

MODELO NUMÉRICO PARA ANÁLISE DA CAPACIDADE RESISTENTE ÚLTIMA DE VIGAS HÍBRIDAS SUBMETIDAS À FLEXÃO

Caroline Martins Calisto

Elvys Dias Reis

Cristiane Caroline Campos Lopes

Ana Lydia Reis de Castro e Silva

Hermes Carvalho

Rodrigo Barreto Caldas

carolinemartinscalisto@yahoo.com.br

elvysreis@yahoo.com.br

cristianecarolinelopes@yahoo.com.br

analydiarcs@gmail.com

hermes@dees.ufmg.br

caldas@dees.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais

Avenida Antônio Carlos, 6627 – Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Estrutural, 31270-901, Belo Horizonte - MG, Brasil

Resumo. Este artigo apresenta um estudo do comportamento de vigas híbridas de aço com seção transversal do tipo I submetidas à flexão. Para isso, foram desenvolvidos modelos numéricos no *software* Abaqus. Nos modelos, desconsidera-se a flambagem lateral com torção, uma vez que a viga será contida lateralmente, de maneira que somente as instabilidades locais sejam avaliadas. As análises foram divididas em duas etapas, a saber: primeiramente, realizou-se a análise de flambagem elástica para obter as cargas críticas de flambagem e os modos de flambagem das vigas; posteriormente, efetuou-se a análise da capacidade resistente última das vigas considerando tensões residuais e imperfeições iniciais. Os resultados obtidos a partir do modelo numérico desenvolvido foram satisfatórios e, como esperado, mostraram que as vigas híbridas resistem a um esforço maior de momento fletor quando comparadas com suas vigas homogêneas correspondentes.

Palavras-chave: Vigas híbridas de aço, Instabilidade local, Seção transversal do tipo I, Análise não linear.

Abstract. This paper presents a study of I-shaped hybrid steel girders behavior subjected to bending. For this purpose, numerical models were developed in the Abaqus software. In these models, it is not considered the lateral torsional buckling since the beam will be restrained against out-of-plane translation, so that only the local instabilities will be evaluated. The analyses were divided into two stages, namely: first, it was performed a linearized eigenvalue buckling analysis to obtain the critical buckling loads and the buckling modes; then, it was performed an analysis of the ultimate resistant capacity considering residual stresses and initial imperfections. The outcomes obtained from the numerical models developed were satisfactory and, as expected, showed that the hybrid steel girders resist a greater bending when compared with their equivalent homogeneous beams.

Keywords: Hybrid steel girders, Local instabilities, I-section girders, Nonlinear analysis.

1 Introdução

De acordo com o Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) [1], mesmo com a crise econômica no país, as vendas internas de aço cresceram 2,3% de 2016 para 2017, atingindo 16,9 milhões de toneladas em 2017. Em contrapartida, segundo os dados preliminares do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) [2], houve uma redução de 6,4% no ano de 2017 em relação a 2016, totalizando 53,8 milhões de toneladas em vendas internas de cimento no ano de 2017. Dessa maneira, observa-se que o uso do aço ainda é bem inferior ao uso do concreto nas construções. Porém, o aço vem conquistando espaço no mercado brasileiro.

Levando esses dados em consideração, este artigo aborda o estudo de um modelo numérico para vigas híbridas de aço com seção transversal do tipo I submetidas à flexão. Nesse tipo de viga, o perfil I é soldado e possui diferentes tipos de aço nas mesas e na alma, sendo que, na maioria dos casos, as mesas possuem um aço de maior resistência. Segundo Beg *et al.* [3], as vigas híbridas são consideradas como uma solução econômica, pois o material mais resistente (aço de alta resistência) e, consequentemente, mais caro somente é utilizado nos locais mais solicitados do perfil.

As vantagens da utilização dos aços de alta resistência são cada vez mais notáveis. Segundo Gogou [4], ao comparar projetos híbridos e seus projetos homogêneos equivalentes para a ponte ‘Schellingwouderbrug’, localizada nos Países Baixos, verificou-se que os projetos híbridos resultaram em uma economia de peso de até 65% em alguns casos. Ainda de acordo com [4], o preço elevado dos aços de alta resistência tem como consequência um maior custo para projetos híbridos, em torno de 4%. Porém, a redução de peso nesses projetos é bastante significativa, o que acarreta uma redução no custo total, até 6% menor quando se inclui a fabricação, transporte, montagem e manutenção.

Shokouhian [5] estudou a ductilidade e a capacidade resistente última de vigas híbridas fletidas. Inicialmente, o autor realizou seis ensaios experimentais, os quais abordaram três vigas convencionais e seus modelos híbridos correspondentes contidos lateralmente, além de realizar os seis ensaios numéricos dessas vigas no *software* Ansys.

Neste contexto, o objetivo deste artigo é reproduzir os modelos numéricos obtidos por [5] no *software* Abaqus [6], visando a análise da capacidade resistente última de vigas híbridas contidas lateralmente. Neste estudo, assumiu-se que as mesas são constituídas de um aço com maior resistência do que o aço da alma do perfil, assim como no estudo de [5].

2 Fundamentação Teórica

O estudo se baseia em vigas biapoiadas com perfil I duplamente simétrico fletido em relação ao eixo de maior inércia (eixo x). Como não haverá furos, atuação de forças localizadas ou existência de aberturas para passagem de dutos nas vigas estudadas, elas serão verificadas aos estados-limites últimos relacionados ao momento fletor e à força cortante. Segundo Fakury *et al.* [7], quando há a atuação do momento fletor, o colapso pode ocorrer por plastificação total da seção transversal, por flambagem da viga (flambagem lateral com torção) ou por flambagem local dos elementos parcial ou totalmente comprimidos da seção transversal.

Ao se estudar as barras, percebe-se que elas apresentam uma curvatura inicial. Essa imperfeição é definida por um deslocamento transversal pequeno em sua seção transversal. À medida que o momento fletor se torna maior em relação ao eixo de maior inércia, esse deslocamento e a torção aumentam, até o momento no qual a barra não resiste mais à solicitação. Nesse ponto é definido o estado-limite último, denominado instabilidade da barra.

Ainda conforme [7], ao atingir o momento fletor de colapso, a viga pode apresentar translação lateral e torção. Esse colapso caracteriza o estado-limite último chamado flambagem lateral com torção (FLT).

Para impedir que a FLT aconteça, é necessário conter a seção lateralmente. Isso é explicado pelo fato da flambagem ser constituída de dois movimentos que se manifestam em conjunto, a translação e a rotação, sendo que o impedimento de um dos dois é suficiente para que não ocorra esse tipo de flambagem [7].

Outro estado-limite último é a instabilidade local dos elementos. Fakury *et al.* [7] afirmam que, no caso do perfil I fletido em relação ao eixo de maior inércia (eixo x), avalia-se a possibilidade de ocorrer a flambagem local da mesa comprimida (FLM) e a flambagem local da alma que fica parcialmente comprimida (FLA), como pode ser observado na Fig. 1:

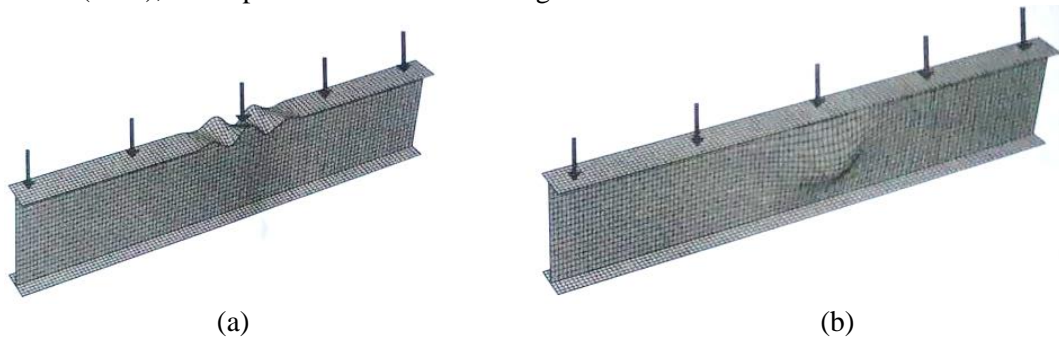


Figura 1. (a) flambagem local da mesa comprimida e (b) flambagem local da alma (Fakury *et al.* [7]).

De acordo com a ABNT NBR 8800:2008 [8], para perfis I com dois eixos de simetria, o momento fletor resistente de cálculo (M_{Rd}) para os casos em que a FLM e a FLA são estados-limites últimos aplicáveis, tem-se as Eq. (1):

- para $\lambda \leq \lambda_p$:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (1a)$$

- para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \quad (1b)$$

- para $\lambda > \lambda_r$:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \quad (1c)$$

Sendo que: M_{cr} é o momento fletor de flambagem elástica, M_{pl} é o momento fletor de plastificação da seção transversal, M_r é o momento fletor correspondente ao início do escoamento, γ_{a1} é o coeficiente de ponderação da resistência, λ é o parâmetro de esbelteza dos elementos componentes da seção transversal, λ_p é o parâmetro de esbelteza correspondente à plastificação e λ_r é o parâmetro de esbelteza correspondente ao início do escoamento.

De acordo com Shokouhian [5], na sua forma geral, o momento fletor de plastificação da seção transversal (M_{pl}) também pode ser utilizado quando há diferentes tipos de aços nas mesas e na alma perfil. Dessa maneira, o momento fletor de plastificação é definido a partir da Eq. (2), que leva em consideração as dimensões, medidas na linha do esqueleto, da Fig. 2.

$$M_{pl} = 2t_f b_f \left(\frac{h + t_f}{2} \right) f_{yf} + h t_w \left(\frac{h}{4} \right) f_{yw} \quad (2)$$

Sendo que: t_w é a espessura da alma, t_f é a espessura da mesa, b_f é a largura da mesa, h é a altura da viga considerada na linha do esqueleto, f_{yf} é a resistência ao escoamento do aço da mesa e f_{yw} é a resistência ao escoamento do aço da alma.

Com o auxílio da Tabela G.1 do Anexo G de [8] é possível obter os termos acima mencionados, necessários para a determinação do momento fletor resistente de cálculo.

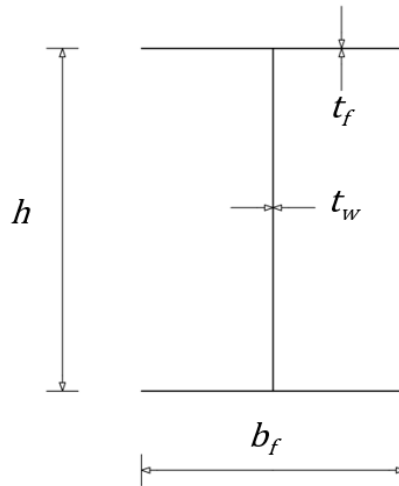


Figura 2. Seção transversal considerada para as análises.

3 Modelo numérico

O estudo baseou-se no trabalho de Shokouhian [5] e as vigas foram modeladas utilizando o *software* Abaqus [6], o qual foi desenvolvido pela HKS Inc de Rhode Island e no momento é comercializado pela Dessault Systemes S.A. Esse *software* realiza a análise por elementos finitos, o que o torna uma boa ferramenta para o emprego em problemas de instabilidade estrutural.

No Abaqus [6], primeiramente, realizou-se a análise de flambagem elástica para obter as cargas críticas de flambagem e uma aproximação dos modos de flambagem das vigas. A seguir, foi realizada uma análise da capacidade resistente última de acordo com a aproximação do primeiro modo de flambagem, considerando a introdução das tensões residuais e das imperfeições iniciais, tomadas como 10% da espessura da mesa.

Seis vigas biapoiadas de seção transversal do tipo I submetidas a duas forças localizadas foram analisadas, sendo três convencionais (C1, C2 e C3) e três híbridas (H1, H2 e H3). As forças se localizam nos terços do comprimento da viga, o que produz um momento constante na região central da mesma. Considerando que f_{yf} é a resistência ao escoamento do aço da mesa e f_{yw} é a resistência ao escoamento do aço da alma, as dimensões (medidas na linha do esqueleto) das seis vigas e as resistências ao escoamento das mesas e da alma estão apresentadas na Tab. 1.

A distância entre os suportes que garantem a condição de viga biapoiada é de 3 m, sendo que há um comprimento adicional correspondente a $L/15$ em ambos os lados, que é modelado com as mesmas dimensões da viga. Existem também quatro enrijecedores verticais de cada lado da alma, sendo que dois deles estão localizados nas reações de apoio e os outros dois nos pontos de aplicação das forças concentradas, com objetivo de impedir a ocorrência da instabilidade devido à compressão localizada na alma, conforme pode ser observado na Fig. 3.

Tabela 1. Dimensões das vigas consideradas para análise.

Modelo	h (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	f_{yf} (N/mm ²)	f_{yw} (N/mm ²)
C1	372	8	168	12	345	345
C2	372	8	260	12	345	345
C3	612	8	168	12	345	345
H1	372	8	168	12	460	345
H2	372	8	260	12	460	345
H3	612	8	168	12	460	345

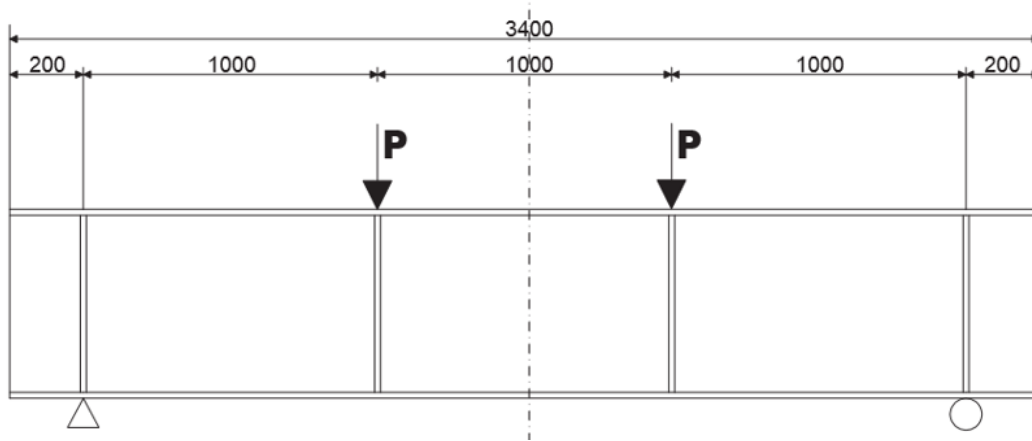


Figura 3. Especificação geométrica do modelo numérico (Shokouhian [5]).

Os enrijecedores são contínuos ao longo de toda altura da alma e possuem espessura igual a 14 mm em todas as análises, de forma que a sua largura e altura variam de acordo com a largura da mesa e a altura da alma de cada viga. É importante ressaltar que a ligação entre o perfil I e os enrijecedores foi realizada pela restrição do tipo *tie*, conforme a Fig.4. Nesse tipo de restrição duas superfícies são conectadas de maneira que o movimento relativo entre elas é impedido.

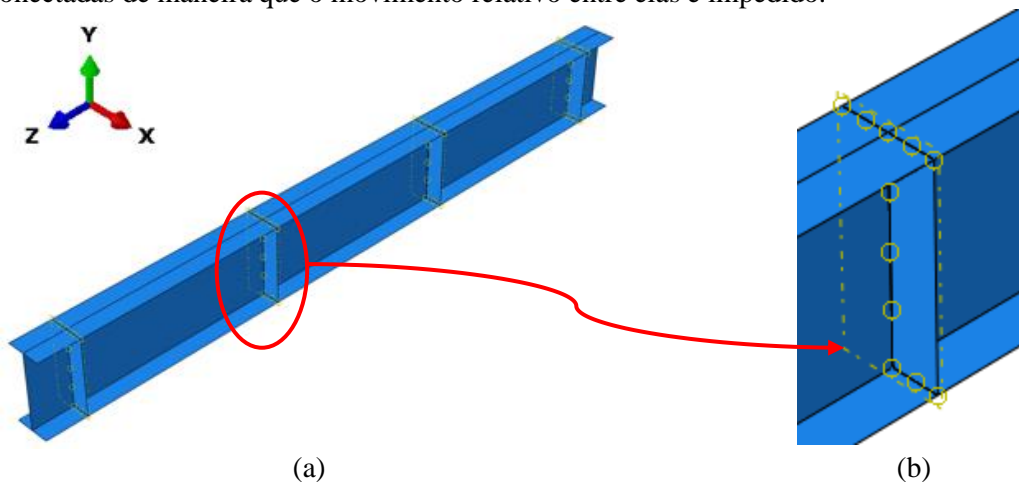


Figura 4. Ligação entre o perfil I e os enrijecedores: (a) restrição do tipo *tie* aplicada no perfil I e em todos os enrijecedores e (b) detalhes da restrição do tipo *tie*.

Sabe-se que a utilização de uma malha mais refinada de elementos finitos geralmente proporciona uma melhor aproximação do modelo numérico quando comparada a uma malha mais grosseira. Assim, adotou-se uma malha com tamanho de elemento aproximadamente igual a 6 mm no perfil I e 4 mm nos enrijecedores, como representado a Fig. 5. Além disso, optou-se pelo elemento S4R, o qual possui casca de curvatura dupla, quatro nós e integração reduzida.

O sistema de eixos é definido de maneira que o eixo z corresponde à direção longitudinal da viga, enquanto os eixos x e y representam o maior e menor eixo de inércia, respectivamente. Para garantir o comportamento esperado foram restringidas as translações nos eixos x, y e z e as rotações nos eixos y e z na junção entre mesa inferior e alma do perfil nas duas extremidades da viga. A fim de concentrar as influências das instabilidades locais no comportamento da viga, os modelos numéricos também foram restringidos à translação fora do plano da alma. Adotou-se a subdivisão das duas forças concentradas em forças pontuais ao longo da largura da mesa superior, sendo que essas forças pontuais foram aplicadas nos nós gerados pela malha de elementos finitos definida anteriormente, como mostra a Fig. 6.

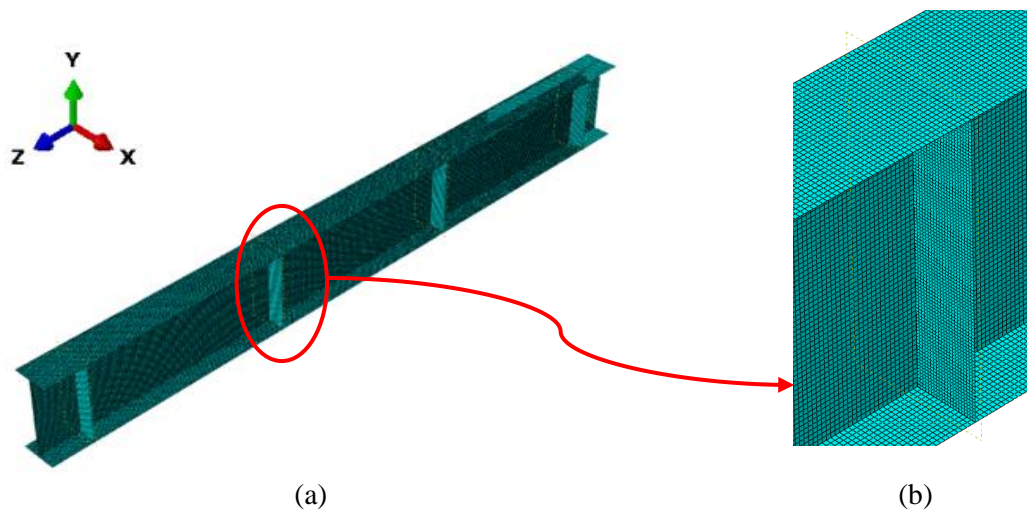


Figura 5. Malhas de elementos finitos adotadas: (a) malha com tamanho de elemento aproximadamente igual a 6 mm no perfil I e 4 mm nos enrijecedores e (b) detalhes da malha.

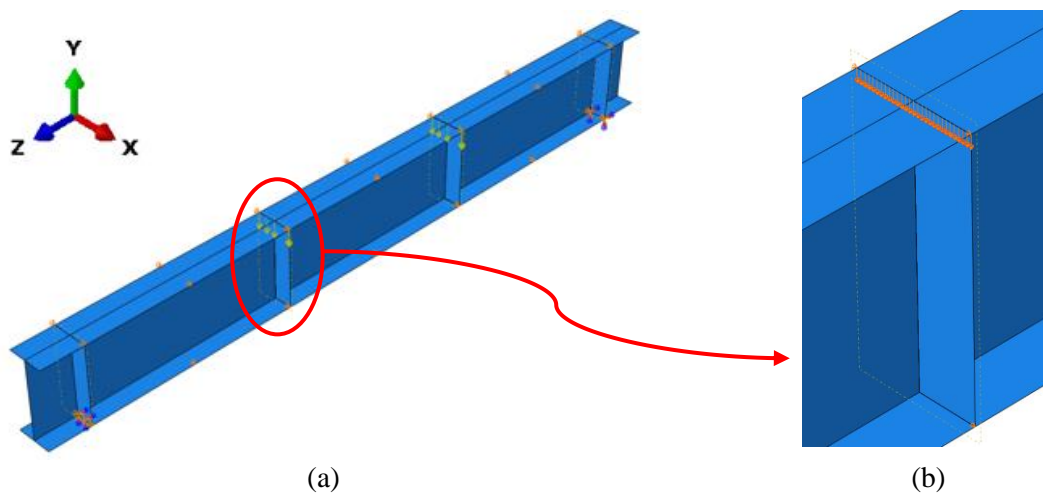


Figura 6. Condições de contorno e carregamento adotados: (a) restrição dos três deslocamentos e duas rotações, restrição lateral e forças pontuais presente no modelo e (b) detalhes das forças localizadas aplicadas na mesa superior

Adotou-se o comportamento elasto-plástico dos aços estruturais, de acordo com [5], conforme apresentado na Fig. 7. De maneira que: f_y é a resistência ao escoamento do aço, f_u é a resistência à ruptura do aço à tração, ε_y é a deformação normal específica correspondente à tensão limite da região elástica, ε_{st} é a deformação normal específica correspondente à tensão limite da região de plastificação e ε_u é a deformação de ruptura. Para o aço com resistência ao escoamento (f_y) igual a 345 N/mm², tem-se: $f_u/f_y = 1,36$, $\varepsilon_{st}/\varepsilon_y = 14,93$ e $\varepsilon_u/\varepsilon_y = 119,42$. Já para o aço com resistência ao escoamento (f_y) igual a 460 N/mm², tem-se: $f_u/f_y = 1,20$, $\varepsilon_{st}/\varepsilon_y = 8,96$ e $\varepsilon_u/\varepsilon_y = 76,13$. Adotou-se módulo de elasticidade longitudinal (E) igual a 200 GPa e coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,3.

Com relação às tensões residuais, adotou-se a distribuição das tensões residuais proposta por Ban *et al.* [9] e utilizada por [5], conforme Fig. 8. Os estudos experimentais de [9] foram realizados em vigas convencionais e consideraram uma distribuição de tensões residuais para as mesas e alma. Embora o ideal fosse adotar uma distribuição para vigas convencionais e outra para vigas híbridas, devido à falta de dados sobre a distribuição de tensões residuais neste segundo caso, adotou-se a mesma distribuição das vigas convencionais.

Perfis I com resistência ao escoamento (f_y) igual a 345 N/mm² e 460 N/mm² possuem a mesma distribuição de tensões residuais. Além disso, os modelos de vigas convencionais e híbridas que possuem a mesma geometria terão a mesma distribuição [9]. Na Fig. 8 pode-se observar a distribuição

das tensões residuais no perfil C1, a qual é igual à do perfil H1.

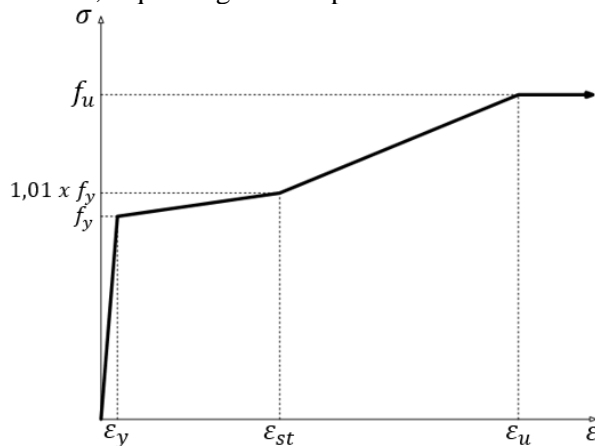


Figura 7. Diagrama tensão x deformação elasto-plástico adotado nas análises.

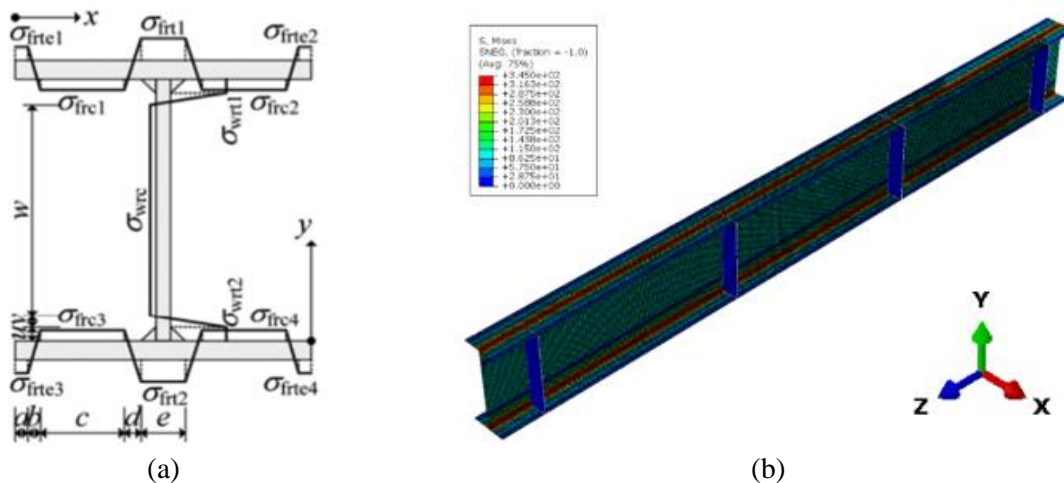


Figura 8. (a) distribuição das tensões residuais segundo Ban *et al.* [9] e (b) tensões residuais aplicadas aos modelos numéricos C1 e H1.

4 Resultados e Discussões

Após a análise da capacidade resistente última, para expressar o comportamento à flexão de vigas, foi realizada uma análise entre o momento normalizado (M/M_{pl}) e a rotação normalizada do nó na extremidade da viga (θ/θ_p), conforme realizado por Shokouhian [5]. A Fig. 9, Fig. 10 e Fig. 11 representam a comparação dos resultados obtidos neste estudo com os resultados experimentais e numéricos obtidos por [5].

Com esse estudo, obteve-se uma provável forma dos modos de flambagem sendo que, alguns desses modos estão representados na Fig. 12, Fig. 13 e Fig. 14.

Levando em consideração a análise do momento resistente último obtido a partir da Fig. 9, Fig. 10 e Fig. 11, percebe-se que o modelo numérico adotado atingiu resultados suficientemente próximos, tanto do modelo numérico como do modelo experimental proposto por [5].

Além disso, a partir da Tab. 2 é possível concluir que, para os casos estudados, a capacidade resistente das vigas híbridas é em torno de 14% a 19% maior que as determinadas para as vigas convencionas. O resultado obtido é esperado, tendo em vista o emprego de aços com maior resistência nas vigas híbridas, que levam ao aumento da capacidade resistente.

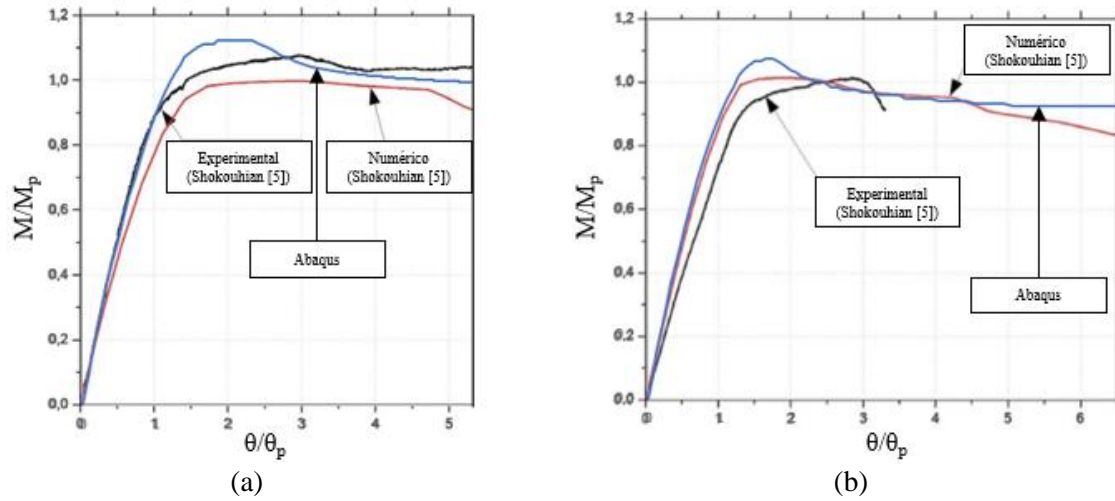


Figura 9. (a) comparação entre momento e rotação para viga C1 e (b) comparação entre momento e rotação para viga H1 (Adaptado de Shokouhian [5]).

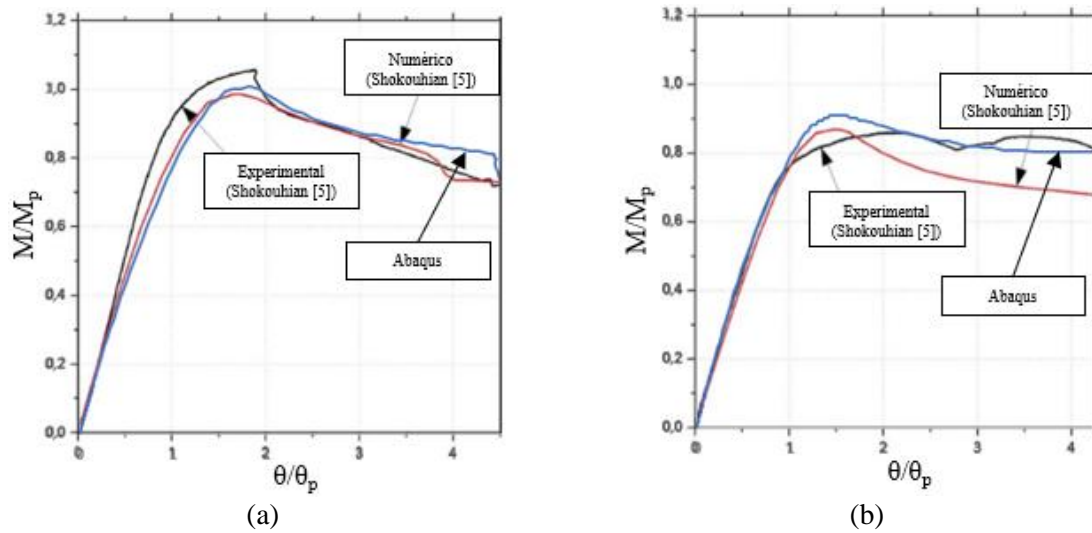


Figura 10. (a) comparação entre momento e rotação para viga C2 e (b) comparação entre momento e rotação para viga H2 (Adaptado de Shokouhian [5]).

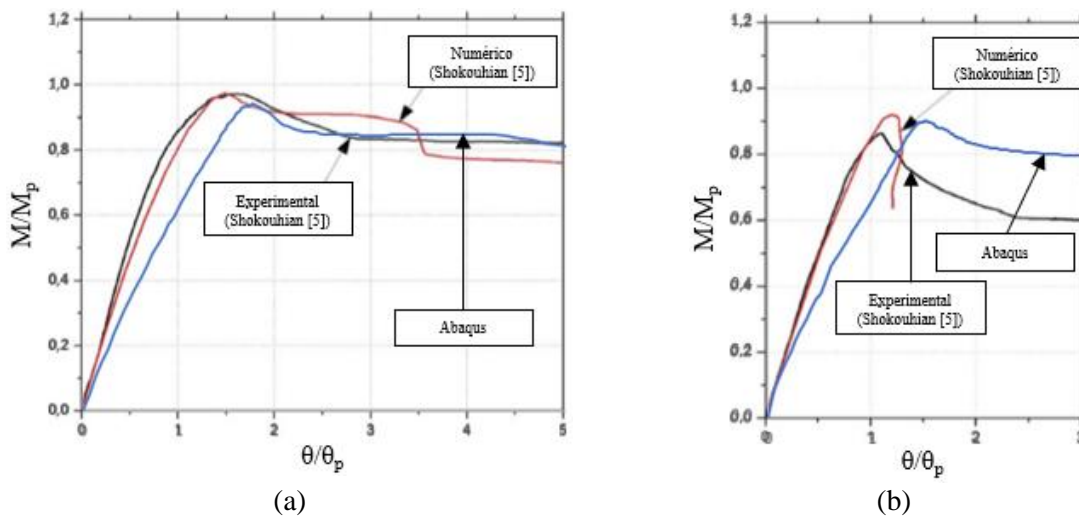


Figura 11. (a) comparação entre momento e rotação para viga C3 e (b) comparação entre momento e rotação para viga H3 (Adaptado de Shokouhian [5]).

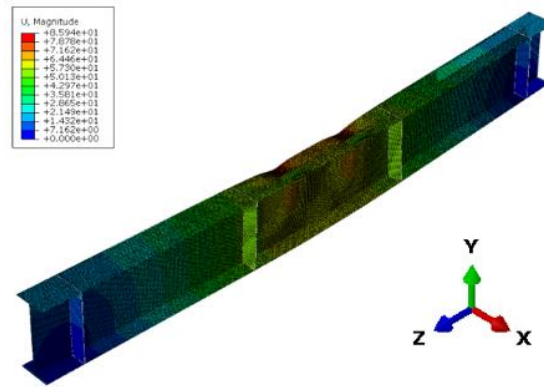


Figura 12. Modo de flambagem local da viga C1.

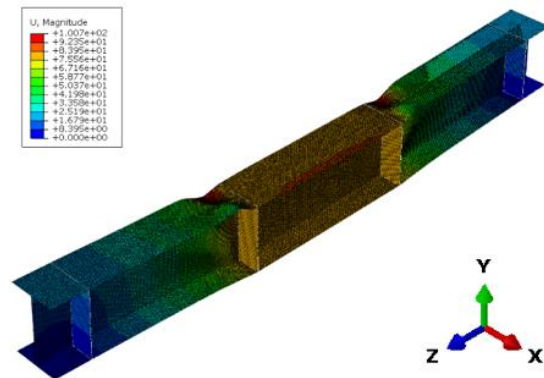


Figura 13. Modo de flambagem local da viga H2.

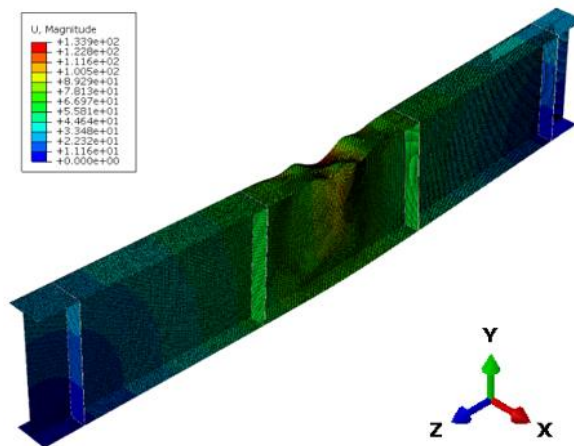


Figura 14. Modo de flambagem local da viga C3.

Tabela 2. Capacidade resistente determinada para os modelos ensaiados.

Modelo	P_{ul} (Abaqus) (N)	P_{ul} (Experimental–Shokouhian [5]) (N)	P_{ul} (Numérico–Shokouhian [5]) (N)
C1	407.999,61	392.778,36	362.564,64
C2	512.000,04	542.744,06	504.582,37
C3	651.999,38	669.358,51	675.128,84
H1	483.999,54	459.117,72	459.117,72
H2	584.000,04	560.388,19	565.776,54
H3	747.999,29	725.493,60	774.324,90

5 Conclusões

Estudou-se neste trabalho o comportamento de vigas híbridas de aço com seção transversal do tipo I submetidas à flexão. Foram desenvolvidos modelos numéricos no *software* Abaqus [6], nos quais a flambagem lateral com torção foi desconsiderada.

Os procedimentos dos estudos numéricos consistiram em realizar a análise de flambagem elástica, de forma a obter as cargas críticas de flambagem e os modos de flambagem das vigas, e em analisar a capacidade resistente última das vigas considerando tensões residuais e imperfeições iniciais.

Os resultados obtidos a partir do modelo numérico desenvolvido foram comparados com os resultados obtidos por Shokouhian [5] e mostraram que as vigas híbridas resistem a um esforço em torno de 14% a 19% maior de momento fletor quando comparadas com suas vigas homogêneas correspondentes.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências

- [1] Centro Brasileiro da Construção em Aço - Relatório de atividades 2017. Disponível em: <http://www.cbca-acobrasil.org.br/upfiles/downloads/relatorios/CBCA-Relatorio-de-Atividades-2017.pdf>. Acesso em 20 de janeiro de 2019. (s.d.).
- [2] Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - Resultados preliminares de dezembro de 2017. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=20>. Acesso em: 20 de janeiro de 2019.
- [3] Beg, D., Kuhlmann, U., Davaine, L., & Braun, B. (2010). Design of plated structures. ECCS Eurocode design manuals. Publicado por ECCS – European Convention for Constructional Steelwork.
- [4] Gogou, E. (2012). Use of High Strength Steel Grades for Economical Bridge Design. Master thesis study.
- [5] Shokouhian, M. (2014). Investigation of ductility and section resistance in hybrid flexural members with Q460 high strength steel. Dissertation submitted to Tsinghua University in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering.
- [6] Dassault Systèmes, 2013. Abaqus 6.13 Online Documentation.
- [7] Fakury, R.H.; Castro e Silva, A.L.R.; Caldas, R.B. (2016). Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto. Pearson Education do Brasil. São Paulo.
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008. NBR 8800 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.
- [9] Ban, H., Shi, G., Bai, Y., Shi, Y., Wang, Y. (2013) “Residual stress of 460 MPa high steel welded section: Experimental investigation and modeling”. *Journal of Thin-Walled Structures*, 64, pages 73-82.