

Modelagem Numérica de Vigas de Aço Constituídas por Perfis Formados à Frio

Gregorio Sandro Vieira¹, Jerfson Moura Lima²

¹*Dept. of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia
Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica - Bloco 1Y, CEP: 38400-902, MG/Uberlândia, Brasil
gregorio.vieira@ufu.br*

²*Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Brasília
Prédio SG-12, 1º andar, Campus Darcy Ribeiro, CEP: 70910-900, DF/Brasília, Brasil
jerfsonlm@gmail.com*

Resumo Os sistemas estruturais que utilizam perfis de aço formados a frio têm aumentado sobremaneira sua parcela no Mercado. Apesar disto, os estudos dos comportamentos destes perfis quando submetidos aos mais diferentes tipos de carregamentos, não tem acompanhado na mesma proporção esta utilização. Neste trabalho foi apresentado um estudo numérico feito em vigas compostas por dois perfis metálicos formados a frio do tipo “U” simples unidos por suas almas formando uma seção do tipo “I”. O objetivo principal deste estudo foi desenvolver um modelo numérico tridimensional e não-linear capaz de simular o comportamento de vigas constituídas por perfis formados a frio. Para o desenvolvimento do modelo numérico foi utilizado o programa computacional ABAQUS, baseado no Método dos Elementos Finitos. O modelo numérico foi calibrado e validado com os resultados experimentais da literatura. Os resultados numéricos obtidos foram concordantes com os resultados experimentais.

Palavras chave: Vigas em aço, Modelagem numérica, Método dos Elementos Finitos

1 Introdução

Já faz alguns anos que os Perfis Formados a Frio (PFF) passaram a ter uma maior relevância nas construções de edifícios no Brasil. Uma das provas disto é que desde o início deste século a norma brasileira de dimensionamento destes tipos de perfis, NBR 14762 [1], já foi revisada duas vezes, o que para os padrões nacionais demonstra o zelo pelo bom dimensionamento deste tipo de estrutura. Hoje pode-se afirmar que a NBR 14762 é uma das mais completas englobando o consagrado Método da Largura Efetiva (MLE) e, além deste, o Método da Resistência Direta (MRD) e o Método da Seção Efetiva (MSE), este último desenvolvido por Batista [2].

Além de ser economicamente atrativo a utilização de perfis de chapa fina, outra das grandes vantagens em se utilizar os perfis formados a frio é a grande possibilidade de seções que se pode obter, tanto a partir da conformação a frio de chapas, como a partir da composição de seções através de soldagem ou parafusamento (Figura 1). Desta maneira se faz importante conhecer o comportamento de cada tipo de seção quando esta é solicitada aos mais diferentes tipos e ações.

Um dos tipos de seção que é utilizada com mais frequência é o da seção “I” formado pela união de perfis U e Ue unidos de costas por suas almas (Figura 1 letras ‘I’, ‘m’ e ‘n’). Por esta razão muitos pesquisadores tem estudado este tipo de seção no últimos anos buscando compreender os pontos de tensões críticas a diferentes esforços, resistência à flexão e capacidade de rotação, instabilidades locais, utilização de aços de alto desempenho dentre outros. ([4],[5],[6],[7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]).

Uma das formas de se economizar recursos e tempo é procurar simular numericamente o comportamento dos elementos estruturais. Neste contexto é muito importante uma simulação adequada, o que perfeitamente pode ser verificado através da comparação com dados de ensaios experimentais, conforme foi desenvolvido neste trabalho.

Contudo, este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo numérico tridimensional não-linear em

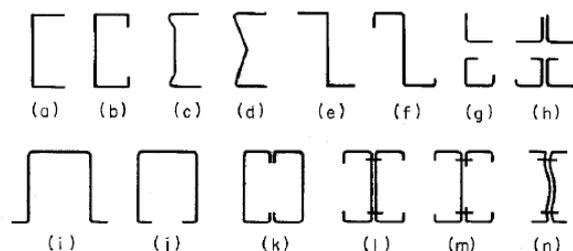


Figure 1. Tipos de seções - Adaptado de Yu [3]

elementos finitos capaz de simular o comportamento de vigas constituída por perfis formados a frio. Para isso, foi utilizado o programa computacional ABAQUS [14] baseado no método dos elementos finitos. O modelo desenvolvido foi validado com os resultados experimentais de Vieira [15].

2 Desenvolvimento do modelo numérico

O modelo apresenta como características uma geometria tridimensional além de considerar todas as fontes de não-linearidade (física e geométrica). Sua geometria foi baseada no ensaio experimental V1A de Vieira [15]. Tal viga V1A apresenta comprimento total de 3000 m. Contudo, os apoios foram instalados à 75 mm das extremidades, constituindo assim um vão livre de 2850 mm. A seção transversal é do tipo I, também chamada de seção duplo T, constituída pela união de dois perfis formado à frio do tipo U simples unidos por filetes de solda nas almas. A geometria do modelo pode ser observada em detalhes na Figura 2. O ensaio de flexão do modelo V1A foi realizado a partir da aplicação de duas cargas pontuais localizadas a 950 mm das extremidades da viga (Figura 2). Nos pontos de aplicação de carga e nos apoios foram aplicados enrijecedores. Deflectômetros e extensômetros foram instalados no meio do vão do modelo para obtenção dos deslocamento e deformações, respectivamente.

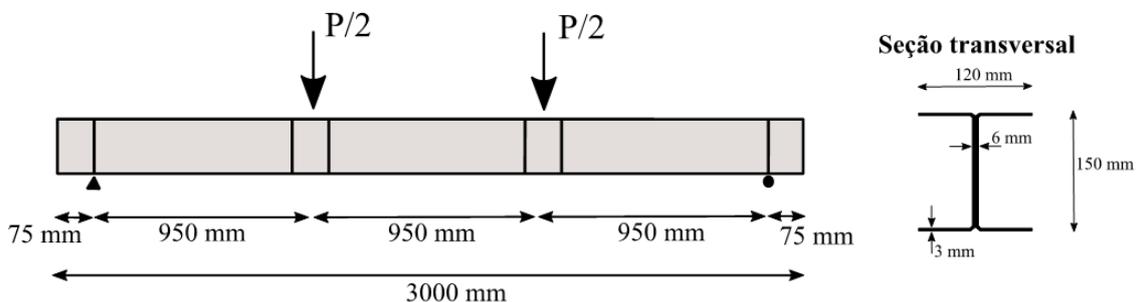


Figure 2. Geometria do modelo

Além do ensaio de flexão, Vieira [15] realizou ensaios de caracterização do aço do modelo V1A extraindo os resultados de tensão de escoamento (f_y), tensão última (f_u) e deformação última (ϵ_u) (Tabela 1).

Table 1. Propriedades do aço do modelo V1A ensaiado por Vieira [15]

f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_u (%)
345,98	463,93	13,75

A malha de elementos finitos definida para o modelo numérico pode ser observada na Figura 3, assim como os pontos de aplicação do carregamento (P) e regiões onde foram aplicadas as condições de contorno. Em todo o modelo foram aplicados dois tipos de elementos finitos: SC8R (Elemento de casca quadrilateral linear com 8 nós e integração reduzida) para a viga e C3D8R (Elemento sólido quadrilateral linear com 8 nós e integração reduzida) para os enrijecedores. O elemento SC8R contém graus de liberdade rotacionais e translacionais, apropriados para modelagem de chapas finas, caso em questão. Já no caso do elemento C3D8R, este contém graus

de liberdade apenas translacionais e se mostrou adequado para a modelagem dos enrijecedores, além de reduzir o custo computacional. Para a definição do tamanho do elemento foi realizado um estudo de convergência de malha empregando-se três tamanhos de elementos no modelo: 20 mm, 15 mm e 10 mm. Os melhores resultados foram obtidos com elementos de 10 mm, sendo este o tamanho de elemento definitivo aplicado no modelo numérico. A malha da região da viga ligada aos enrijecedores sofreu um refinamento, para melhor transmissão dos esforços. Para simular a solda de conexão dos perfis que constituem a seção transversal do modelo foi utilizado a restrição tie. A restrição tie unifica os deslocamentos dos nós das superfícies envolvidas, desta maneira, o deslizamento entre as superfícies é eliminado. A conexão do enrijecedor-viga também foi modelada com a restrição tie. Em uma das extremidades foi restrito os deslocamentos nas direções Y e Z (Apoio de 2ª gênero), e na extremidade oposta foi restrito os deslocamentos apenas na direção Y (Apoio de 1ª gênero). Para a análise do modelo foi utilizado o método de análise dinâmico explícito, presente no programa ABAQUS com a nomenclatura *Explicit Dinamic*. Apesar de ser um método de análise dinâmico, pode ser aplicado em análises estáticas, desde que os efeitos de inércia sejam controlados com a lenta aplicação de carga [14]. A análise foi realizada adotando controle de carga.

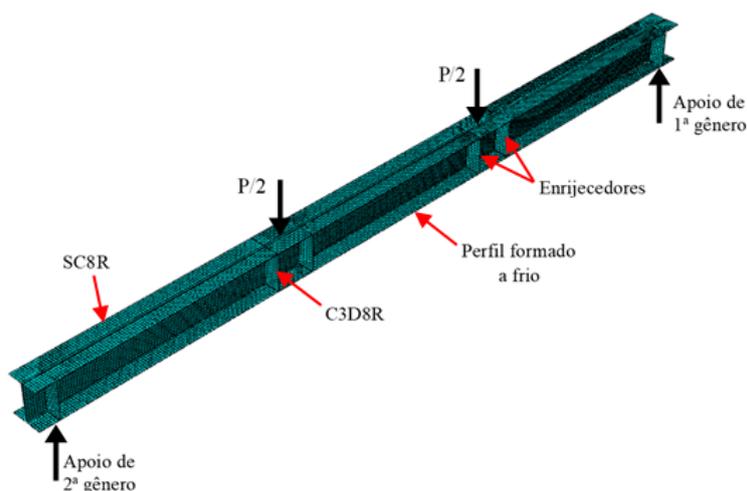


Figure 3. Malha de elementos finitos, condições de contorno e carregamento (P)

Para a modelagem do aço, um modelo constitutivo elástico-plástico foi aplicado. Este modelo constitutivo está presente na biblioteca de materiais do programa ABAQUS com a denominação *PLASTIC*. O modelo *PLASTIC* adota o critério de escoamento de Von Mises, com regra de fluxo associativa, ideal para a modelagem de materiais dúcteis como o aço. O comportamento uniaxial implementado para o aço que constitui a viga, consistiu da relação tensão-deformação tri-linear (Figura 4). O aço do enrijecedor foi modelado apenas com propriedades elásticas, devido a sua pequena importância no comportamento do modelo. Tem-se como parâmetro o módulo de elasticidade do material (E_s), a tensão de escoamento (σ_y) e sua respectiva deformação (ε_y) além da tensão última (σ_u) e a respectiva deformação (ε_u). Para este trabalho adotou-se o módulo de elasticidade (E_s) de 210 GPa e coeficiente de Poisson de 0,3, tanto para o aço da viga, quanto para o aço do enrijecedor.

3 Validação do Modelo Numérico

A validação do modelo numérico foi realizada com os resultados experimentais do modelo V1A de Vieira [15]. Para isso, foram verificadas as curvas carga x deslocamento no meio do vão, carga x deformação das mesas superior e inferior da viga no meio do vão, carga última e modos de ruptura. A curva carga x deslocamento obtida pelo ensaio experimental foi comparada com a curva obtida pelo modelo numérico proposto (Figura 5). Observa-se uma boa concordância entre a curva experimental e numérica. Com relação a carga última, o valor de carga última experimental e do modelo numéricos foram de 47,23 kN e 47,59 kN, respectivamente. Nota-se uma proximidade entre os resultados, com uma diferença de apenas 0,76% entre os valores de carga última numérica e experimental.

Também foram avaliadas as curvas carga x deformação obtidas experimentalmente e numericamente (Figura 6). ES3 e EIS3 representam as deformações no meio do vão da viga nas mesas superior e inferior, respectivamente. A rigidez da curva numérica de deformação na mesa superior apresenta uma maior rigidez quando comparada a curva experimental, esse fato provavelmente ocorreu pela simplificação no modelo numérico de realizar uma

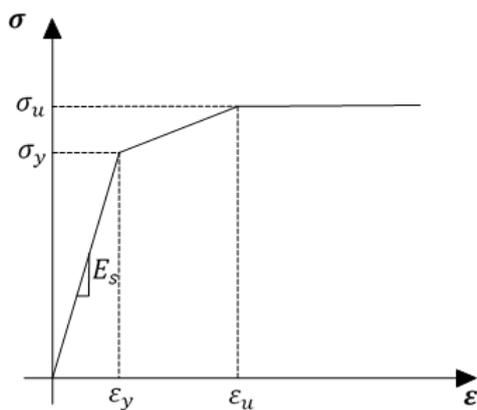


Figure 4. Relação tensão-deformação tri-linear

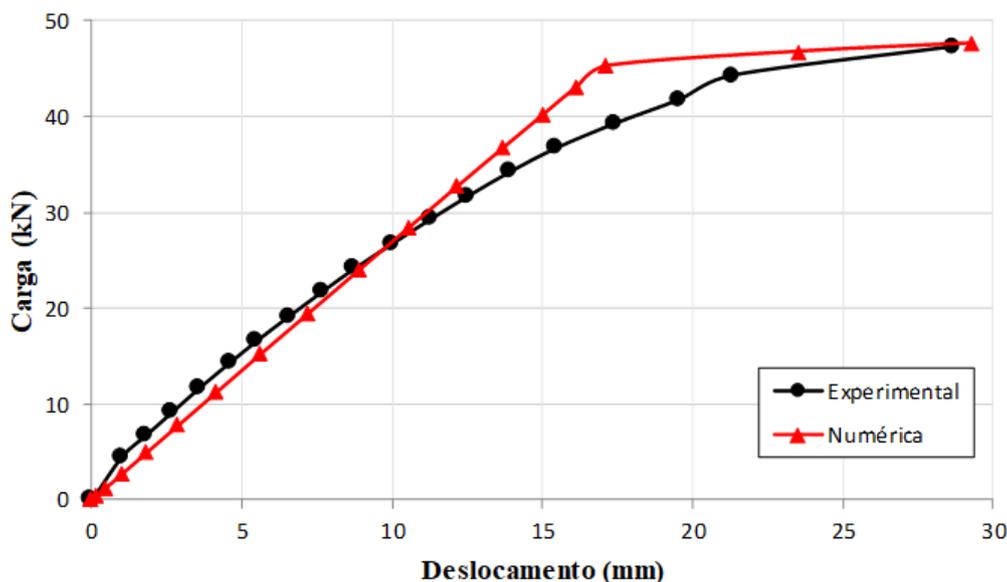


Figure 5. Curvas carga x deslocamento no meio do vão

ligação contínua entre os perfis que constituem a viga, provocando uma maior rigidez nas mesas sobre compressão. De modo geral, pode-se dizer que o modelo numérico simulou adequadamente a evolução das deformações nas mesas da viga.

Vieira [15] observou em seu ensaio experimental que a viga V1A apresentou os seguintes modos de ruptura: flambagem lateral por torção (FLT) e flambagem local da mesa (FLM). Ao se analisar a deformada e distribuição de tensões (Pa) do modelo numérico no momento da carga última nota-se que os modos de ruptura também foram caracterizados pela FLT e FLM (Figura 8). Contudo, esses resultados validam o modelo numérico desenvolvido e mostram que o mesmo é capaz de simular numericamente o comportamento de vigas de aço fabricadas com perfis formadas a frio.

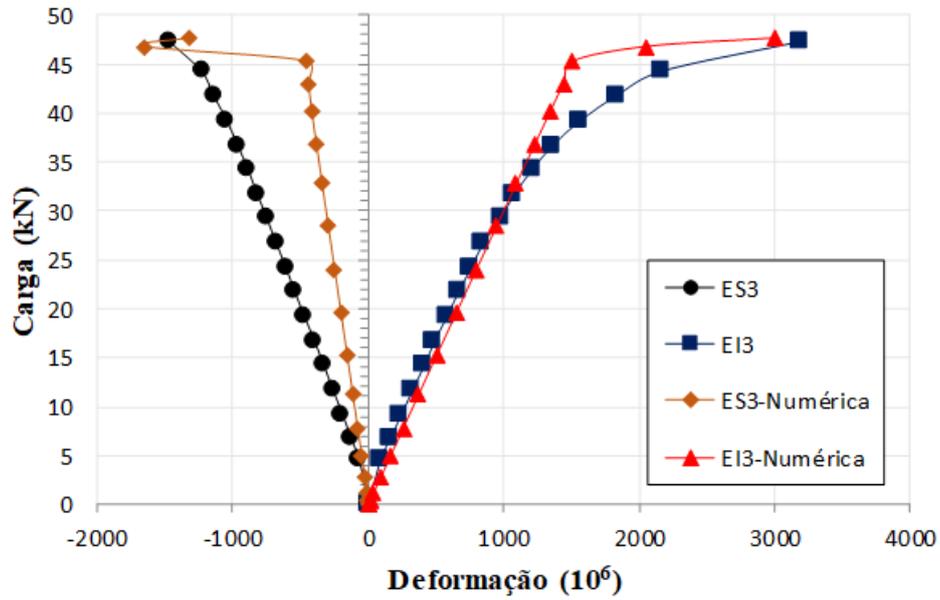


Figure 6. Curvas carga x deformação nas mesas do modelo

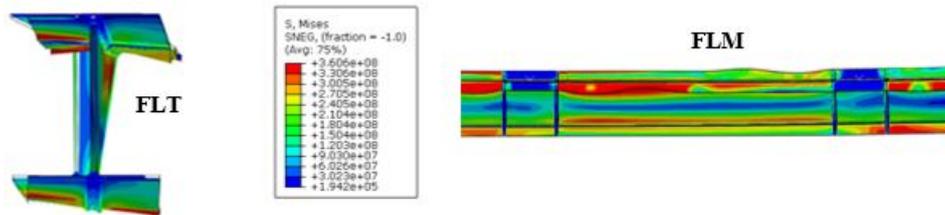


Figure 7. Modos de ruptura do modelo numérico



Figure 8. Modos de ruptura do modelo experimental

4 Conclusões

Neste estudo foi desenvolvido um eficiente modelo numérico tridimensional não-linear via método dos elementos finitos para simulação do comportamento de vigas de aço fabricadas com perfis formados à frio. As não-linearidades físicas e geométricas são levadas em consideração pelo modelo. O modelo numérico foi validado com o ensaio experimental de Vieira [15]. Os resultados numéricos foram concordantes com os ensaios experimentais. Com o modelo numérico desenvolvido, novos estudos podem ser realizados sem a necessidade de investimentos para a execução de ensaios experimentais. Contudo, este trabalho fornece uma ferramenta que possibilita o desenvolvimento de pesquisas que objetivam buscar um melhor entendimento do comportamento estrutural de vigas de aço com perfil formado à frio, sistema estrutural esse que tem sido muito aplicado no setor da construção civil.

Agradecimentos. Os autores agradecem o suporte laboratorial do extinto Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (CMEC-UFG) e a esta universidade.

Declaração de autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material aqui incluído como parte do presente trabalho é propriedade (e autoria) dos autores, ou tem a permissão dos proprietários a serem incluídos aqui.

References

- [1] ABNT, 2010. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.
- [2] de Miranda Batista, E., 2010. Effective section method: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local–global buckling interaction. *Thin-Walled Structures*, vol. 48, pp. 345–356.
- [3] Yu, W.-W., 3 ed. *COLD-FORMED STEEL DESIGN*. John Wiley and Sons, Inc. New Yourk, USA, 2000.
- [4] Sventikov, A. A. & Kuznetsov, D. N., 2020. Numerical study of the effect of the wall thickness of a steel i-beam on the form of loss of local stability. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 753.
- [5] Liu, X., Wang, Y., Ban, H., Liu, M., Veljkovic, M., & Bijlaard, F. S. K., 2020. Flexural strength and rotation capacity of welded i-section steel beams with longitudinally profiled flanges. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 173, pp. 15.
- [6] Kang, S.-B., Yang, B., Zhang, Y., Elchalakani, M., & Xiong, G., 2020. Global buckling of laterally-unrestrained q460gj beams with singly symmetric i-sections. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 145, pp. 341–351.
- [7] Yanga, B., Kanga, S.-B., Xionga, G., Nie, S., Hu, Y., Wang, S., Baia, J., & Dai, G., 2017. Experimental and numerical study on lateral-torsional buckling of singly symmetric q460gj steel i-shaped beams. *Thin-Walled Structures*, vol. 113, pp. 205–216.
- [8] Batista, A. M. & Muzeau, J.-P., 2001. Formulação analítica do comportamento elastoplástico de vigas de aço isostáticas planas em flexão simples. *III Encontro Nacional de Construção Metálica e Mista*, vol. , pp. 533–542.
- [9] Batista, A. M. & Muzeau, J.-P., 2002. Analytical model for the elastic-plastic analysis of simply supported i-shaped beams in simple bending. *3rd European Conference on Steel Structures-Eurosteel*, vol. , pp. 129–138.
- [10] Baptista, A. M., 2004. Formulação analítica do comportamento de vigas de aço em regime elastoplástico sujeitas a flexão simples. *MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA*, vol. .
- [11] Laím, L. & Rodrigues, J. P. C., 2011. Análise numérica do comportamento estrutural de vigas em aço enformado a frio. *VIII Congresso de Construção Metálica e Mista*, vol. .
- [12] Laím, L., Rodrigues, J. P. C., & Silva, L. S., 2013. Comportamento estrutural de vigas em aço enformado a frio em situação de incêndio - análise experimental. *2º CILASCI – Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança contra Incêndio*, vol. .
- [13] Tankova, T., Martins, J. P., da Silva, L. S., Marques, L., Craveiro, H. D., & Santiago, A., 2018. Experimental lateral-torsional buckling behaviour of web tapered i-section steel beams. *Engineering Structures*, vol. 168, pp. 355–370.
- [14] ABAQUS, v 6.14-4. *User's Manual*. Dessault Systèmes Simulia Corp. Providence, RI, USA, 2014.
- [15] Vieira, G. S., 2010. *Análise experimental de vigas de seção "I" compostas de perfis formados a frio submetidas à flexão simples*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, Brasil.