatura inicial de $L/10000$, onde L é o vão, com o ângulo de giro das seções transversais proporcionais a essa curvatura. Finalmente é efetuada uma análise não-linear levando em consideração as tensões residuais e o comportamento inelástico do material empregando a opção *Static Riks*.

As tensões residuais são consideradas nas mesas com a distribuição simplificada mostrada na Figura 5 (σ_{rc} indica tensão residual de compressão e σ_{rt} de tração). As tensões residuais na alma foram supostas nulas, pois sua influência é desprezável na determinação do momento resistente à flambagem lateral com torção (as mesas são os elementos mais importantes no fenômeno) e, além disso, não há resultados conhecidos dos valores dessas tensões nas peças celulares. Foi assumido um valor máximo da tensão residual, correspondente a 30% da resistência ao escoamento (f_y), tendo por base ser esse o valor prescrito pela ABNT NBR 8800:2008 para a tensão de compressão nos perfis I.

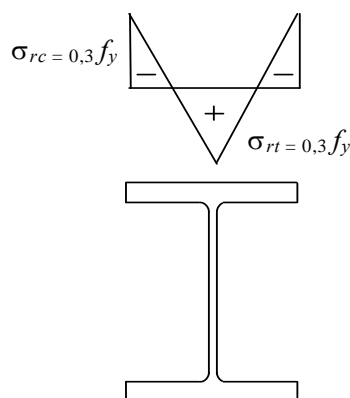


Figura 5 – Distribuição das tensões residuais nas mesas para perfil laminado

Neste trabalho será adotado o diagrama de tensão-deformação do aço mostrado na Figura 6, formado por uma zona elástica, que perdura até que a resistência ao escoamento f_y seja alcançada, e por uma zona inelástica, constituída por três retas que, levando em conta a fase de encruamento, prossegue até a resistência à ruptura f_u , conforme proposto por Earls (1999) e usado por diversos pesquisadores, como Castro e Silva (2006).

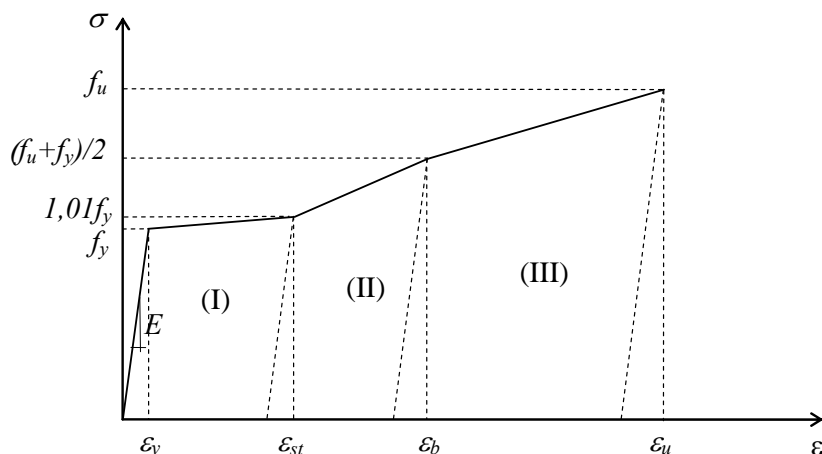


Figura 6 - Diagrama tensão- deformação do aço (adaptado de Earls, 1999)

Para elaboração dos modelos numéricos, foram utilizados elementos de casca de quatro nós, S4R, que possui comportamento elástico e capacidade para análises não-lineares com grandes deslocamentos, com seis graus de liberdade por nó, referentes a três translações e três rotações, segundo um sistema de coordenadas de três eixos.

As vigas foram sempre consideradas biapoizadas, de comprimento destravado igual ao vão com as duas extremidades com empenamento livre e torção impedida, simulando vínculo de garfo, e submetidas a dois tipos de carregamento: momento constante e carga uniformemente distribuída ao longo do vão, aplicada no nível do centro de torção. A rigor, para facilitar a modelagem numérica, a carga distribuída somente foi aplicada nos montantes de alma (segmento reto onde se dá a soldagem entre as duas partes da viga celular).

2.2 Aferição da Modelagem Numérica

Para aferição da modelagem numérica foram feitas análises não-lineares em uma viga de alma sólida de seção I duplamente simétrica, com altura total de 400 mm, largura das mesas de 200 mm e espessuras das mesas e da alma com valores respectivamente iguais a 16 mm e 6,3 mm, submetida a momento fletor constante. Nessa análise, variou-se o parâmetro de esbeltez λ da viga, definido como a relação entre o vão e o raio de giração em relação ao eixo y (eixo central de menor momento de inércia, ou seja, eixo que passa pelo plano médio da alma), de valores elevados, próximos de 400, a valores próximos de zero. O comprimento destravado foi tomado igual ao vão, projetado com vínculo de garfo nas duas extremidades. O elemento S4R foi construído com tamanho médio de 25 mm.

Os valores encontrados para o momento fletor resistente nominal, M_{Rk} , foram comparados, como se vê na Figura 7, com os fornecidos pelo programa FLT, desenvolvido por Souza (1999), que usa um elemento simples de barra, mas fornece resultados confiáveis. Observou-se diferença desprezável para os maiores valores do parâmetro de esbeltez, quando a instabilidade ocorre em regime elástico, e diferença máxima de 10% para parâmetros de esbeltez reduzidos, quando a instabilidade se dá em regime inelástico, o que permitiu considerar validada a modelagem numérica desenvolvida.

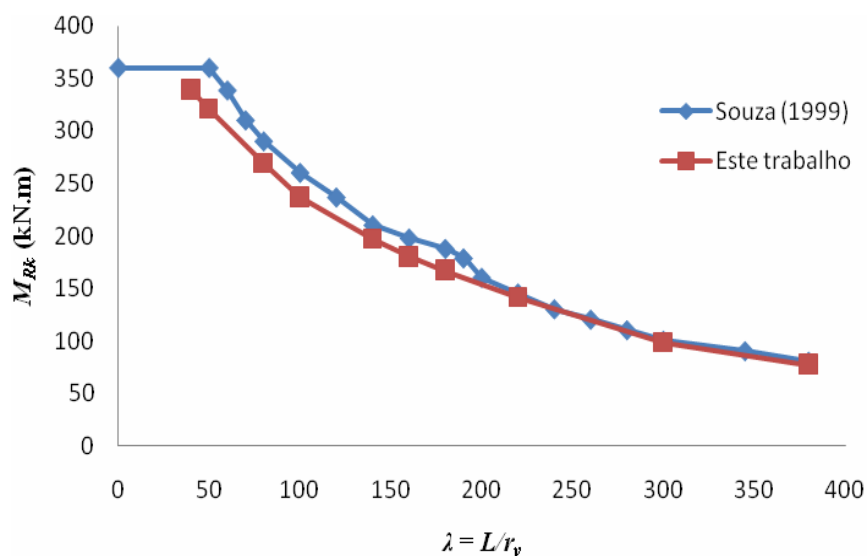


Figura 7 – Comparação entre os resultados de Souza (1999) e da modelagem deste trabalho

Salienta-se que a comparação foi feita com vigas de alma sólida pelo fato de não ter sido encontrada na literatura científica resultados numéricos ou experimentais envolvendo o fenômeno da flambagem lateral com torção em vigas celulares.

3 RESULTADOS

3.1 Considerações Gerais e Modelos Estudados

Neste trabalho, os modelos de vigas celulares foram gerados adotando-se como originais os perfis laminados W200x22,5, W310x32,7 e W530x85, fabricados no Brasil pela GERDAU AÇOMINAS. Foram consideradas as premissas de geometria da Subseção 1.2, ou seja, a altura total das vigas celulares foi tomada igual a aproximadamente 1,5 vezes a altura do perfil original, o espaçamento entre centros de aberturas igual a 1,5 vezes o diâmetro destas e o diâmetro das aberturas igual a 0,7 vezes a altura total das vigas celulares correspondentes, conforme mostrado na Figura 8.

Com os valores obtidos na análise numérica das vigas celulares por meio do programa ABAQUS (Hibbit *et al.*, 1998), foram traçadas curvas do momento fletor resistente nominal para o estado-limite de flambagem lateral com torção, M_{Rk} , em função do comprimento destravado L_b (ver Subseção 3.2). Essas curvas foram comparadas com aquelas obtidas usando as prescrições da ABNT NBR 8800:2008, para as:

- vigas constituídas pelos perfis que deram origem às vigas celulares;
- vigas sem abertura na alma, com a mesma altura de seção transversal das vigas celulares;
- vigas celulares, utilizando as propriedades geométricas da seção transversal líquida no centro das aberturas conforme recomenda Ward (1994).

Não existe consenso entre os pesquisadores quanto ao cálculo da constante de empenamento C_w no centro das aberturas. Bradley (2003), por exemplo, indica que o valor dessa propriedade deve ser determinado considerando a seção transversal formada apenas por dois “Tês” isolados, conforme a seguinte equação:

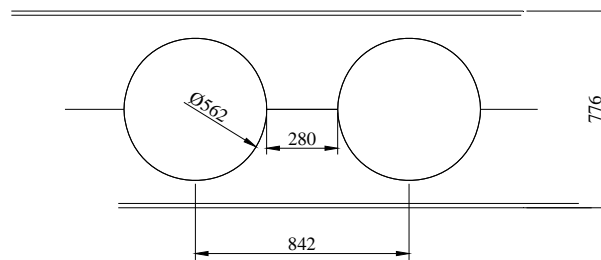
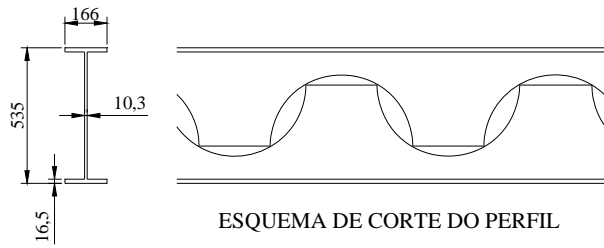
$$C_w = \frac{1}{18} \left[\frac{b_f^3 t_f^3}{4} + \left(\frac{h - d_0}{2} \right)^3 t_w^3 \right] \quad (1)$$

onde b_f e t_f são a largura e a espessura das mesas, respectivamente, h é a altura da alma, d_0 é diâmetro da abertura circular e t_w é a espessura da alma.

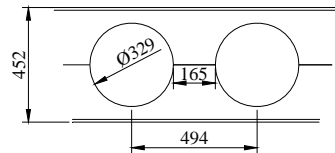
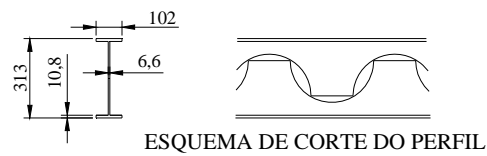
Kohnepooshi e Showkati (2009), por sua vez, utilizam no cálculo de C_w a mesma expressão dos perfis de alma sólida:

$$C_w = \frac{I_y h^2}{4} \quad (2)$$

Neste trabalho será adotado o valor de C_w fornecido na Eq. (2), com base em um amplo estudo feito por Bezerra *et al.* (2010). Nesse estudo se demonstrou, por meio de análises numéricas, que nas vigas casteladas (que têm comportamento similar ao das celulares), a expressão de Kohnepooshi e Showkati (2009) fornece resultados mais consistentes que a de Bradley (2003), que é bastante conservadora.

W530x85

DIMENSÕES FINAIS DA VIGA CELULAR VC776x166x16,5x10,3

W310x32,7

DIMENSÕES FINAIS DA VIGA CELULAR VC452x102x10,8x6,6

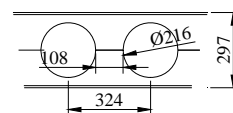
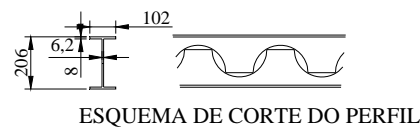
W200x22,5DIMENSÕES FINAIS DA
VIGA CELULAR VC297x102x8x6,2

Figura 8 – Geometria das vigas celulares

3.2 Curvas Comparativas Momento Resistente versus Parâmetro de Esbeltez

As Figuras 9 e 10, conforme já mencionado na Subseção 3.1, apresentam as curvas, citadas anteriormente, relacionando o momento fletor resistente nominal M_{Rk} e o comprimento destravado L_b para a viga com perfil laminado original W530x85, respectivamente para momento uniforme e carregamento distribuído. As Figuras 11 e 12 fornecem os mesmos resultados para a viga com perfil original W310x32,7 e as Figuras 13 e 14 para a viga com perfil original W200x22,5. Em todas essas figuras, as curvas estão assim legendadas (X representa um algarismo numérico):

- viga original conforme prescrições da ABNT NBR 8800:2008 (W XXX x XX);
- viga de alma sólida com altura da viga celular conforme prescrições da ABNT NBR 8800:2008 (VS XXX SEM ABERTURA NBR 8800);
- viga celular conforme prescrições da ABNT NBR 8800:2008 (VC XXX COM ABERTURA NBR 8800);
- viga celular conforme análise numérica feita com o programa ABAQUS (Hibbit *et al.*, 1998) (VC XXX – Abaqus).

Adicionalmente, as figuras supracitadas apresentam ainda a curva obtidas segundo a formulação proposta neste trabalho, conforme detalhamento no item seguinte (Formulação Proposta P/VC XXX).

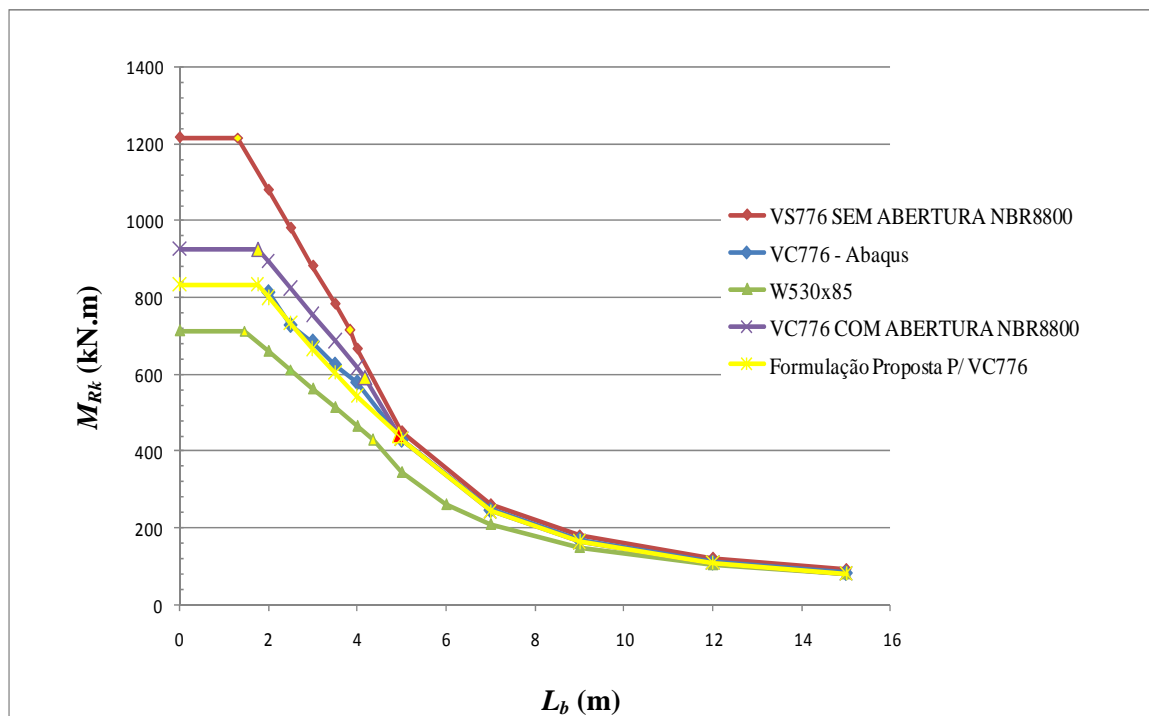


Figura 9 – Curvas M_{Rk} versus L_b para momento constante e perfil original W530x85

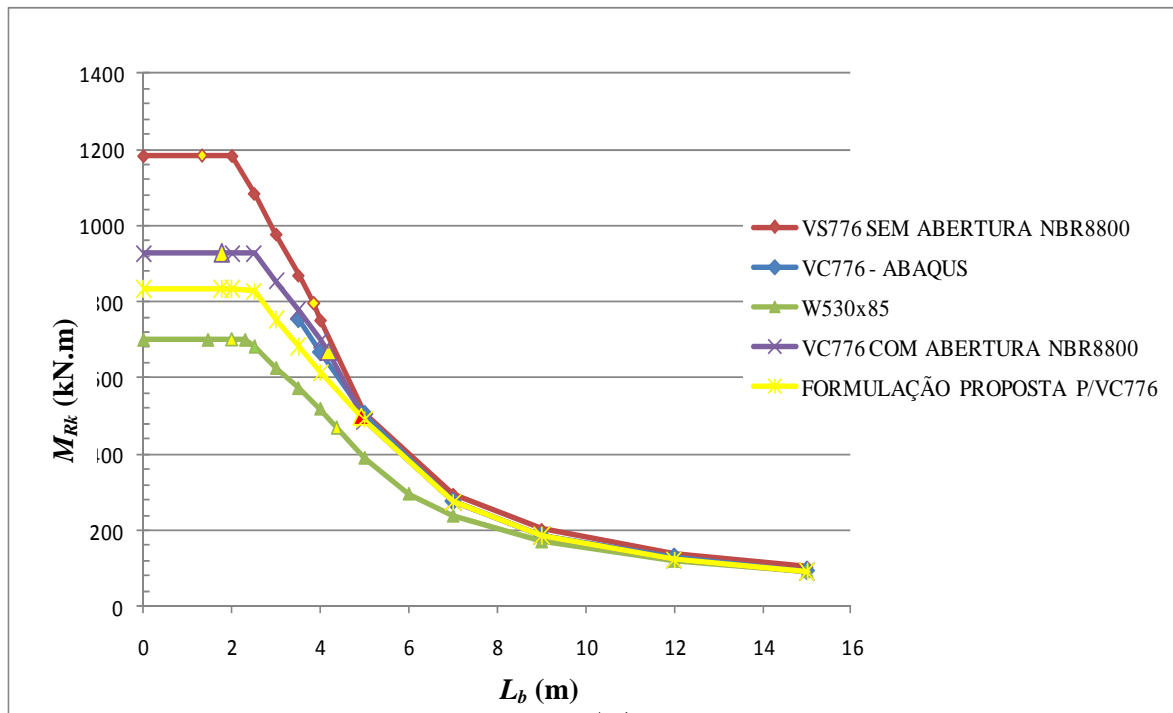


Figura 10 - Curvas M_{Rk} versus L_b para carregamento distribuído e perfil original W530x85

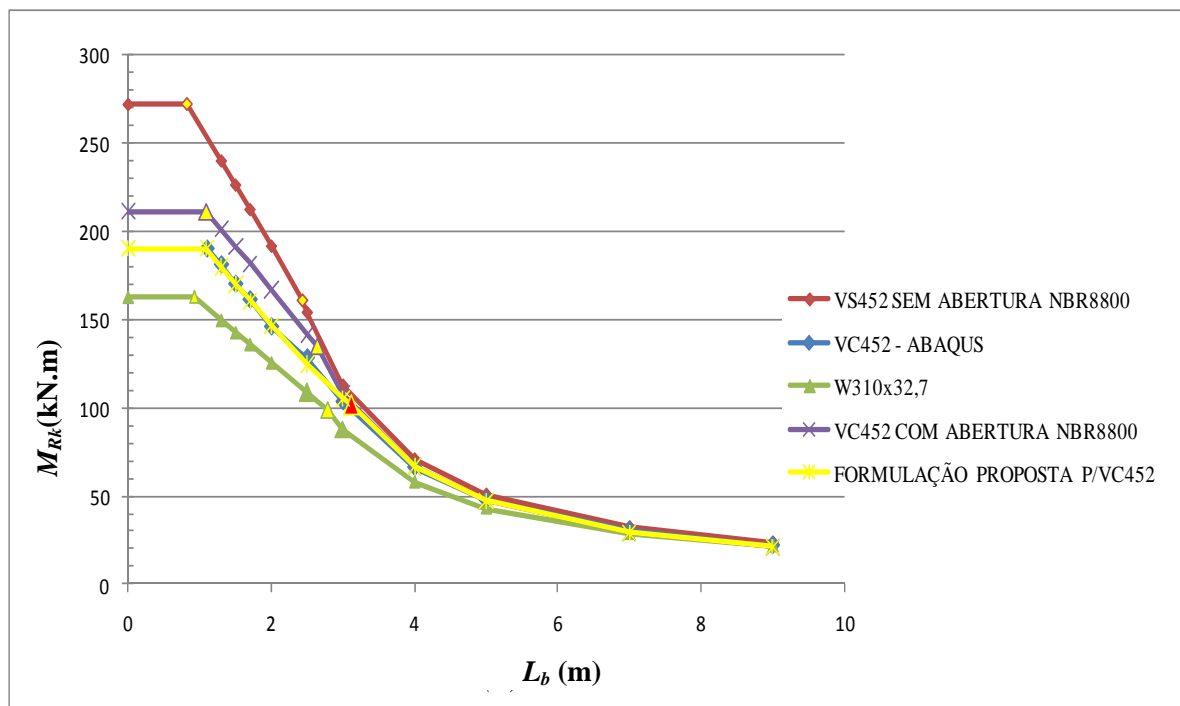


Figura 11 - Curvas M_{Rk} versus L_b para momento constante e perfil original W310x32,7

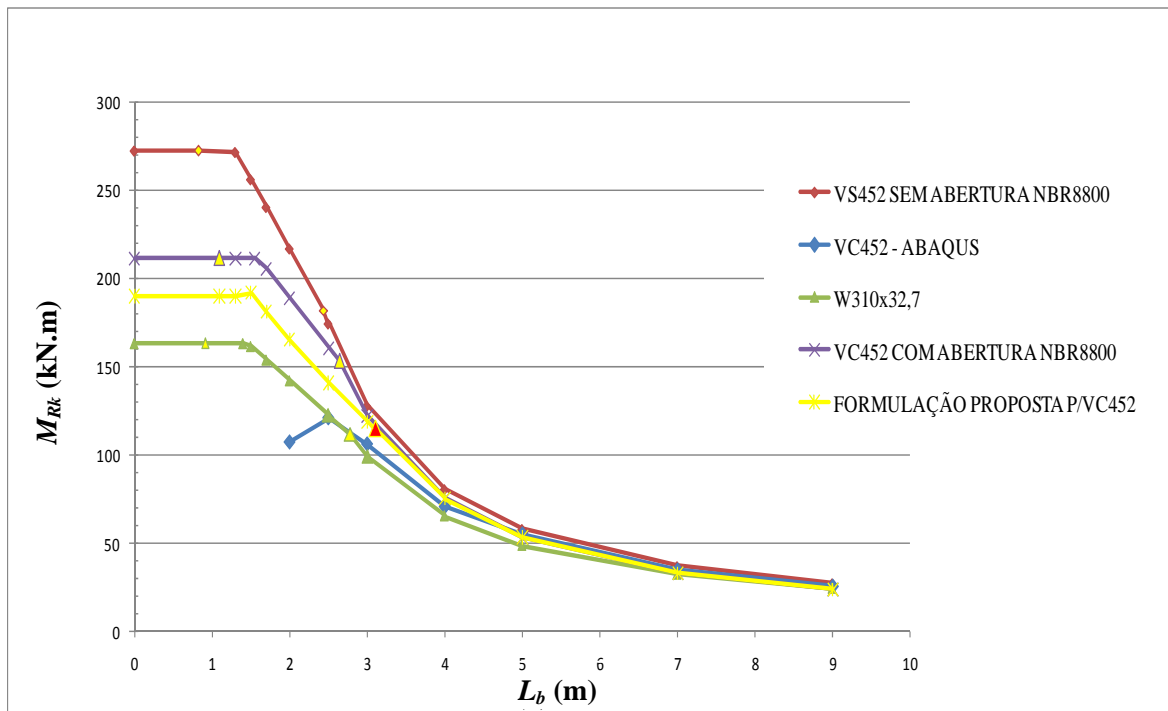


Figura 12 - Curvas M_{Rk} versus L_b para carregamento distribuído e perfil original W310x32,7

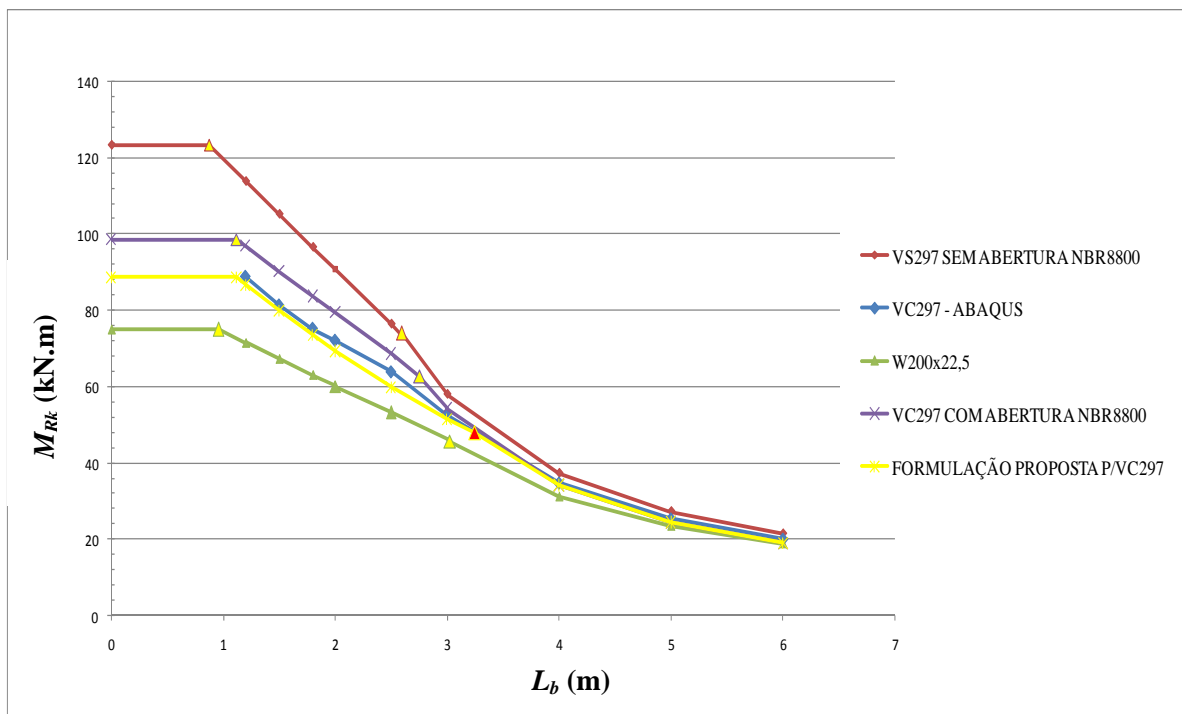


Figura 13 - Curvas M_{Rk} versus L_b para momento constante e perfil original W200x22,5

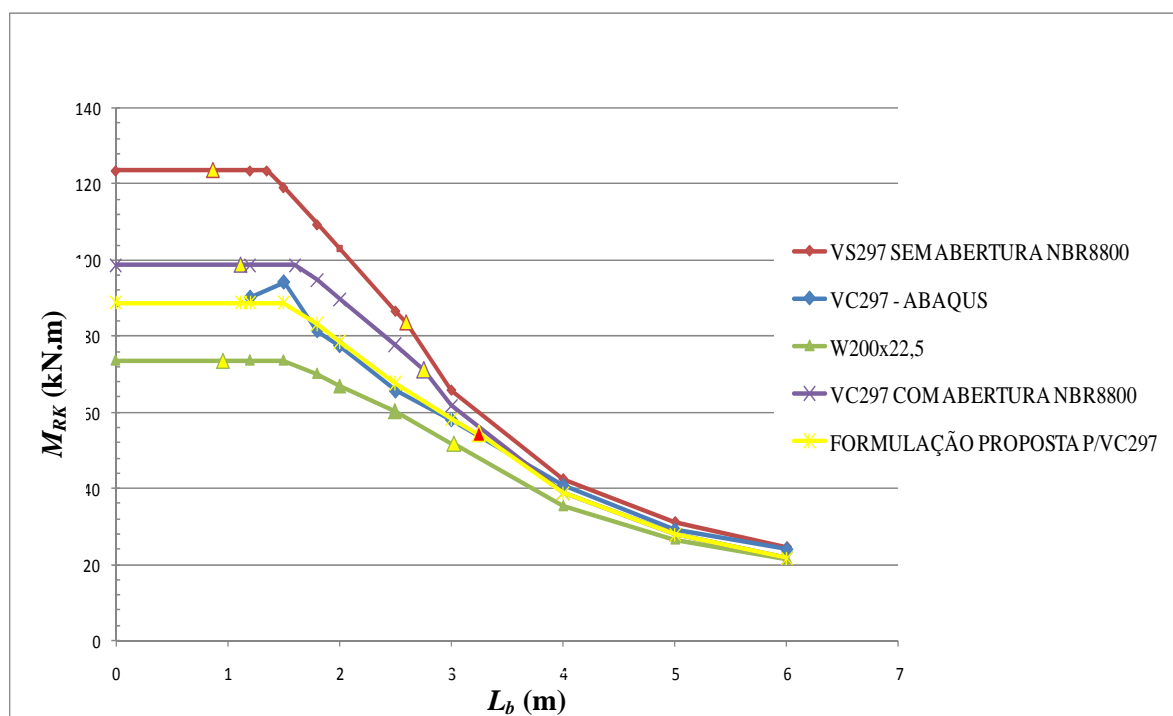


Figura 14 - Curvas M_{Rk} versus L_b para carregamento distribuído e perfil original W200x22,5

3.3 Avaliação das Curvas

Como era esperado, a viga celular apresenta maior momento fletor resistente em relação ao perfil laminado original, pois tem maior altura de seção transversal (no caso deste trabalho, o aumento de altura é da ordem de 50%). Essa superioridade não é tão significativa quando a flambagem se dá em regime elástico, mas aumenta na medida em que o vão diminui, ou seja, quando a flambagem ocorre em regime inelástico. Por outro lado, possuem momento resistente inferior em até 27% em regime inelástico aos das vigas de alma sólida de mesma altura. Isso era também esperado, uma vez que a alma dessas últimas, por não ter aberturas, sofre menor distorção, o que proporciona à viga maior estabilidade lateral.

Utilizando as expressões de cálculo para o momento fletor resistente da ABNT NBR 8800:2008 com as propriedades geométricas calculadas no centro da abertura, e com a constante de empenamento segundo Kohnehpooshi e Showkati (2009), obtêm-se valores mais próximos daqueles encontrados na análise numérica, com diferença em torno de $\pm 10\%$ em regime elástico e alcançando 16% em regime inelástico.

Observa-se ainda que, na análise numérica para vigas muito curtas, não se consegue atingir o momento de plastificação total da seção (chega-se a valores situados entre 90% e 95% desse momento), pois outros estados-limites últimos ocorrem antes, ligados principalmente à formação de rótulas plásticas, caracterizando o mecanismo Vierendel, e à falha dos montantes da alma, conforme ilustrado nas Figuras 15 e 16, respectivamente.

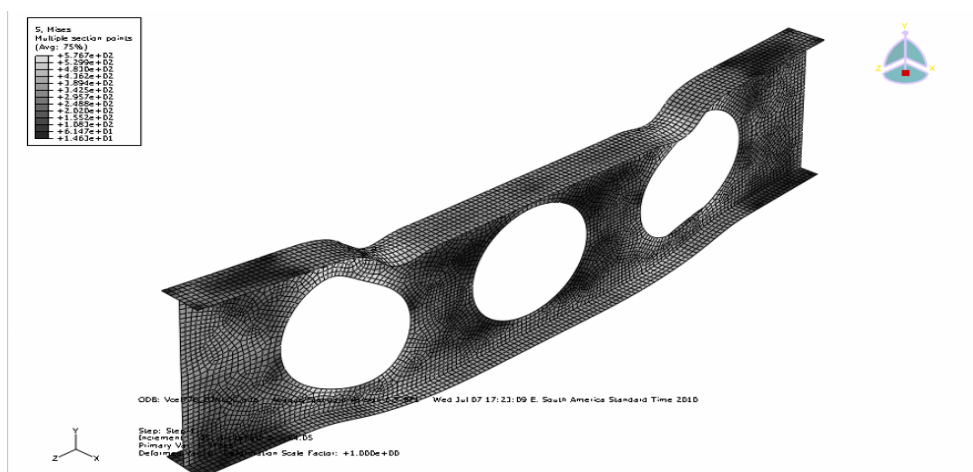


Figura 15 – Exemplo do mecanismo Vierendeel (VC776: perfil original W530x85 e comprimento destravado de 3m)

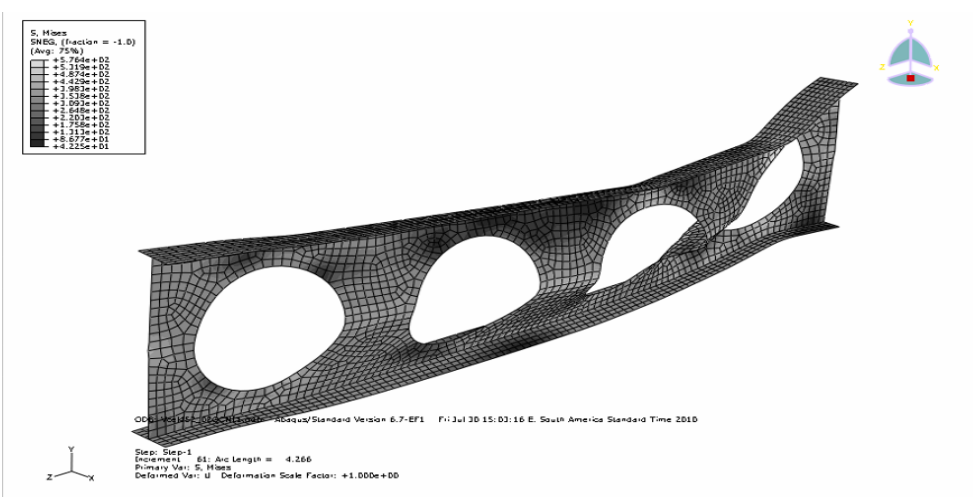


Figura 16 – Exemplo de falha do montante de alma (VC452: perfil original W310x32,7 e comprimento destravado de 2m)

4 PROPOSIÇÃO DE PROCEDIMENTO

Com base nos resultados apresentados e avaliados no item precedente, propõe-se um procedimento para obtenção do momento fletor resistente para o estado-limite de flambagem lateral com torção de vigas celulares, com a geometria conforme Subseção 1.2. Esse procedimento tem como base adoção das prescrições da ABNT NBR 8800:2008 para vigas de alma sólida, mas substituindo-se os parâmetros de esbeltez λ_p e λ_r , relacionados respectivamente à plastificação e ao início do escoamento pelos valores correspondentes de comprimentos destravados, quais sejam L_p e L_r e, ainda:

- tomando as propriedades geométricas da seção líquida no centro das aberturas, com a constante de empenamento determinada conforme Kohnehpooshi e Showkati (2009), ou seja, pela Eq. (2);

- trocando o valor de L_r por um valor corrigido, $L_{r,cor}$, majorado em 20%;
- assumindo como momento fletor resistente máximo um valor igual a 90% do momento de plastificação.

Todos esses ajustes têm o objetivo de fazer com que o procedimento proposto forneça resultados próximos dos da análise numérica.

Com base no exposto, o procedimento proposto pode ser assim resumido:

- se $L_b > L_{r,cor}$, com

$$L_{r,cor} = \frac{1,66\sqrt{I_y J}}{J\beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27C_w\beta_1^2}{I_y}}} \quad (3)$$

tem-se que:

$$M_{Rk} = M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w}\right)} \quad (4)$$

onde L_b é o comprimento destravado sujeito à flambagem lateral com torção, I_y é o momento de inércia em relação ao eixo central que passa pelo plano médio da alma, C_b é o fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme conforme a ABNT NBR 8800:2008, J é a constante de torção, C_w é a constante de empenamento da seção transversal, e

$$\beta_1 = \frac{0,7 f_y W_x}{E J} \quad (5)$$

sendo E o módulo de elasticidade e f_y a resistência ao escoamento do aço e W_x o módulo resistente elástico da seção transversal em relação ao eixo central perpendicular à alma;

- se $L_p < L_b \leq L_{r,cor}$, com

$$L_p = 1,76 r_y \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (6)$$

sendo r_y o raio de giração em relação ao eixo central que passa pelo plano médio da alma, tem-se que

$$M_{Rk} = M_{cr} = C_b \left[0,90 M_{pl} - \left(0,90 M_{pl} - M_{r,cor} \right) \frac{L_b - L_p}{L_{r,cor} - L_p} \right] \leq 0,90 M_{pl} \quad (7)$$

onde M_{pl} é o momento de plastificação da seção transversal e $M_{r,cor}$ é o momento fletor correspondente ao início do escoamento, ajustado em função do valor de $L_{r,cor}$, igual a:

$$M_{r,cor} = \frac{0,31E}{L_{r,cor}^2} \sqrt{I_y \left(1000 C_w + 39 J L_b^2 \right)} \quad (8)$$

- se $L_b \leq L_p$

$$M_{Rk} = 0,90 M_{pl} \tag{9}$$

Pode-se observar graficamente, pelas Figuras 9 a 14, que os valores do momento fletor resistente obtidos com o procedimento proposto encontram-se muito próximos dos obtidos na análise numérica. As Figuras 17 e 18 mostram a diferença percentual entre os valores obtidos por esse procedimento e pela análise numérica para os casos de momento constante e carga uniformemente distribuída, respectivamente. Observa-se que, no primeiro caso, a diferença varia aproximadamente de -2% a 6% e, no segundo, de -7% a 10%.

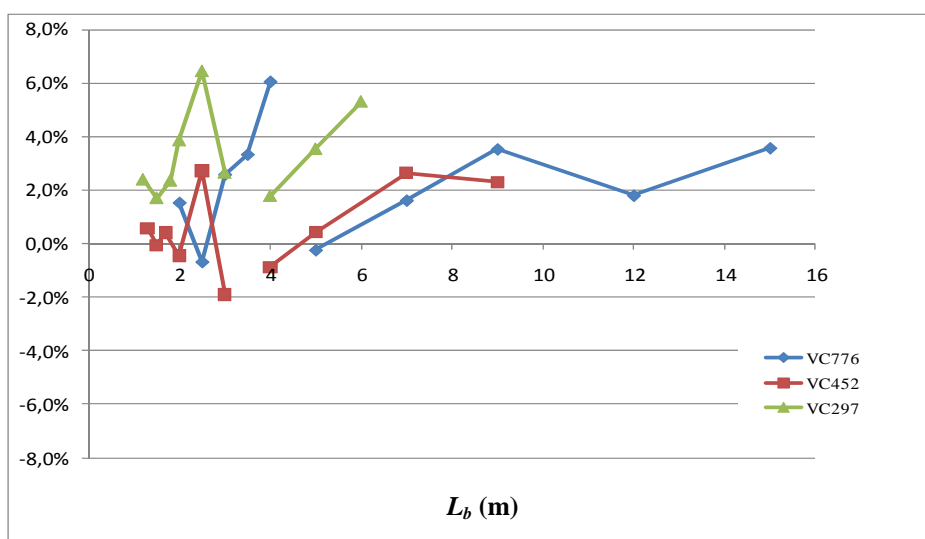


Figura 17 – Diferença percentual entre a formulação proposta e a análise numérica para momento constante

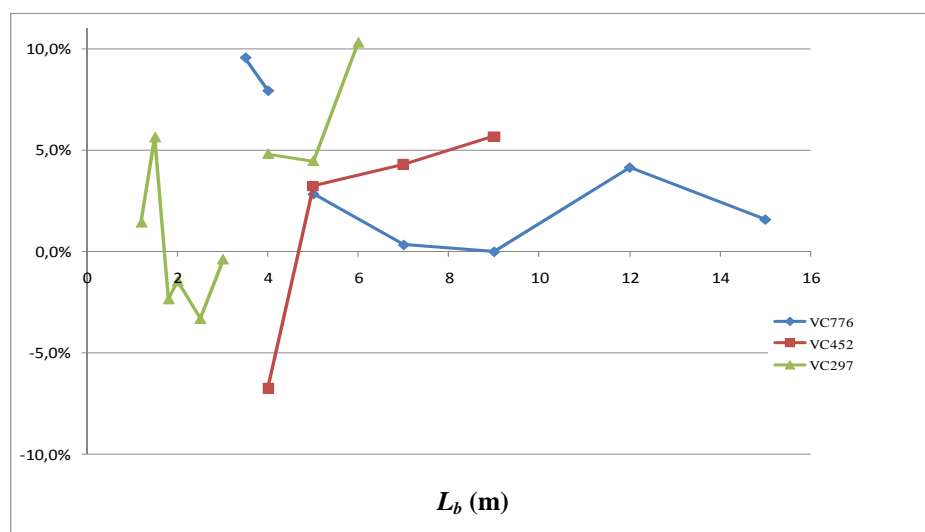


Figura 18 - Diferença percentual entre a formulação proposta e a análise numérica para carga distribuída

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um procedimento para determinação do momento fletor resistente nominal de vigas de aço celulares para o estado-limite último de flambagem lateral com torção. Foram abordados os casos em que as vigas possuem vínculo de garfo (empenamento livre e torção impedida) nas extremidades do comprimento destravado e estejam submetidas aos carregamentos de momento uniforme em relação ao eixo perpendicular à alma e carregamento uniformemente distribuído aplicado no nível do centro de torção da seção transversal.

Para se chegar ao procedimento, inicialmente foi projetada e aferida uma modelagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos, para análise não-linear, prevendo comportamentos elástico e inelástico e a influência das tensões residuais, usando o Programa ABAQUS (Hibbit *et al.*, 1998). Posteriormente, foram processadas vigas celulares com três alturas diferentes e distantes entre si (297 mm, 452 mm e 776 mm, derivadas dos perfis laminados W 200x22,5, W 310 x 32,7 e W 530 x 85, respectivamente), procurando assim abranger o comportamento de peças em uma ampla faixa da construção metálica. Os vãos, sempre tomados iguais aos comprimentos destravados, variaram de valores reduzidos, em que o colapso se dá em regime inelástico, a valores elevados, nos quais a flambagem ocorre em regime elástico. Todos os resultados foram expressos em termos de curvas relacionando o momento fletor resistente M_{Rk} e o comprimento destravado L_b .

Com objetivo de apoiar a busca do melhor procedimento de cálculo do momento resistente para o estado-limite último em estudo, e também para aferição desse procedimento, foram feitas comparações entre os valores obtidos da análise numérica para as vigas celulares e os valores fornecidos pela ABNT NBR 8800:2008 para as vigas de alma sólida com os perfis originais e com perfis hipotéticos de mesma altura das celulares. Foram também feitas comparações com os valores obtidos aplicando-se, sem modificação, a formulação da ABNT NBR 8800:2008 às vigas celulares, com as propriedades geométricas da seção transversal calculadas no centro das aberturas, considerando-se, nesse caso, a constante de empenamento C_w segundo a Eq. (2), aplicável usualmente aos perfis de alma sólida.

Ao final, chegou-se a um procedimento, de fácil utilização prática, que adota a mesma formulação da ABNT NBR 8800:2008 para vigas de alma sólida, utilizando as propriedades da seção transversal no centro das aberturas e aumentando em 20% valor do comprimento destravado correspondente ao início do escoamento e assumindo como momento máximo resistente 90% do momento de plastificação.

6 AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG, à CAPES e ao CNPq, que tornaram possível a elaboração e a apresentação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 8800:2008. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, 2008.
- BS 5950-1:2000 (2001). Structural use of steel in building – Part: Code of practice for design – Rolled and welded sections. *British Standards Institution (BSI)*, 2001.
- Bezerra, E.M.; Fakury, R.H.; Castro e Silva, A.L.R. e Caldas, R.B. Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço casteladas, *Anais das XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, San Juan, Argentina, 2010.

- Bradley, T.P (2003). Stability of castellated beams during erection. *Master's Thesis*, Virginia Tech.
- Castro e Silva, A.L.R. Análise numérica não-linear da flambagem local de perfis de aço estrutural submetidos à compressão uniaxial. *Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte*, 2006.
- Earls, C. J. Effects of material property stratification and residual stresses on single angle flexural ductility. *Journal of Constructional Steel Research*, 51:147-175, 1999.
- Galambos, T.V., 1988 - *Guide to stability design criteria for metal structures*, 4th Ed., A. Wiley – Interscience, 1988.
- Harper, C.S. Design in steel 4: Castellated & cellular beams, *British Steel Publications*, 1994.
- Hibbitt, Karlsson and Sorensen. ABAQUS/Standard – User's manual, Vol. I, II e III, *Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc, EUA*, 1998.
- Kohnepooshi, O. e Showkati, H. (2009), Numerical and structural behavior of elastic castellated section. *European Journal of Scientific Research*, 2:306-318, 2009.
- Reis A.L.F. O Método da energia aplicado à flambagem lateral com torção de vigas de aço, 155 páginas, *Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte*, 1996.
- Souza, L.A. Flambagem lateral com torção de vigas de aço em regime elasto-plástico. *Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte*, 1999.
- Ward, J. K. Design of composite and non-composite cellular beams, *The Steel Construction Institute*, 2ª edição, 1994.