



MÉTODO SIMPLIFICADO PARA CONSIDERAR OS EFEITOS DAS TENSÕES RESIDUAIS NA ANÁLISE NUMÉRICA DE VIGAS ALVEOLARES

Felipe Barbosa Teixeira ^a

Rodrigo Barreto Caldas ^b

Ricardo Hallal Fakury ^c

felipebt@eng-estrut.mest.ufmg.br

^a Aluno do programa de pós-graduação do Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais

^b Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais

^c Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Av. Antônio Carlos, 6627, 31270-901, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Resumo. Neste artigo estuda-se por meio de análise numérica o comportamento de vigas alveolares com aberturas circulares ou hexagonais quanto ao modo de falha de flambagem lateral com torção. Os estudos mais recentes avaliando a resistência dessas vigas são compilados para a formação de um banco de dados de modelos numéricos e resultados experimentais de referência. A influência das tensões residuais sobre a capacidade resistente é estudada. Um método simplificado que envolve a redução do módulo de elasticidade do material é proposto para simular os efeitos deletérios causados pelas tensões residuais. Os resultados de modelos numéricos adotando o método simplificado são comparados com os resultados experimentais e com os resultados de modelos numéricos que consideram explicitamente as tensões residuais para comprovar a aplicabilidade da utilização desse método em simulações numéricas como substituto para a introdução direta de tensões residuais.

Palavras-chave: Viga Alveolar, Tensões Residuais, Elementos Finitos, Flambagem Lateral com Torção.

1 INTRODUÇÃO

Perfis alveolares são peças com aberturas de formato idêntico e igualmente espaçadas presentes na alma de um perfil de seção transversal tipo I. A cada formato de abertura está associada uma denominação específica. Perfis com aberturas circulares e hexagonais, por exemplo, são chamados de celulares e castelados, respectivamente. O uso de perfis com aberturas na alma justifica-se pelo ganho de resistência e rigidez da peça para esforços de flexão em torno do eixo de maior inércia sem aumentar o peso da estrutura, gerando economia para a obra. Perfis alveolares apresentam ainda vantagens construtivas (as aberturas podem ser utilizadas para passar tubulações, reduzindo a altura requerida para o pé direito) e arquitetônicas (as peças alveolares conferem à estrutura uma aparente leveza).



Figura 1. Exemplo de uso de vigas celulares em edificações (Fonte: Sonck, 2014)

O processo usual de fabricação de perfis alveolares envolve duas etapas (Fig. 2). Na primeira etapa o perfil original (geralmente um perfil I laminado de alma cheia) é cortado com introdução de calor ao longo da alma. O formato e a quantidade de linhas de corte dependem da geometria dos alvéolos. Nos perfis castelados usa-se uma linha de corte constituída por segmentos retos em ziguezague e nos celulares usam-se duas linhas de corte constituídas por segmentos retos e semicirculares.

Na segunda etapa as duas metades do perfil são deslocadas longitudinalmente uma em relação à outra e soldadas nos montantes da alma. Ao término dessa operação é possível que o perfil fique com algum desvio de prumo, portanto é comum realizar um alinhamento a frio para garantir a retidão do eixo da barra.

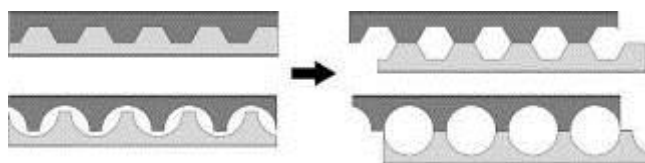


Figura 2. Método convencional de fabricação de perfis alveolares (Fonte: Sonck, 2014)

Esse processo construtivo, com algumas adaptações, permite a criação de barras com seções de altura variável ou monossimétricas. Neste trabalho, entretanto, serão estudadas apenas seções alveolares duplamente simétricas com aberturas circulares ou hexagonais formadas a partir de uma única seção original (perfil I de alma cheia).

Os modos de falha de vigas alveolares foram listados por Kerdal e Nethercot (1984), podendo ser caracterizados como locais ou globais. Os modos locais incluem: formação do

mecanismo de Vierendeel; flambagem lateral com torção do montante da alma (também chamado de flambagem do montante da alma); ruptura da solda; flambagem por flexão do montante da alma. Os modos globais resumidos por Sonck (2014) são: flambagem lateral com torção; formação de rótula plástica; flambagem por flexão em torno do eixo de menor inércia; flambagem por flexão em torno do eixo de maior inércia. As vigas estudadas neste trabalho estarão sujeitas à falha global de flambagem lateral com torção (Fig. 3).

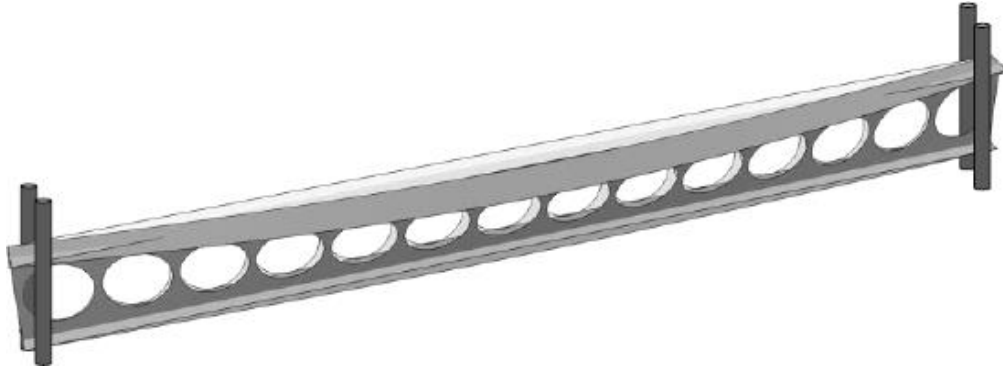


Figura 3. Viga alveolar falhando por flambagem lateral com torção (Fonte: Sonck, 2014)

2 OBJETIVO

Pretende-se neste trabalho estudar numericamente o comportamento de vigas alveolares sujeitas à flambagem lateral com torção. Para que seja possível utilizar modelos numéricos é necessário primeiramente aferi-los, comprovando que seu comportamento corresponde satisfatoriamente ao comportamento da estrutura real que se deseja simular. Alguns aspectos de perfis alveolares são difíceis de estimar, em particular a distribuição de tensões residuais. Mesmo quando os perfis alveolares são fabricados segundo o procedimento convencional ainda há um grande número de variáveis (dentre as quais pode-se listar a temperatura da realização do corte, o tempo e as condições de resfriamento, a retificação a frio e o processo de solda dos montantes da alma do perfil) que podem influenciar na distribuição de tensões residuais final. Tais detalhes do processo de fabricação podem variar de fabricante para fabricante, sendo difícil fazer afirmações genéricas sobre a distribuição de tensões residuais em uma viga alveolar qualquer. Propõe-se neste trabalho tentar condensar as incertezas da distribuição de tensões residuais em uma única variável: o módulo de elasticidade do material. Através da adoção de um fator de redução para o módulo de elasticidade pretende-se simular, em um modelo numérico sem tensões residuais, o comportamento de uma viga alveolar observada experimentalmente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As pesquisas envolvendo perfis alveolares que falham globalmente por flambagem lateral com torção são escassas. As publicações mais recentes nessa área foram realizadas por Zirakian e Showkati (2006), Abreu (2009), Abreu (2010), Sonck et al. (2010), Ellobody (2011), Abreu (2011), Bezerra (2011), Sweedan (2011), Ellobody (2012), Nseir et al. (2012), Sonck et al. (2012), Sonck (2014), Sonck et al. (2014), Boissonnade et al. (2014) e Sonck e Belis (2015). Apenas em Sonck et al. (2014) e Sonck (2014) estudou-se diretamente as distribuições de tensões residuais em perfis alveolares.

Os estudos experimentais realizados por Sonck (2014) e Sonck et al. (2014) com peças celulares e casteladas incluem ensaios para determinação de tensões residuais e ensaios para determinação de momento fletor resistente de peças que falham por flambagem lateral com torção. Os resultados dos ensaios foram utilizados para calibrar modelos numéricos que, por sua vez, foram utilizados para estudar pilares alveolares sujeitos a uma combinação de esforços de flexão e compressão axial.

3.1 Ensaios experimentais

Parte do estudo realizado por Sonck (2014) envolveu a determinação das tensões residuais presentes ao longo da seção transversal dos perfis celulares e castelados. Tal estudo é necessário uma vez que os cortes e a introdução de calor gerada pelas etapas de produção da peça alveolar modificam o padrão de tensões residuais existente no perfil de alma cheia original.

Para a determinação das tensões residuais utilizou-se o método de *sectioning*, um ensaio destrutivo baseado na relaxação de tensões (Fig. 4).

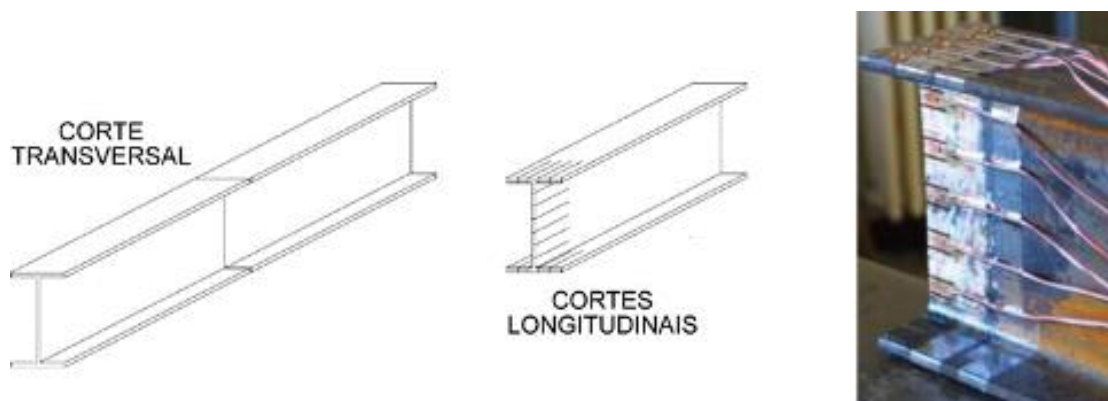


Figura 4. Ensaios para determinação das tensões residuais em vigas alveolares (Fonte: Sonck, 2014)

Medições foram realizadas na seção do centro da abertura e do centro do montante da alma. As tensões residuais (σ_{res}) são calculadas a partir das deformações medidas (ϵ_{meas}) através da seguinte expressão:

$$\sigma_{res} = - E \times \epsilon_{meas} \quad (1)$$

Os ensaios para determinação das tensões residuais levaram Sonck et al. (2014) a propor os padrões de distribuição ilustrados na Fig. 5. É importante ressaltar que os perfis celulares estudados por Sonck (2014) e Sonck et al. (2014) não foram fabricados segundo o método convencional de corte e solda. Em vez disso optou-se por fabricar inicialmente um perfil com as aberturas hexagonais e então cortar as bordas das aberturas hexagonais de forma a transformá-las em aberturas circulares (Fig. 6). Perfis fabricados dessa maneira apresentam distribuição de tensões residuais diferente da de perfis fabricados segundo o método convencional. Isso explica a diferença significativa nos padrões de distribuição de tensões residuais propostos por Sonck et al. (2014) para perfis castelados e celulares.

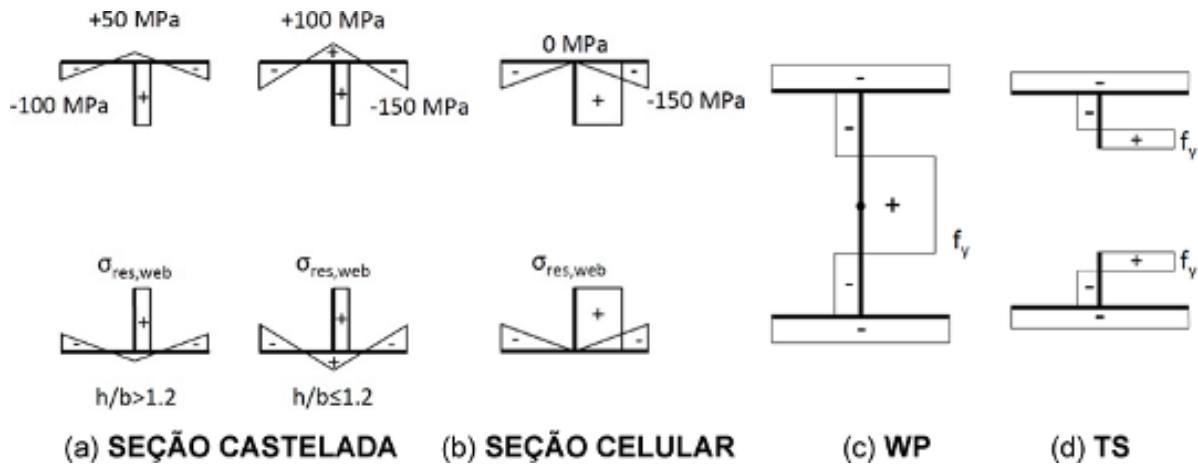


Figura 5. Padrões para distribuição de tensões residuais propostos para: (a) Seção castelada; (b) Seção celular (genérico); (c) Seção celular no centro do montante da alma (WP); (d) Seção celular no centro da abertura (TS); (Fonte: Sonck, 2014)



Figura 6. Fabricação não convencional de vigas celulares (Fonte: Sonck, 2014)

Para determinar o momento fletor resistente último dos perfis alveolares Sonck (2014) realizou seis ensaios de flexão de quatro pontos. As características de cada um dos ensaios são listadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos ensaios de flexão de quatro pontos realizados por Sonck (2014)

Nome	Tipo	L [m]	L_F [m]	$f_{y,tfl}$ [MPa]	$f_{y,bfl}$ [MPa]	$f_{y,web}$ [MPa]
CS1_L3	Castelada	3.15	0.21	352	349	332
CS1_L4	Castelada	3.99	1.89	348	342	320
CS1_L6	Castelada	6.09	1.89	352	349	332
CS2_L3	Celular	3.15	0.21	342	341	329
CS2_L4	Celular	3.99	1.89	348	351	339
CS2_L6	Celular	6.09	1.89	342	341	329

As propriedades geométricas dos perfis castelados e celulares ensaiados aparecem resumidas na Tabela 2.

Tabela 2. Características geométricas dos perfis ensaiados por Sonck (2014)

Tipo	d [mm]	b_f [mm]	a [mm]	w [mm]	o [mm]	t_f [mm]	t_w [mm]
Castelada	220	83.1	118.9	73.8	136.2	7.3	5.5
Celular	220	81.1	142.8	67.2	142.8	7.3	5.5

As variáveis $f_{y,tfl}$, $f_{y,bfl}$ e $f_{y,web}$ representam as resistências ao escoamento da mesa superior, da mesa inferior e da alma, respectivamente. Esses valores foram obtidos para cada barra por meio de ensaios de tração. O significado das demais variáveis adotadas nas Tabelas 1 e 2 aparece indicado na Fig. 7.

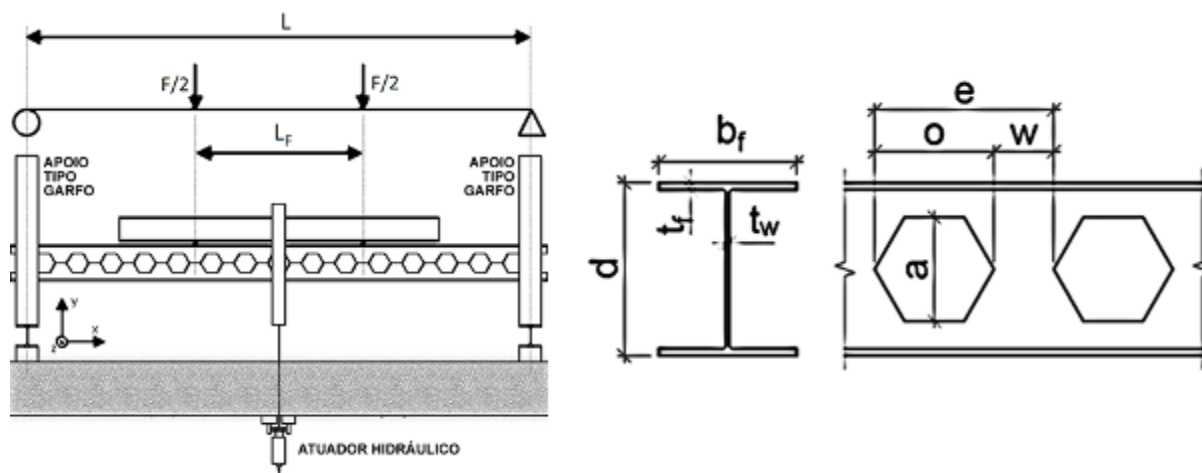


Figura 7. Esquema do ensaio de flexão de quatro pontos e simbologia adotada

A Fig. 7 representa de forma esquemática os ensaios realizados. As barras são birrotuladas, com vínculos de garfo em ambas as extremidades. Esses vínculos restringem, para efeito da flambagem lateral com torção, o deslocamento transversal e a torção, mas permitem a ocorrência do empenamento da seção transversal.

As duas forças da flexão de quatro pontos foram aplicadas com o uso de um quadro de carga e macacos hidráulicos atuando sobre uma viga de transição. O experimento foi projetado de tal forma a garantir que nos pontos de introdução de carga não houvesse restrição ao deslocamento lateral da viga (Fig. 8).

Todas as peças estudadas falharam por flambagem lateral com torção. As peças mais longas (CS1_L6 e CS2_L6) não chegaram até o limite de sua resistência devido a dificuldades na execução do experimento causadas pelo grande deslocamento sofrido pelas vigas e por limitações do método de introdução de carga adotado.



Figura 8. Flambagem lateral com torção de viga celular (Fonte: Sonck, 2014)

Diversas medições de deslocamentos foram realizadas nas vigas ensaiadas. A Fig. 11 apresenta um gráfico correlacionando o deslocamento vertical no centro do vão da viga com a carga total aplicada no ensaio de flexão de quatro pontos. Esse resultado será utilizado para a aferição dos modelos numéricos subsequentemente utilizados.

3.2 Modelo numérico

Sonck e Belis (2015) realizaram simulações numéricas utilizando o software ABAQUS, que executa a implementação computacional do método dos elementos finitos. Os modelos criados por esses autores possuem as seguintes características:

- composição por elementos de casca (bidimensionais) de quatro nós;
- diagrama de tensão-deformação do aço bilinear sem endurecimento;
- atualização da geometria e da matriz de rigidez a cada iteração;
- imperfeição geométrica inicial com a forma de uma senoide correspondente ao modo de flambagem por flexão em torno do eixo de menor inércia da peça, com magnitude do deslocamento na seção central de $L/1000$, sendo L o vão;
- solução por meio do método de comprimento de arco (*arc-length*), que permite alcançar a convergência do modelo numérico mesmo após atingida a carga limite e, consequentemente, o estudo do comportamento após a falha;
- teoria de grandes deslocamentos;
- diagramas de tensões residuais propostos por Sonck et al (2014), conforme a Fig. 5 (para as vigas alveolares estudou-se dois tipos de modelo: vigas com distribuição de tensões residuais como a medida nos centros das aberturas – TS, para *tee section* – e vigas com distribuição como a medida no montante da alma – WP, para *web post*);

- apoios nas direções de Y e Z aplicados na alma da viga nas seções de extremidade, com acoplamentos de deslocamentos nodais nos nós da alma nessas seções para impedir distorções da alma;
- forças aplicadas pontualmente (cada força diretamente sobre um nó) no eixo da mesa superior do perfil.

As propriedades físicas e geométricas listadas nas Tabelas 1 e 2 foram utilizadas na criação dos modelos. Adotou-se para todos os modelos um módulo de elasticidade do aço igual a 205 GPa. O modelo numérico de Sonck e Belis (2014) apresentou boa concordância com os resultados numéricos e experimentais de Nseir et al. (2012).

Os resultados obtidos nas análises numéricas e os resultados obtidos nos ensaios são exibidos na Fig. 11, que correlaciona o deslocamento vertical no centro da barra com a carga total aplicada na flexão de quatro pontos. Observa-se boa concordância entre os resultados experimentais e os numéricos.

4 METODOLOGIA

Os ensaios e os modelos numéricos de Sonck e Belis (2014) serviram de base para o estudo de modelos de vigas alveolares sem tensões residuais. Um modelo numérico foi criado no software de elementos finitos ANSYS (versão 14.0). As características do modelo são as mesmas listadas no Item 3.2 para o modelo de Sonck e Belis (2014), com duas exceções:

- a imperfeição geométrica inicial não teve a forma de uma senoide, mas sim de um polinômio do quarto grau;
- não foram inseridas tensões residuais.

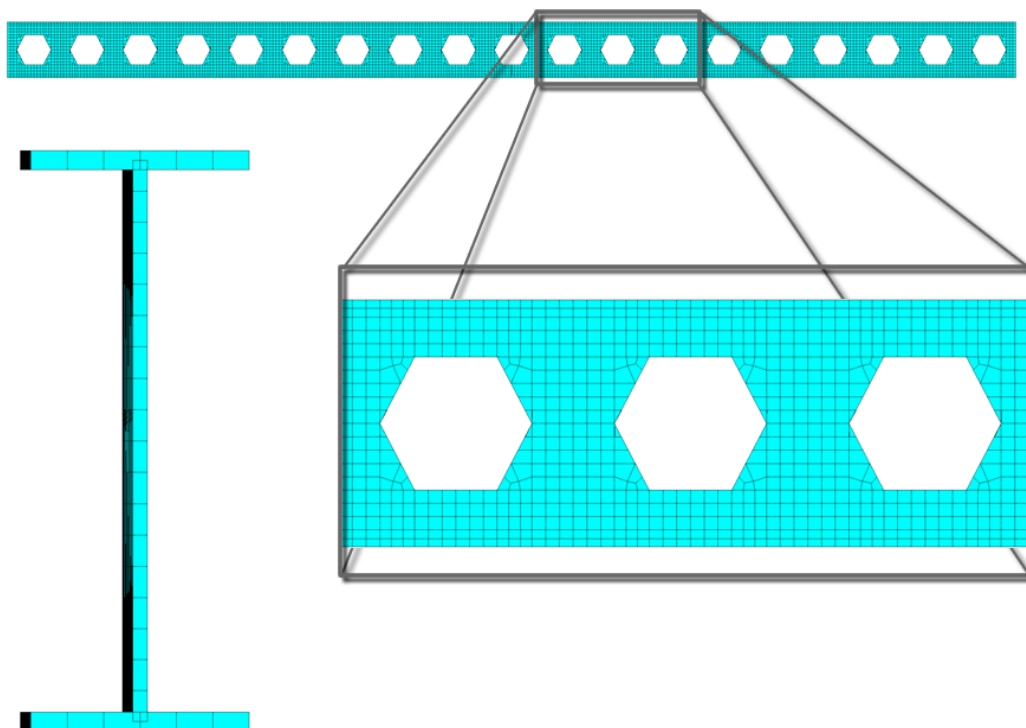


Figura 9. Exemplo da malha do modelo de elementos finitos no ANSYS 14.0

Devido à ausência de tensões residuais (que agem reduzindo a resistência final da peça) esperava-se que a capacidade resistente final dos modelos de elementos finitos do ANSYS fosse superior à dos modelos de Sonck e Belis (2014). Introduziu-se então um coeficiente de redução do módulo de elasticidade nos modelos desenvolvidos com o auxílio do programa ANSYS (sem tensões residuais) de forma a fazer com que o comportamento desses modelos simule aquele dos modelos com introdução direta de tensões residuais.

5 RESULTADOS

Modelos numéricos de características físicas e geométricas idênticas às das vigas ensaiadas por Sonck (2014), listadas nas Tabelas 1 e 2, foram processados no ANSYS sem a introdução das tensões residuais. Todos os modelos falharam por FLT (Fig. 10).

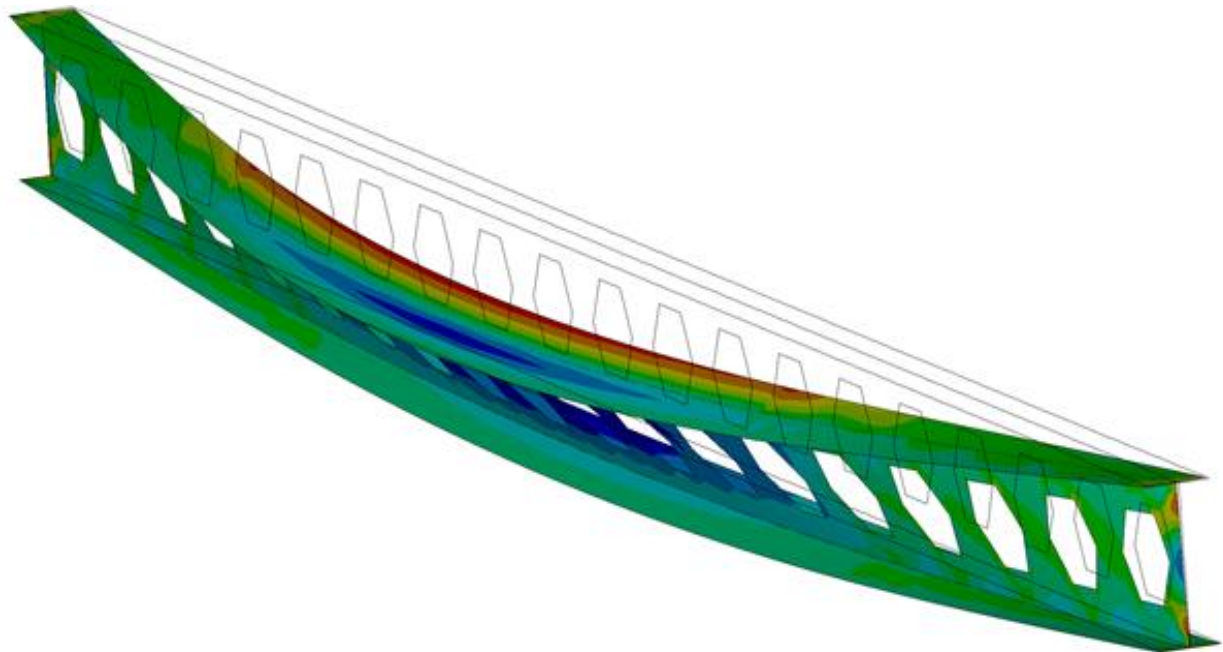


Figura 10. Flambagem lateral com torção de viga castelada simulada no ANSYS

Os resultados obtidos são exibidos na Fig. 11, justapostos aos resultados de Sonck e Belis (2014). As curvas correspondentes aos ensaios experimentais estão identificadas como *EXPERIMENTO* e as curvas correspondentes às análises numéricas estão identificadas como *ABAQUS*. As vigas celulares foram analisadas por Sonck e Belis (2014) de duas maneiras distintas: com distribuição de tensões residuais observada no montante da alma (curva correspondente identificada como *ABAQUS WP*); ou com distribuição de tensões residuais observada no centro da abertura (curva correspondente identificada como *ABAQUS TS*).

Observa-se que, para modelos sem a redução do módulo de elasticidade e sem tensões residuais (curva indicada como *ANSYS (100%)* na Fig. 11), obteve-se uma capacidade resistente final superior às obtidas experimentalmente e numericamente por Sonck e Belis (2014).

Um estudo dos fatores de redução do módulo elasticidade revela que uma redução de 10% (curva indicada no gráfico como *ANSYS (90%)* na Fig. 11) no valor do módulo de elasticidade proporciona uma boa concordância entre os resultados obtidos nos modelos numéricos com a consideração explícita das tensões residuais e os resultados obtidos nos

modelos numéricos sem tensões residuais. Para as vigas mais curtas (CS1_L3 e CS2_L3) uma melhor concordância foi obtida para uma redução de 15% no módulo de elasticidade (curva indicada no gráfico como ANSYS (85%) na Fig. 11).

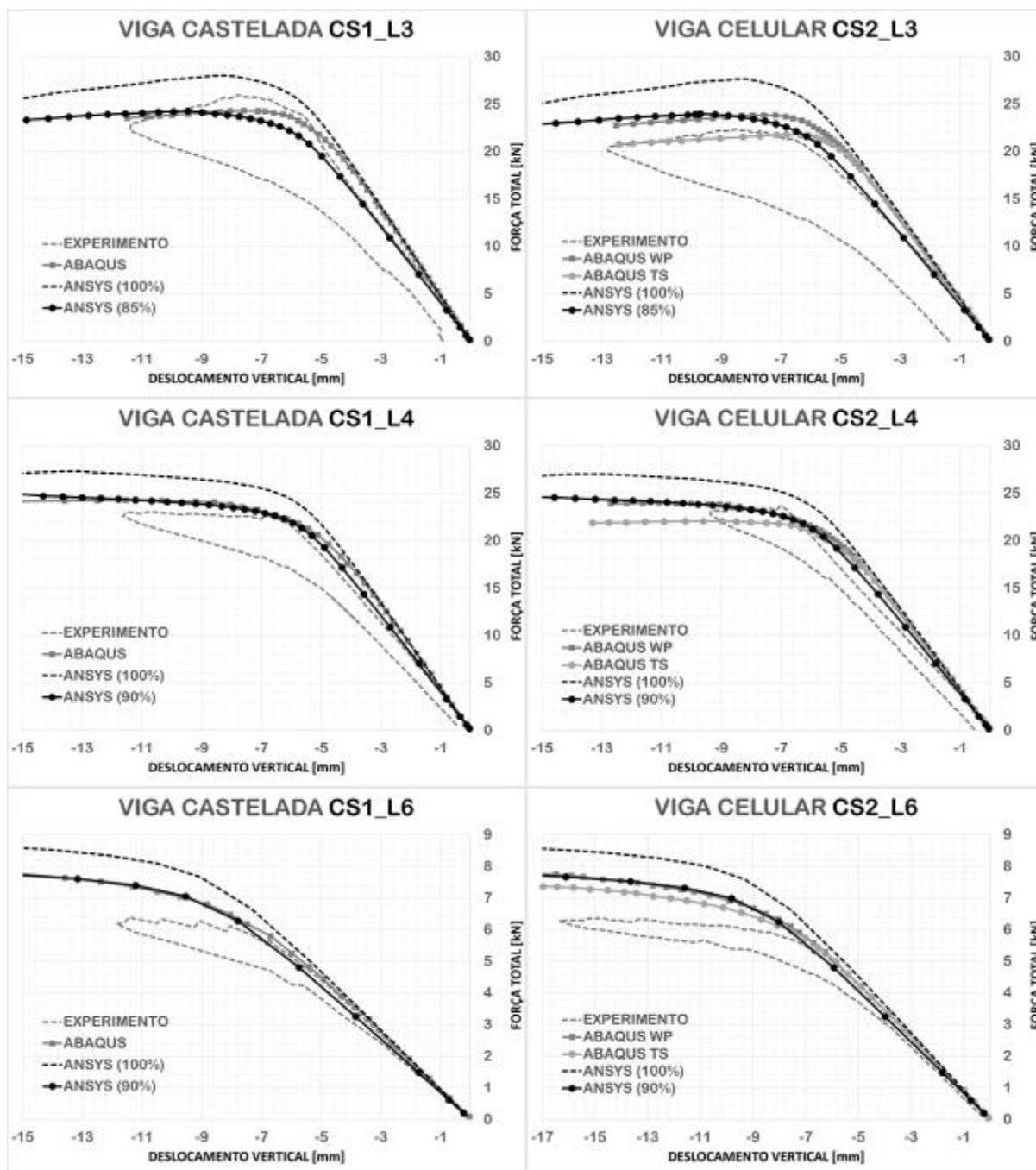


Figura 11. Comparação entre resultados experimentais e numéricos para as vigas ensaiadas

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi utilizada redução do módulo de elasticidade do aço para simular os efeitos deletérios das tensões residuais na capacidade resistente à flambagem lateral com torção de vigas alveolares. Observou-se que esse método indireto é capaz de produzir resultados que apresentam boa concordância com aqueles obtidos por ensaios experimentais e com aqueles obtidos por outros modelos numéricos que consideram explicitamente as tensões residuais. Um fator de redução de 10% para as peças mais longas e 15% para as mais curtas levou a bons resultados. Os modelos numéricos desenvolvidos no ANSYS, aferidos neste trabalho, e o procedimento do coeficiente de redução do módulo de elasticidade serão utilizados em trabalhos futuros para a realização de análises paramétricas de vigas alveolares (que permitirão o estudo de uma vasta gama de geometrias e condições de contorno) com o intuito de gerar recomendações práticas para o dimensionamento de vigas celulares e casteladas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro em forma de fomento à pesquisa concedido pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), pela CAPES e pela UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais).

REFERÊNCIAS

ANSYS, Release 14.0 - © 2011 SAS IP, Inc.

Abreu, L. M. P., Fakury, R. H., Silva, A. L. R. C., Calenzani, A. F. G., 2009. Análise elástica da flambagem lateral com torção de vigas celulares. *CILAMCE 2009, Armação de Búzios. Anais do CILAMCE 2009*. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009. v. 1. p. 01-13.

Abreu, L. M. P., Fakury, R. H., Silva, A. L. R. C., 2010. Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço celulares. *CILAMCE 2010, Buenos Aires. Mecânica Computacional. Buenos Aires: Asociación Argentina de Mecánica Computacional - AMCA*, 2010. v. XXIX. p. 1-17.

Abreu, L. M. P., 2011. Determinação do Momento Fletor Resistente à Flambagem Lateral com Torção de Vigas de Aço Celulares. *Dissertação de Mestrado, UFMG* (2011).

Bezerra, M., 2011. Determinação do Momento Fletor Resistente à Flambagem Lateral com Torção de Vigas de Aço Casteladas. *Dissertação de Mestrado, UFMG* (2011).

Boissonnade, N., Nseir, J., Lo, M., Somja, H., 2014. Design of cellular beams against lateral torsional buckling. *Structures and Buildings*, Volume 167 Issue SB7, 2014.

Ellobody, E., 2011. Interaction of buckling modes in castellated steel beams. *Journal of Constructional Steel Research* 67 (2011) 814-825.

Ellobody, E., 2012. Nonlinear analysis of cellular steel beams under combined buckling modes. *Thin-Walled Structures* 52 (2012) 66–79.

Kerdal, D., Nethercot, D. A., 1984. Failure Modes for Castellated Beams. *J. Construct. Steel Research* 4 (1984) 295-315.

Nseir, J., Lo, M., Sonck, D., Somja, H., Vassart, O., Boissonnade, N., 2012. Lateral Torsional Buckling of Cellular Steel Beams. *Proceedings of the Annual Stability Conference, Structural Stability Research Council - Grapevine, Texas, April 18-21, 2012.*

Sonck, D., Vanlaere, W., Van Impe, R., 2010. Elastic lateral–torsional buckling of cellular beams. In: *Proceedings of International symposium “steel structures: culture and sustainability 2010” (SSCS2010); 2010, Turkish Constructional Steelwork Associations (TUCSA) Istanbul, p. 573–82*

Sonck, D., Boissonnade, N., Van Impe, R., 2012. Instabilities of cellular members loaded in bending or compression. *Proceedings of the Annual Stability Conference, Structural Stability Research Council - Grapevine, Texas, April 18-21, 2012.*

Sonck, D., Van Impe, R., Belis, J., 2014. Experimental investigation of residual stresses in steel cellular and castellated members. *Construction and Building Materials* 54 (2014) 512-519.

Sonck, D., 2014. Global Buckling of Castellated and Cellular Steel Beams and Columns. (*PhD dissertation*) *Ghent University*; 2014 (<http://hdl.handle.net/1854/LU-4256332>).

Sonck, D., Belis, J., 2015. Lateral–torsional buckling resistance of cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research* 105 (2015) 119-128.

Sweedan, A. M. I., 2011. Elastic lateral stability of I-shaped cellular steel beams. *Journal of Constructional Steel Research* 67 (2011) 151–163.

Zirakian, T., Showkati, H., 2006. Distortional buckling of castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research* 62 (2006) 863-871.