AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO EFEITO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM PERFIS I LAMINADOS

NUMERICAL EVALUATION OF THE EFFECT THE RESIDUAL STRESSES PARALLEL LAMINATED PROFILES I

Carlos Humberto Martins[1]
Leandro Canezin Guideli[2]
Sergio Tunis Martins Filho[3]
Washington Batista Vieira[4]

Resumo: Com a análise numérica, através do Método dos Elementos Finitos (MEF), é possível efetuar, com resultados bastante satisfatórios, simulações de vigas em perfis metálicos de abas paralelas. Um *software* computacional que permite efetuar esse tipo de análise é o *ABAQUS*. Por meio dele, podem ser simulados geometrias, materiais, carregamentos, etc. Podem também ser incluídas na simulação tensões, como as tensões residuais. Essas são tensões que surgem durante o processo de fabricação dos perfis laminados metálicos, no seu processo de resfriamento. Neste trabalho, apresenta-se uma análise numérica de vigas metálicas em perfis I laminados, utilizando-se para isso do *softwareABAQUS*, sendo simuladas através deste programa cargas e condições de contorno,além de se incluírem na simulação as tensões residuais, com diferentes modelos de distribuições. Pretendeu-se avaliar a influência destas tensões na flambagem lateral por torção, comparando os resultados adquiridos através das simulações numéricas com aqueles obtidos analiticamente, por intermédio do procedimento preconizado pela NBR 8800 (2008). Pode-se avaliar que as tensões residuais têm influência na flambagem lateral por torção quando se trata de vigas com índices de esbeltez menores, diminuindo significativamente sua resistência. Para valores maiores do índice de esbeltez, ou seja, vãos maiores, esse efeito atenua-se.

Palavras-chave: Perfis laminados. Abaqus. Tensões residuais

Abstract: With the numerical analysis using the Finite Element Method (FEM)it is possible to make, with very satisfactory results, beams simulations in metal profiles of parallel tabs. A computer software that allows you to perform this type of analysis is the Abaqus. Through it can be simulated geometries, materials, loads, etc. May also be included in the simulation stresses such as residual stresses. These stresses are that ones that come during the manufacturing process of laminated metal profiles in its cooling process. This research shows a numerical analysis of steel beams in parallel laminated profiles I, using for this Abaqus software, and simulated through this program loads and boundary conditions, and are included in the simulation residual stresses, with different types of distributions. Sought to assess the influence of these tensions in the lateral torsional buckling, comparing the results obtained through the numerical simulations with those obtained analytically, through the procedure recommended by NBR 8800 (2008). It was noticed that the residual stresses influence the lateral torsional buckling when it comes to beams with smaller slenderness ratios, significantly lowering its resistance. For larger values of slenderness ratio, in other words, longer spans, this effect is attenuated.

Keywords: Laminates Profiles. Abaqus. Residual stresses.

1 INTRODUÇÃO

1.1 PERFIS LAMINADOS DE ABAS PARALELAS

Os perfis laminados de abas paralelas (figura 1.1) são perfis estruturais, que são

[1] Prof. Dr., Universidade Estadual de Maringá-UEM, Departamento de Engenharia Civil-DEC, chmartins@uem.br
[2] Graduando, Universidade Estadual de Maringá – UEM, Programa de Iniciação Científica, PIC, leandro.guideli@gmail.com
[3] Mestrando em Engenharia Urbana pela Universidade Estadual de Maringá-UEM, Departamento de Engenharia Civil-DEC, sergiotunis@hotmail.com
[4] Doutorando, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Departamento de Engenharia Civil, wbatistavieira@yahoo.com.br

fabricados a quente em usinas siderúrgicas. O processo de fabricação envolve a laminação do aço, passando por rolos diversas vezes, até que sua forma final seja obtida.

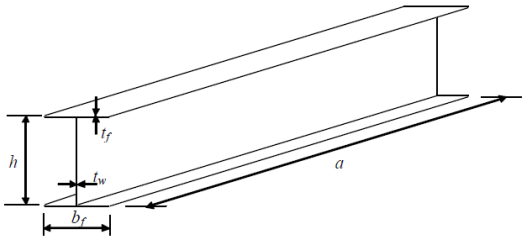

Figura 1. Esquema de perfil laminado de abas paralelas.
Fonte: BEZERRA (2011)

Esses perfis são os mais econômicos para utilização em estruturas metálicas, em detrimento dos perfis soldados, que devem ser feitos sob encomenda. Uma desvantagem relativa dos perfis laminados é que eles têm dimensões padronizadas, enquanto nos perfis soldados observa-se uma maior flexibilidade em relação às dimensões. No entanto, caso exista uma preocupação com padronização e modulação em projetos, essa menor flexibilidade dos perfis laminados pode ser vista como uma vantagem. Além do mais, pode-se verificar no mercado uma grande variedade de bitolas(PINHO, 2008).

Os usos das estruturas metálicas em edificações se mostram atraentes por diversos fatores: redução no tempo de obra, diminuição de custos, possibilidades de adaptações e ampliações, compatibilidade entre sistemas complementares, entre muitos outros. Destaca-se seu emprego em edifícios comerciais, nos quais é de grande interesse um curto tempo de execução, já que isso significaria um mais rápido retorno de investimento.

Com estas possibilidades atraentes de uso, tornam-se necessários estudos que tenham como centro o comportamento de estruturas metálicas.

1.2 TENSÕES RESIDUAIS EM PERFIS LAMINADOS METÁLICOS

Durante o processo de fabricação dos perfis laminados I (laminação a quente) ocorre o surgimento das tensões residuais. As tensões residuais irrompem na etapa de resfriamento do perfil estrutural.

Verifica-se que se resfriam mais rapidamente as extremidades das mesas, e a região central da alma, ao passo que levam um maior tempo para se resfriarem a região central da alma e junção da alma com a mesa. A figura 2 apresenta um esquema do processo de resfriamento de um perfil laminado. Em (a) o perfil encontra-se numa temperatura elevada, livre de tensões. Ilustram-se em (b) e (c) o processo de resfriamento, conforme o discorrido. Por fim, em (d), o perfil já se encontra na temperatura ambiente, e nele já podem ser verificadas a ocorrência das tensões residuais, com sua distribuição final.

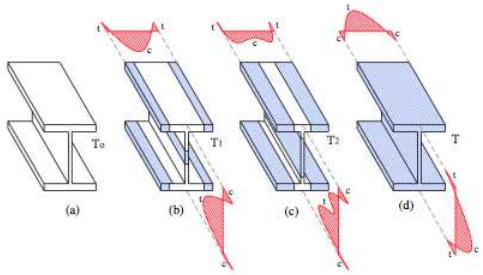

Figura 2. Esquema de resfriamento de um perfil laminado a quente
Fonte: GOMES (2006)

As tensões verificadas nos perfis laminados de abas paralelas, sujeitos à laminação a quente, são tensões de compressão nas regiões de extremidade das mesas e região central da alma, e tração nas regiões central das mesas e junções da alma com a mesa, devido ao lento resfriamento (BJORHVDE et. al, 1976).

Não há uma modelagem exata para a distribuição das tensões residuais em perfis laminados estruturais. Existem, porém, alguns modelos simplificados de distribuição, como o linear e o parabólico, nas mesas e na alma. As tensões residuais podem ou não ser consideradas na alma, dependendo de sua altura.

Em perfis de aço, as tensões residuais são auto-equilibradas, devendo haver uma relação entre as tensões residuais de tração e tensões residuais de compressão.

1.3 FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO

A condição necessária para que uma estrutura tenha um comportamento adequado na sua vida útil é que não sejam atingidos os estados limites, isto é, estados nos quais a estrutura deixará de atender às suas funções de projeto. Existem dois tipos de estados limites: estados limites últimos e estados limites de utilização. O segundo se relaciona a utilização econômica e à integridade dos materiais suportados pela estrutura, bem como o conforto dos usuários. Já o primeiro está ligado ao colapso, parcial ou total, de uma estrutura, devido ao esgotamento da capacidade portante da estrutura.

Nas vigas, os estados limites últimos devido à flexão estão geralmente ligados a um dos seguintes fenômenos:plastificação total de uma ou mais seções transversais, flambagem local da mesa comprimida, flambagem local da alma, eflambagem lateral com torção.

O último, flambagem lateral com torção (FLT) tem sua ocorrência verificada em vigas com um índice de esbeltez relativamente mais elevado. O processo da FLT é um fenômeno de instabilidade que envolve flexão lateral, perpendicular ao plano de carregamento, que causa um deslocamento no eixo de torção, euma consequente torção.

Nos perfis de abas paralelas, a FLT pode ser explicada pelo fato da parte comprimida da seção transversal tornar-se instável, e, por ser ligada continuamente por meio da alma à parte tracionada, o efeito estabilizador desta desencadeia na ocorrência de uma translação lateral $\mu(z)$, com uma consequente torção $\phi(z)$, conforme a figura 3.

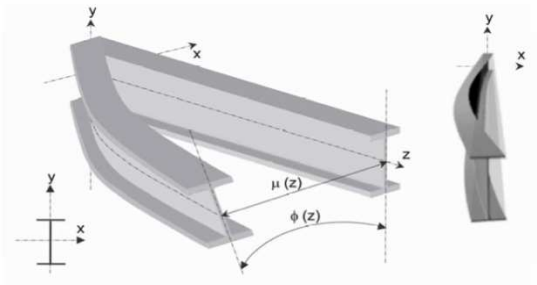

Figura 3. Flambagem lateral com torção
Fonte: BEZERRA (2011)

Há diversos fatores que causam influencia na FLT. Alguns deles são o tamanho do comprimento destravado, a variação do momento fletor, imperfeições geométricas e ocorrência de cargas estabilizantes/desestabilizantes.

Um outro fator que influencia na FLT é a ocorrência de tensões residuais nos perfis laminados. A sua consideração afeta, no resultado final, o momento critico para a FLT.

Destaca-se também uma outra variável importante a se considerar no estudo da FLT: as condições de contorno. Um vínculo rígido (análogo a um engaste) apresenta maior

resistência à FLT do que um vínculo de garfo (análogo a um apoio do segundo gênero)

A FLT apresenta ocorrência quando é excedido um determinado valor de momento fletor na viga, chamado de momento crítico (Mcr). Há diversos métodos para o cálculo desse momento. Um deles é estabelecido pela norma brasileira NBR 8800/2008: Projeto e execução de estruturas de Aço de Edifícios – Métodos dos Estados Limites. Esse método permite calcular o momento crítico para a FLT de uma viga em perfil laminado de aba paralela, conhecidos os carregamentos e condições de contorno. A equação (1) resume o cálculo do momento crítico proposto pela norma.

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

em que:
Mcr :momento crítico para FLT;
Cb :coeficiente que depende da distribuição do momento fletor na viga;
E: módulo de elasticidade do aço;
Iy : momento de inércia em relação ao eixo da altura do perfil;
Lb: comprimento destravado da viga;
Cw : coeficiente que depende da geometria do perfil;
J : constante de torção;

O objetivo do presente trabalho é a determinação do momento crítico para a flambagem lateral com torção em vigas de perfis laminados de aço, considerando as tensões residuais, através de um programa computacional que utiliza o Método dos Elementos Finitos. Efetuar-se-á, por fim a comparação dos resultados obtidos por meio da simulação numérica, com aqueles calculadoanaliticamente pelo procedimento proposto pela NBR 8800.

1.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS. ABAQUS

O Método dos Elementos Finitos (MEF), aplicado a estruturas, fornece um processo de análise numérica que permite obter resultados aproximados, com uma precisão aceitável e também satisfatória para a Engenharia, em um número finito de pontos da estrutura que se deseja estudar. Essa é a diferença básica entre os processos numéricos e processos analíticos clássicos, sendo este ultimo restrito à obtenção de resultados exatos, em alguns poucos pontos de interesse da estrutura em análise, porém.

Existem diversos *softwares* comerciais para análise numéricas através do MEF. Um deles, muito difundidos em vários meios científicos e tecnológicos é o Abaqus – versão 6.12 (HIBBITT; KARLSSON;SORENSEN, 2001).

Através do Abaqus, podem ser simulados todas as propriedades interessantes à análise de estruturas:
-Geometria: as formas e feições de uma seção transversal, bem como das respectivas propriedades (momento de inércia, raio de giro, etc.)
- Materiais: propriedades gerais e específicas dos materiais (módulo de elasticidade, comportamentos elásticos e plásticos, entre outros)
- Condições de contorno: tipos de apoio (engaste, vinculo de garfo, etc.), bem como suas respectivas restrições a deslocamentos (deslocamento vertical, rotação em relação a determinado eixo)
-Carregamentos: carga (concentrada ou distribuída) e momento.

Segundo Azevedo (2003), em Engenharia de Estruturas, o MEF tem como objetivo a determinação das tensões e deformações de um sólido, com as características já citadas,

sujeitos às condições de contorno e ações externas (carregamentos) também já mencionados. Podendo ser inseridas todas as propriedades necessárias para o estudo de estruturas em Engenharia Civil, e fornecendo os estados de tensão e deformação dos sólidos, o Abaqus se mostra adequado para o trabalho proposto.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 MODELO NUMÉRICO

Utilizou-se para realização das analise numérica o *software* computacional Abaqus, que tem por base o MEF. O equilíbrio dos corpos é tratado de uma maneira Lagrangiana, isto é,analisando-se cada ponto material do corpo como função de suas coordenadas (x,y,z) no espaço e do tempo. As equações de equilíbrio são obtidas através do princípio do trabalho virtual.

Utilizou-se um modelo de *shell*(casca), disponível no *software*. Optou-se por isso por estar-se tratando de corpos que possuem a dimensão comprimento muito maior que as dimensões espessura e altura.

As vigas simuladas compõem-se do perfil W310x28,5, segundo especificações da GERDAU AÇOMINAS. Os vãos utilizados na simulação foram 3,0 m, 3,5 m, 4,0 m, 4,5 m, 5,0 m, 5,5 m, 6,0 m, e 6,5 m.

O aço estrutural simulado foi o ASTM A572-GRAU 50, o qual é utilizado para fabricação de perfis laminados no Brasil. Este aço possui modulo de elasticidade transversal E igual a 200 GPa, resistência ao escoamento fy igual a 345 MPa e resistência de ruptura fu igual a 450 MPa. Inseriram-se também propriedades de plasticidade do material, conforme Salmon e Jhonson (1990).

Consideraram-se as vigas como sendo biapoiadas, com comprimento destravado, Lb, igual ao vão livre. Simularam-se vínculos de garfo nas extremidades. Esse vínculo, semelhante a um apoio de segundo gênero, além de impedir translações verticais e horizontais, libera o empenamento, porém trava a torção (rotação dos pontos das extremidades em torno do eixo do vão da viga).

Para o carregamento ao qual a viga seria submetida foi escolhida carga concentrada, aplicada no meio do vão, à meia altura da alma. Esse carregamento se caracteriza por ser estabilizador, em relação à FLT.

No que compete à consideração das tensões residuais, foram simulados três modelos (figura 4):

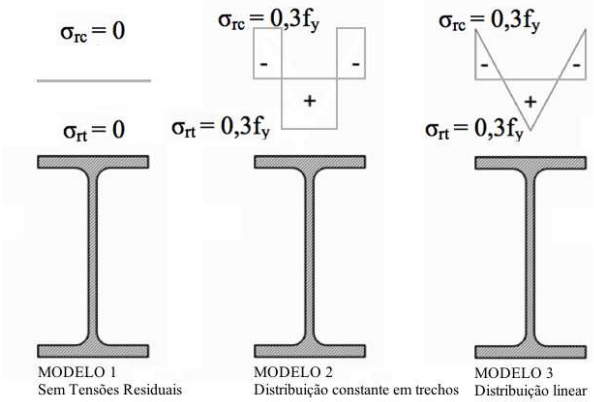

Figura 4. Modelos de distribuição de tensões residuais
Modelo 1: Sem tensões residuais
Modelo 2: Tensão residual com distribuição constante em trecho, somente nas mesas
Modelo 3: Tensão residual com distribuição linear, somente nas mesas.
Fonte: Autor (2014)

A tensão residual de tração é igual a 0,3fy, ou seja, seu valor é 30% do valor da resistência ao escoamento. A tensão residual de compressão é igual ao negativo da tensão residual de tração.

Optou-se por não aplicar tensão residual na alma por estar-se tratando de um perfil com altura relativamente pequena (30,1 cm).

2.2 ANÁLISE NUMÉRICA

Para as vigas do Modelo 1, utilizou-se uma análise linear, com um procedimento/passo de flambagem (Buckle) do *software*Abaqus. Aplicou-se uma carga concentrada unitária, no centro do vão da viga, à meia altura da alma. A análise fornece autovalores, que podem ser interpretados como as cargas críticas de flambagem. Dessa forma, obtiveram-se as cargas críticas, e por seguinte os momentos críticos de flambagem para vigas me perfis metálicos em que não é considerada tensão residual alguma.

Para os Modelos 2 e 3, um procedimento mais refinado, uma análise não linear, teve que ser aplicado. O procedimento de flambagem foi substituído pelo procedimento "StaticRiks", um método incremental, em que podem ser incluídas análises não lineares. Foram na análise inclusas também não linearidades geométricas.

Através da mudança nos arquivos de entrada, foram inseridas no modelo imperfeições iniciais de valor igual aLb/1000, em milímetros, bem como as tensões residuais, conforme o modelo considerado.

A carga concentrada aplicada (cento do vão, meia altura da alma) neste caso foi um valor próximo a aquele obtido como carga de flambagem no Modelo 1. O resultado fornecido pelo método "*StaticRiks*" é um fator de carga. Esse fator deve ser multiplicado pela carga aplicada, para que se obtenha a carga de flambagem, com consideração de tensões residuais. Por fim, obtém-se o momento crítico de flambagem.

2.3 RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA

Os resultados das análises dos modelos adotados (momentos críticos para FLT), utilizando os procedimentos descritos estão resumidos na figura 5, juntamente com o resultado do cálculo pelo método analítico proposto pela NBR 8800 (2008).

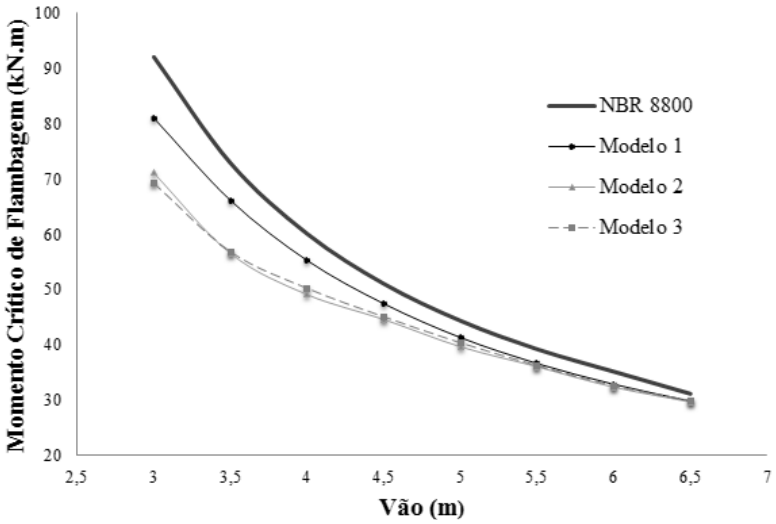

Figura 5. Momento Crítico de Flambagem para os modelos adotados e vãos considerados.
Fonte: Autores (2014).

Os dados detalhados dos momentos críticos, obtidos via análise numérica bem como

cálculo analítico, estão expostos na tabela 1.

Pretendeu-se comparar os resultados do método do cálculo da NBR 8800 (2008) com aqueles obtidos analiticamente, bem como avaliar a influencia das tensões residuais na resistência das vigas a FLT.

Pode-se observar que os três modelos analisados apresentaram uma resistência a FLT menor do que a encontrada pela norma. Nota-se ainda que o Modelo 1, desconsiderando as tensões residuais foi o que mais se aproximou do valor da NBR 8800 (2008). Os modelos 2 e 3 apresentaram uma diferença de resultados pequena entre si, porém encontra-se uma diferença relativamente grande da norma, e também do modelo 1, principalmente ao serem considerados vãos pequenos.

Tabela 1. Valores dos Momentos críticos de flambagem para os modelos adotados e vãos considerados.

Vão(m)	**Momento Crítico (kN.m)**			
	NBR 8800	**Modelo 1**	**Modelo 2**	**Modelo 3**
3,0	92,065	81,0164	71,086	69,246
3,5	72,887	66,151	56,546	56,874
4,0	60,107	55,286	49,123	50,260
4,5	51,072	47,477	44,633	45,126
5,0	44,386	41,356	39,697	40,416
5,5	39,225	36,660	36,0860	36,312
6,0	35,200	32,907	32,391	32,664
6,5	31,192	29,848	29,723	29,980

Fonte: Autores (2014).

Outro ponto a se observar é a convergência de todos os resultados analisados para um mesmo valor quando torna-se grande o vão livre das vigas (aumento no índice de esbeltez). Praticamente coincidem os valores dos momentos críticos para os três modelos analisados, e esses valores também tendem a se igualar com aqueles fornecidos pela NBR 8800 (2008).

3 CONCLUSÕES

A consideração das tensões residuais, ao ser analisada a resistência de vigas à flambagem lateral com torção, mostrou-se um fator importante, principalmente quando foram submetidas à avaliação da resistência vigas com comprimentos (vãos) menores. Essa importância é devido a diminuição da resistência da viga à FLT, ao serem consideradas as tensões residuais.

Além disso, as distribuições de tensões residuais adotadas mostraram pouca discrepância entre si, com resultados uniformes.

Por fim, ressalta-se que em vigas com vãos maiores, e portanto, maiores índices de esbeltez, a influência das tensões residuais no momento resistente à FLT tende a diminuir, e até anular-se a partir de um certo ponto.

Ressalta-se que novas análises com outras vigas e tipos de carregamentos serão realizadas para validar os resultados inicialmente encontrados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8800: Projeto e execução de estruturas de Aço de Edifícios – Métodos dos Estados Limites. Rio de Janeiro, 2008.

AZEVEDO, Álvaro FM. Método dos elementos finitos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, v. 1, 2003.

BEZERRA, E. M. Determinação do Momento Fletor Resistente à Flambagem Lateral com Torção de Vigas de Aço Casteladas. 2011. Dissertação (MestradoemEngenharia de Estruturas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
BJORHOVDE, R., BROZZETTI, J., ALPSTEN, G. A. AND TALL, L. Residual stresses in thick welded plates. *WeldingJournal (AWS)*, v.51, n. 51, 1972.
GOMES, C. A. B. Resistência à compressão de perfis H laminados de abas paralelas.
Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, 2006.
HIBBITT; KARLSSON; SORENSEN..ABAQUS 6.12 Standard – User's manual, EUA, 2011.
PINHO, Fernando Ottoboni. QUANDO CONSTRUIR EM AÇO?.Revista Engenharia, edição, v. 593, 2009.
SALMON, C.G.; JOHNSON, J.E. (1990). Steel Structures, Design and Behaviou*r*, Ed. Harper &Row, New York.
SILVA, R. G. L. Análise Inelástica Avançada de Pórticos Planos de Aço Considerando as Influências do Cisalhamento e de Ligações Semirrígidas. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.