



**ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES FORMAS E
MAGNITUDES DE IMPERFEIÇÕES INICIAIS EM VIGAS CELULARES SUJEITAS
À FLAMBAGEM DO MONTANTE DE ALMA**

Grilo, Lucas Figueiredo

Fakury, Ricardo Hallal

Castro e Silva, Ana Lydia

Castro Filho, Márcio Luiz

Souza-Cruz Neto, Armando Aguiar

lucasfgrilo@gmail.com.br

fakury@dees.ufmg.br

lydia@dees.ufmg.br

marcioluizbrasil@gmail.com

souzacruz@gmail.com

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Estruturas. Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Sala 4127, Belo Horizonte – MG, Cep: 31270-901, Brasil.

Resumo. *Este trabalho apresenta um estudo do comportamento estrutural de vigas celulares de aço, com foco em vigas sujeitas à flambagem do montante de alma. Usualmente, modelos numéricos de vigas dessa natureza são calibrados com resultados obtidos a partir de análises experimentais, e alguns dos parâmetros dos modelos numéricos são usados como variáveis de calibração, sendo alterados para que o modelo represente os resultados experimentais satisfatoriamente. Assim como em todo problema de estabilidade em estruturas de aço, em vigas celulares sujeitas à flambagem do montante de alma as imperfeições iniciais são um importante parâmetro para o comportamento estrutural. Usualmente esse parâmetro é utilizado como variável de calibração nos modelos numéricos, porém praticamente não existem estudos disponíveis na literatura que apresentem o impacto da variação da forma e magnitude da imperfeição inicial do montante de alma de vigas celulares. Neste trabalho, foram simulados 714 modelos, com cinco diferentes condições de contorno, e investigado como a forma e magnitude das imperfeições iniciais afetam o comportamento estrutural de vigas celulares sujeitas à flambagem do montante de alma.*

Palavras-chave: *Viga Celular, Flambagem do Montante de Alma, Estruturas de Aço, Estabilidade.*

1 INTRODUÇÃO

No século XX a melhoria dos processos de fabricação do aço, bem como o desenvolvimento da solda elétrica, fez com que o aço se transformasse em uma alternativa técnica e economicamente viável para diversos tipos de estruturas. Juntamente a esse desenvolvimento, criou-se a necessidade de um grande desenvolvimento na análise estrutural, que se estende até os dias de hoje, tornando possíveis estruturas cada vez mais otimizadas, tanto do ponto de vista de fabricação quanto de desempenho estrutural (Veríssimo, 1996).

Nesse contexto inserem-se as vigas alveolares, que são vigas de aço com grandes aberturas sequenciais na alma, usualmente feitas a partir do corte longitudinal periódico na alma de perfis I, de acordo com o padrão geométrico desejado. Uma vez geradas, as metades obtidas no corte são transladadas e suas almas soldadas, obtendo-se uma viga com aberturas sequenciais na alma, conforme pode ser observado na Figura 1, que mostra uma viga com aberturas hexagonais, chamada viga castelada. (Sonck; Belis, 2016).

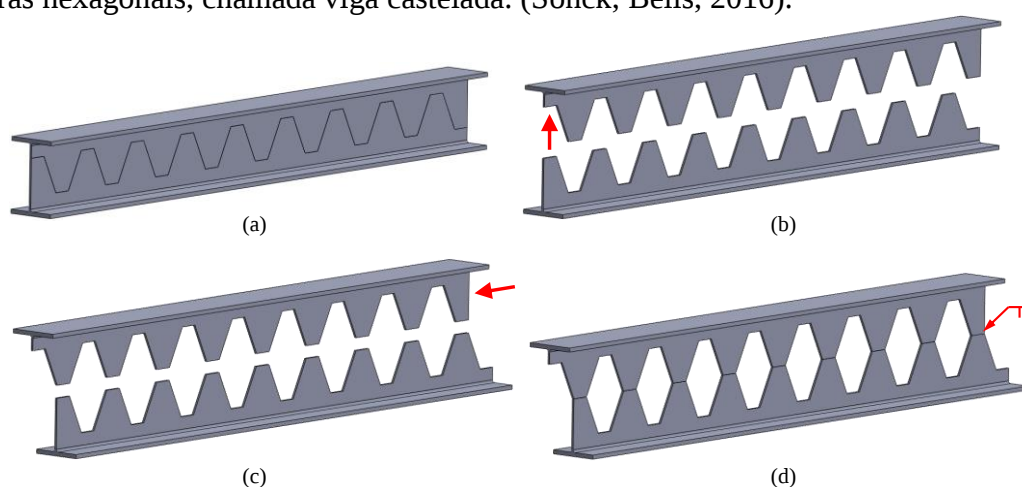


Figura 1. Esquema do corte e montagem de vigas alveolares casteladas

Sob as mesmas condições de contorno e carregamento, as vigas alveolares possuem maior rigidez e maior resistência ao momento fletor do que os perfis originais de alma cheia, sendo uma alternativa economicamente interessante (Abreu, 2011). Além da economia de material, permitem a passagem, através da alma, de dutos de serviço em vigas de piso, o que pode reduzir a altura entre pavimentos, conforme ilustrado na Figura 2 (Veríssimo, 1996).



Figura 2. Vigas celulares com dutos de serviço (www.steelconstruction.info, 2016)

As vigas celulares são um tipo de viga alveolar, fabricadas a partir de cortes semicirculares na alma das vigas, de maneira que sejam formados círculos na viga final, conforme pode ser observado na Figura 3. A ausência de arestas nos alvéolos faz com que a concentração de tensões na alma seja reduzida, quando comparada com vigas casteladas. Além dessa característica, as vigas celulares se apresentam como uma alternativa esteticamente agradável, tendo sido cada vez mais utilizadas por razões arquitetônicas.



Figura 3. Vigas celulares (www.wrap.org.uk, 2016)

O comportamento estrutural de vigas celulares é consideravelmente mais complexo que o de vigas de alma cheia, podendo apresentar os mesmos modos de falha presentes nas vigas de alma cheia, porém com algumas alterações devido à presença dos alvéolos. Além desses, outros modos de falha podem ocorrer, tendo sido amplamente estudados, conforme listado a seguir:

- Flambagem lateral por torção – FLT (Abreu, 2011; Sonck e Belis, 2015; Erdal e Saka, 2013);
- Formação de Mecanismo Plástico - Rótulas plásticas e Mecanismo Vierendeel – MV (Sonck, 2013; Demirdjian, 1999; Erdal, 2011; Chung *et al.*, 2001, Silveira, 2011, Lawson e Saverirajan, 2011);
- Flambagem do montante de alma por compressão – FMAC (Ward, 1990);
- Ruptura do montante de alma por cisalhamento (Verweij, 2010; Lawson e Hicks, 2001; Erdal 2011;
- Flexão do montante de alma Sonck (2013);
- Flambagem do montante de alma – FMA (Mahamadi, 2010; Ward, 1990; Lawson *et al.* 2002; Panedpojaman *et al.*, 2014, Delesques, 1968; Vieira *et al.*, 2014.

A modelagem numérica de vigas celulares deve ser feita de forma a representar o comportamento real das vigas, o que pode ser algo complexo, devido à dificuldade de se medir e contemplar no modelo numérico todas as propriedades e fenômenos a que os modelos experimentais estão sujeitos. Usualmente, os modelos numéricos são calibrados a partir de resultados obtidos em análises experimentais, sendo que alguns parâmetros dos modelos numéricos são utilizados como variáveis de calibração, podendo ser alterados para levar o comportamento dos modelos numéricos a se assemelhar satisfatoriamente ao dos modelos experimentais. Em vigas sujeitas à falha devida à mecanismos ligados à instabilidade, a imperfeição inicial do modelo é um fator importante na determinação do comportamento estrutural da viga, e pouco encontra-se a seu respeito na literatura de vigas celulares.

Neste trabalho é abordada a variação no comportamento do modelo numérico devido à alteração de alguns parâmetros de modelagem, sendo eles a amplitude e a forma da imperfeição inicial da viga, e o valor do módulo de elasticidade do aço. Não foi considerado neste estudo a tensão residual presente nas vigas celulares, o que se deve à falta de dados confiáveis a respeito da correta distribuição de tensões ao longo da seção.

2 MODELO NUMÉRICO

Os modelos numéricos foram gerados integralmente no programa ABAQUS 6.13, que utiliza o Método dos Elementos Finitos. Para a solução dos modelos das vigas celulares, foi utilizado o método de Riks modificado (método do comprimento de arco), que permite obter estados de equilíbrio estático durante a fase instável da estrutura (Castro e Silva, 2006).

Após testes com elementos de casca S4R, S3, S8R e STRI65, foi definida a utilização do elemento S4R, que tem quatro nós, com seis graus de liberdade por nó, e integração reduzida, com um ponto de integração por elemento. Foram realizados testes de sensibilidade de malha, e foi definido que seria utilizada uma com tamanho médio do elemento igual 10 mm e uma quantidade mínima de 20 elementos entre os alvéolos (Figura 4).

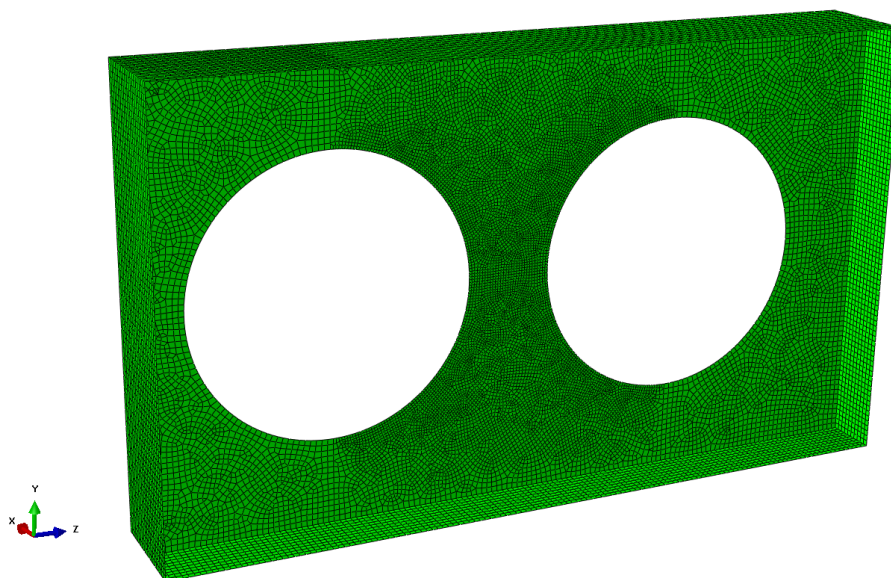


Figura 4. Modelo com elementos S4R

Uma vez que neste estudo foram simulados modelos com diferentes imperfeições iniciais, mas com mesma imperfeição nos dois montantes de alma, foi utilizado modelo de simetria, no qual foi modelada apenas metade da viga, conforme esquematizado na Figura 5.

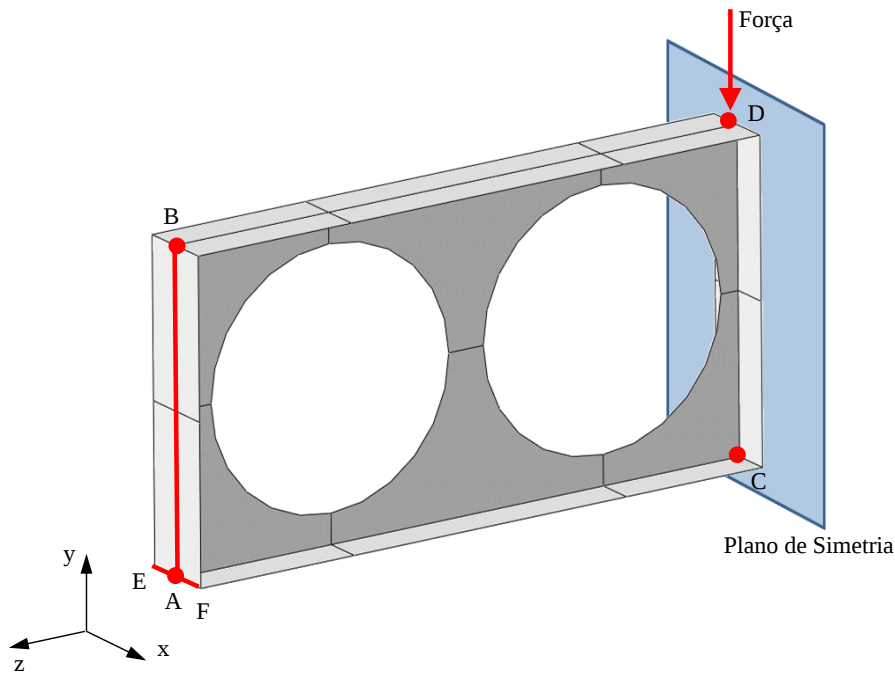


Figura 5. Modelo de simetria

Os modelos foram gerados considerando a viga biapoiada, com carregamento centrado, de forma que o ponto A ficasse restrito em relação ao deslocamento nas direções dos eixos em x e y, a linha EF restrita em relação aos deslocamentos na direção do eixo y, a linha AB restrita em relação aos deslocamentos na direção do eixo x, o ponto D restrito em relação aos eixos z e x e todos os pontos no plano de simetria restritos em relação ao deslocamento na direção do eixo z e à rotação em torno dos eixos x e y. Além dessas restrições, o deslocamento do ponto C foi restrito na direção do eixo x em alguns dos modelos, conforme será mostrado a seguir.

Inicialmente foram gerados gráficos de força versus flecha considerando o aço com resistência ao escoamento (f_y) igual a 345 MPa e módulo de elasticidade (E) igual a 200 GPa. Posteriormente o módulo de elasticidade foi alterado para 180 e 160 GPa, para avaliar a variação na resposta numérica. Em todos os modelos foi utilizado o modelo constitutivo bilinear para o aço (elastoplástico perfeito).

2.1 Modelagem da imperfeição inicial

A modelagem da imperfeição inicial do montante de alma é um fator determinante no comportamento da FMA, e pouco se encontra na literatura a seu respeito. Usualmente a imperfeição inicial do montante é modelada numericamente a partir da geometria deformada do primeiro modo de flambagem do montante de alma, gerando uma imperfeição inicial com curvatura dupla (Figura 6-a), o que é relatado na literatura como prática que leva a bons resultados (Vieira, 2015) e (Vieira, 2014). Essa geometria, no entanto, não condiz com a forma usual da imperfeição real do montante de alma de vigas celulares. Comumente, a imperfeição observada em peças fabricadas apresenta com curvatura simples, conforme mostrado na Figura 6-b ou c.

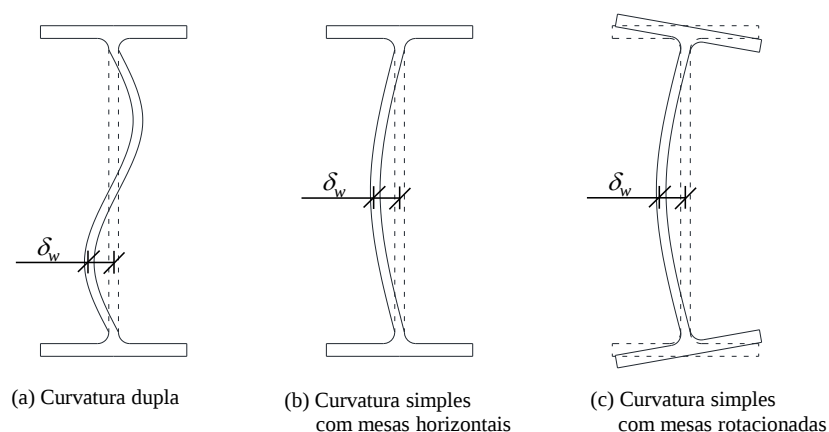


Figura 6. Curvaturas das imperfeições iniciais

Para comparar as respostas dos modelos numéricos de acordo com a forma e amplitude da imperfeição inicial, foram simulados modelos numéricos de todas as vigas projetadas para fabricação, com as três formas de imperfeições, e valores de δ_w iguais a 0, $d_g/2.000$, $d_g/1.500$, $d_g/1.000$, $d_g/800$, $d_g/600$, $d_g/400$, $d_g/300$, $d_g/200$, $d_g/100$ e $d_g/50$.

Para a geração da geometria, foi adotada a seguinte metodologia no programa ABAQUS:

- Curvatura dupla: foi aplicada uma força vertical no centro do vão, na mesa superior, e por análise linear de estabilidade, obtida a geometria do primeiro modo de flambagem do montante de alma (Figura 7-a).
- Curvatura simples com mesas horizontais: foram engastados todos os nós na linha ABCD (Figura 5) e aplicada pressão em toda a alma, e obtendo-se a geometria deslocada da alma, conforme pode ser visto na Figura 7-b.
- Curvatura simples com mesas rotacionadas: foi aplicada restrição à translação transversal em todos os nós na linha ABCD (Figura 5), e aplicada uma pressão em toda a alma, e obtendo-se a geometria deformada do modelo, conforme pode ser visto na Figura 7-c.

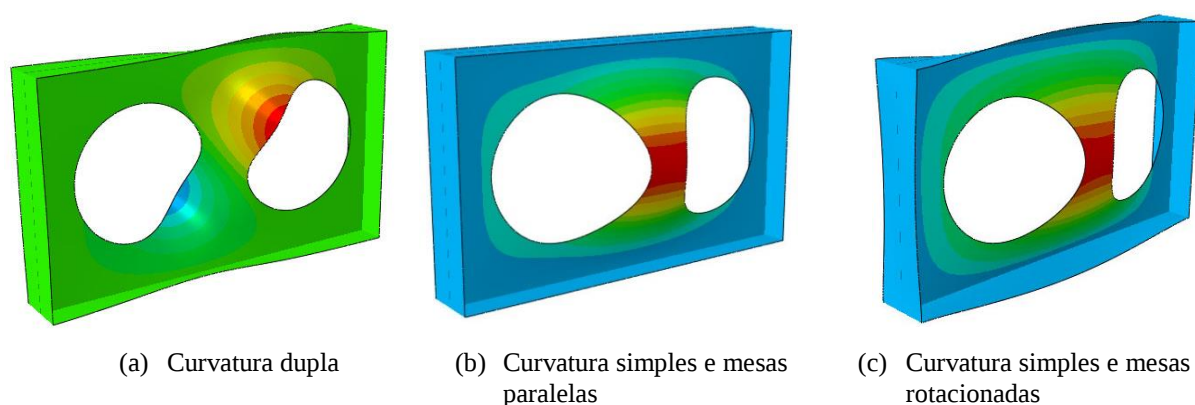


Figura 7. Imperfeições iniciais geradas

Após a obtenção das geometrias a partir dos métodos mencionados, o modelo geométrico foi exportado para o modelo de análise, e a deformação inicial multiplicada por um fator de escala para adaptá-la ao valor máximo de imperfeição desejado.

2.2 Giro da seção central

Estudos numéricos preliminares executados neste trabalho demonstraram a tendência da seção central de girar, mesmo quando o deslocamento da mesa superior está restrito transversalmente, em um fenômeno conhecido como flambagem lateral da alma.



Figura 8. Imperfeições iniciais geradas

Devido a esse comportamento, também foram modeladas algumas vigas com o ponto central inferior restrito ao deslocamento horizontal (ponto C – Figura 5) para que se pudesse avaliar seu impacto na carga última.

3 RESULTADOS

A partir dos modelos numéricos, foram gerados gráficos de força *versus* flecha das 14 vigas, para diferentes combinações entre amplitudes e formas de imperfeições iniciais citadas (Tabela 1), totalizando 714 curvas. Estão apresentados neste item algumas curvas, que são representativas para todos os modelos.

Tabela 1 – Tipos de modelos simulados

Tipo	Curvatura da imperfeição no montante de alma	Imperfeição nas mesas	Ponto central inferior
(a)	Simples	Sem imperfeição	Livre
(b)	Simples	Sem imperfeição	Restrito
(c)	Simples	Com imperfeição	Livre
(d)	Simples	Com imperfeição	Restrito
(e)	Dupla	Com imperfeição	Livre

3.1 Problemas ocorridos durante a modelagem

Alguns modelos nos quais foram impostas imperfeições iniciais com curvatura simples apresentaram problemas de convergência, a respeito dos quais não foram encontradas referências na literatura. Ao se utilizar a determinação do comprimento de arco automática disponibilizada no ABAQUS, de forma a otimizar o processo de solução numérico, ocasionalmente a análise converge para uma configuração irreal da geometria do montante de

alma, e consequentemente para um valor errado de força crítica. Foi observado que, ao se impor um incremento pré-determinado um pouco menor que o definido automaticamente, a geometria e a força tendem para o mesmo valor anterior, aparentando convergência do resultado. Porém, ao se fazer tentativas com comprimentos de arco sucessivamente menores, foi observado que a partir de um determinado valor de incremento a geometria deformada passa a ser a esperada, bem como o valor de força crítica. Esse problema foi sanado ao se utilizar um incremento pequeno, fixo para toda a análise, o que consequentemente gerou arquivos demasiadamente grandes. Esse problema não foi observado em modelos com imperfeição inicial com curvatura dupla, o que pode explicar o fato de nunca ter sido relatado em pesquisas anteriores, uma vez que essa é a geometria da imperfeição inicial usualmente utilizada numericamente.

Além do problema de convergência relatado, alguns modelos apresentaram um problema para continuar a análise após a força última, nos quais os incrementos de força foram reduzidos ao longo dos passos, mas nunca chegando a fazer com que a força reduzisse. Dessa forma, mesmo em modelos em que ocorriam FMA, nos quais é sabido que a queda de força é brusca após o colapso, eventualmente a força não mostrou um decréscimo, ficando os incrementos de força, e, consequentemente o deslocamento, cada vez menores, formando um patamar até o bloqueio da solução pelo programa.

3.2 Modelos sujeitos à FMA

O comportamento qualitativo dos modelos simulados sujeitos à FMA pode ser bem representado pelo comportamento dos modelos da viga A2, que será explorada neste Subitem. Os modelos do tipo a, b, c e d (imperfeição inicial com curvatura simples), têm o comportamento da curva força versus flecha similares, e podem ser descritos pela Figura 8.

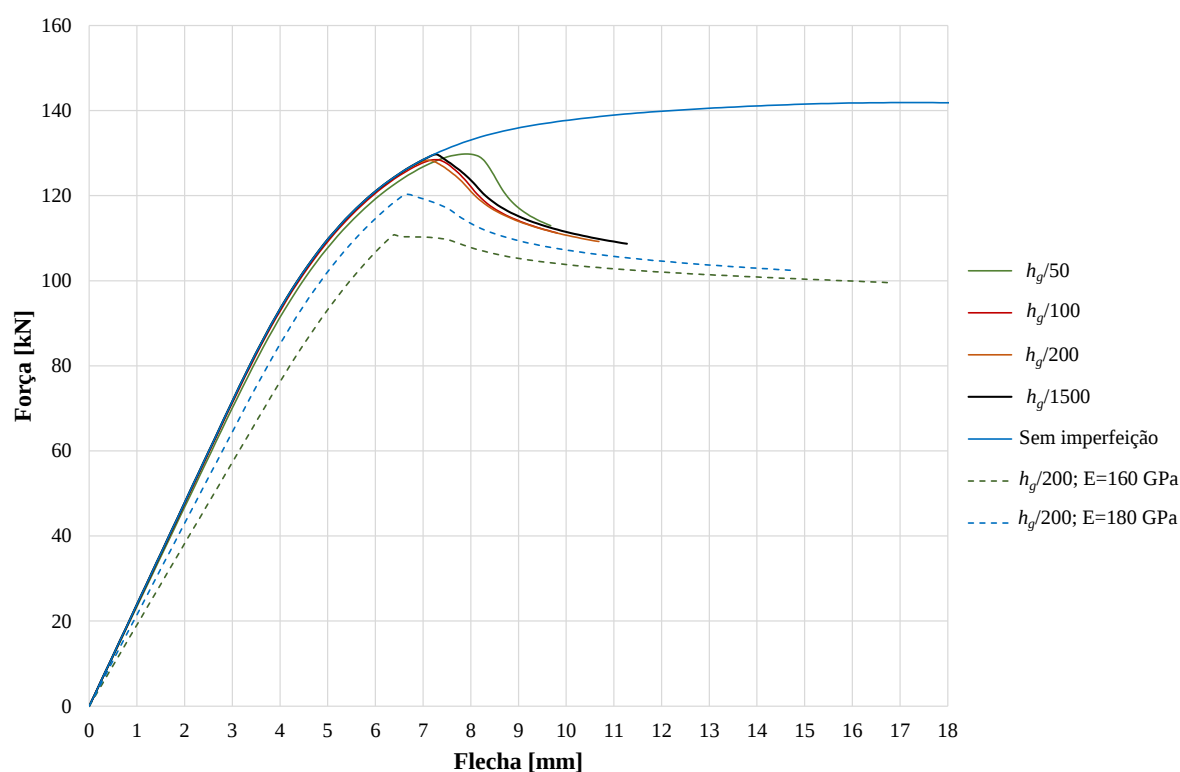


Figura 8. Viga A2 – Modelo a – Força versus flecha (imperfeição com curvatura simples)

Conforme pode ser observado, quando se compara modelos com mesmo módulo de elasticidade, o trecho inicial da curva se altera muito pouco em função da variação da magnitude da imperfeição inicial. Os modelos com módulo de elasticidade reduzido apresentam um aumento da flexibilidade generalizado no comportamento, sendo a força última reduzida de forma considerável em relação aos modelos com módulo de elasticidade igual a 200 GPa.

Ao contrário do que era esperado inicialmente, nos modelos com a maiores imperfeições testadas ($h_g/50$), a força última pode ser superior à dos demais modelos com imperfeições menores. Esse comportamento foi encontrado sistematicamente em alguns modelos com as mesmas sem imperfeições, e pode-se afirmar que não se trata de um erro numérico. Uma possível explicação para esse comportamento é o fato de que, como a FMA de fato ocorre na forma de curvatura dupla, parte do montante de alma já está posicionado na direção correta da flambagem antes da aplicação da carga, mas a outra parte está na posição contrária. Sendo assim é necessário que o sistema consuma energia para fazer com que o montante de alma tenha sua geometria reconfigurada para a forma de curvatura dupla, para seguir com o comportamento típico de FMA.

Esse comportamento faz com que a curvatura inicial simples apresente uma característica que, se por um lado aumenta as excentricidades e facilita a perda de estabilidade, por outro pode fazer com que a energia despendida na reconfiguração da geometria para depois prosseguir com a perda de estabilidade aumente, existindo assim um valor de imperfeição que leve à força última mínima. Na Figura 9 pode ser observada a variação da força última em função da imperfeição inicial para os modelos com imperfeição inicial com curvatura simples, e o comportamento descrito pode ser constatado.

Ao se analisar o gráfico de força versus flecha da viga com imperfeição inicial dupla (Figura 10), pode-se observar que a diferença de comportamento entre os modelos com imperfeição com curvatura dupla é mais gradual que entre modelos com imperfeição com curvatura simples. Além desse fato, observa-se que o aumento da imperfeição inicial causa, não só uma diminuição da força última, mas também um aumento da flexibilidade de todo o sistema, aumentando consideravelmente a inclinação do trecho inicial das curvas, podendo levar o modelo a ter rigidez e força última inferiores às do modelo simulado utilizando o módulo de elasticidade reduzido.

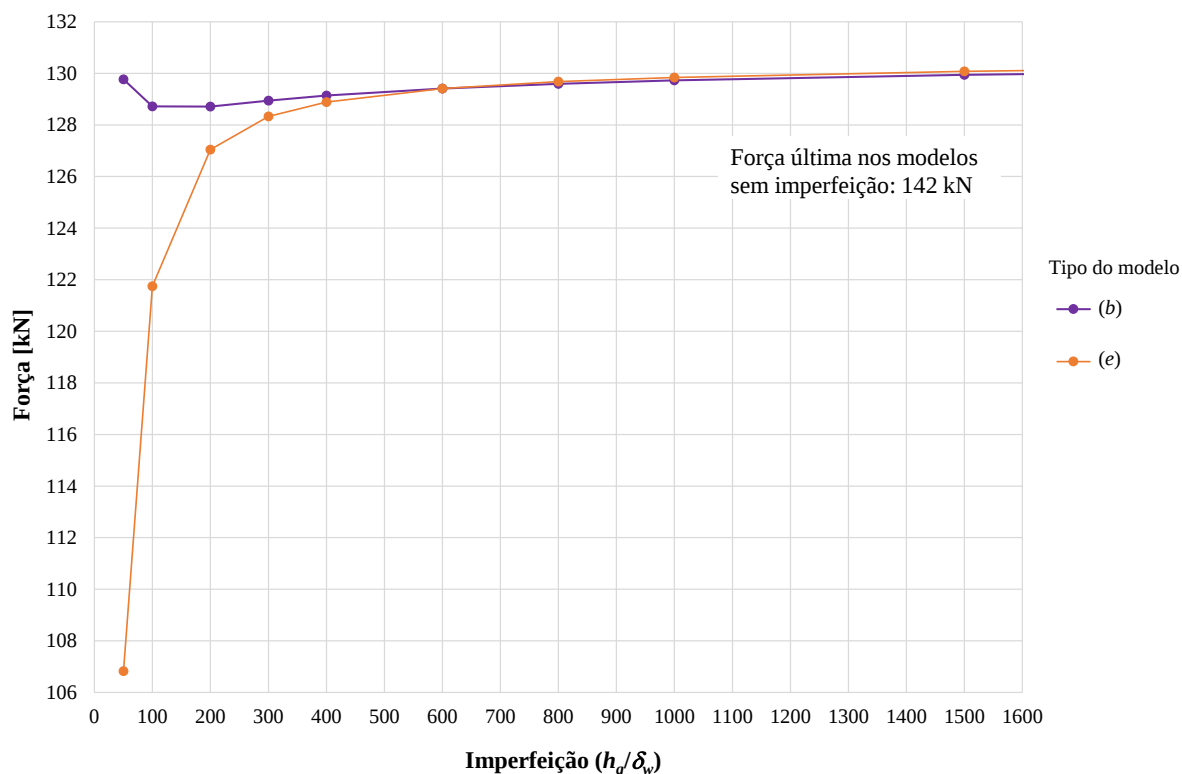


Figura 9. Viga A2 –Força última em função da imperfeição

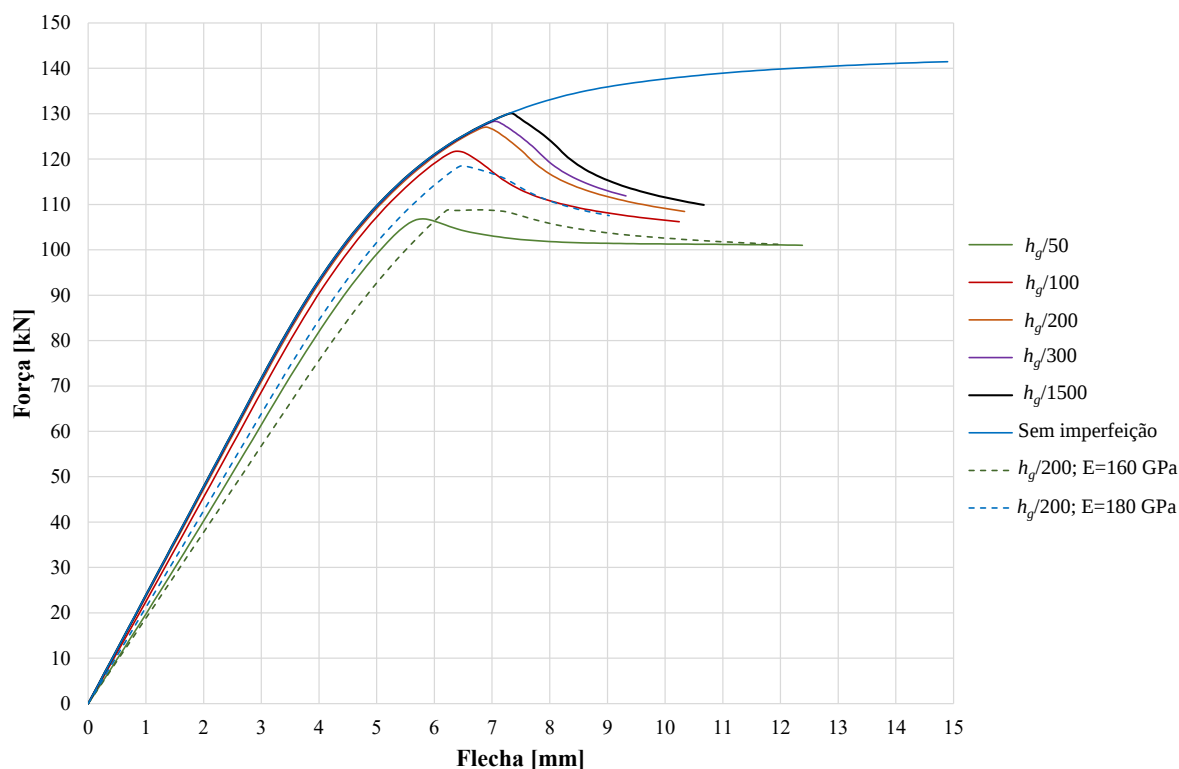


Figura 10. Viga A2 – Modelo e – Força versus flecha (imperfeição com curvatura dupla)

Para se avaliar o impacto da modelagem da imperfeição com ou sem a rotação das mesas, foi traçado o gráfico de força versus flecha para os diferentes tipos de modelos, com magnitude da imperfeição inicial igual a $h_g/100$. Conforme pode ser observado na Figura 11 a diferença no comportamento dos modelos com imperfeição inicial de mesma geometria é desprezável (a e b; c e d), mesmo com a presença da restrição ao deslocamento lateral no ponto central inferior da viga. Ao se comparar o comportamento dos modelos sem imperfeição inicial na mesa com os que a tem (por exemplo modelos do tipo a e c), é possível observar que a torção inicial da mesa causa uma pequena diferença no comportamento, principalmente na magnitude da flecha no momento da força última. Quando se compara a força última nesses modelos, observa-se que a diferença apresentada é desprezável. Além dos modelos mencionados, que apresentam imperfeição inicial com curvatura simples, está apresentado no gráfico, apenas para referência, a curva para o modelo com imperfeição inicial com curvatura dupla.

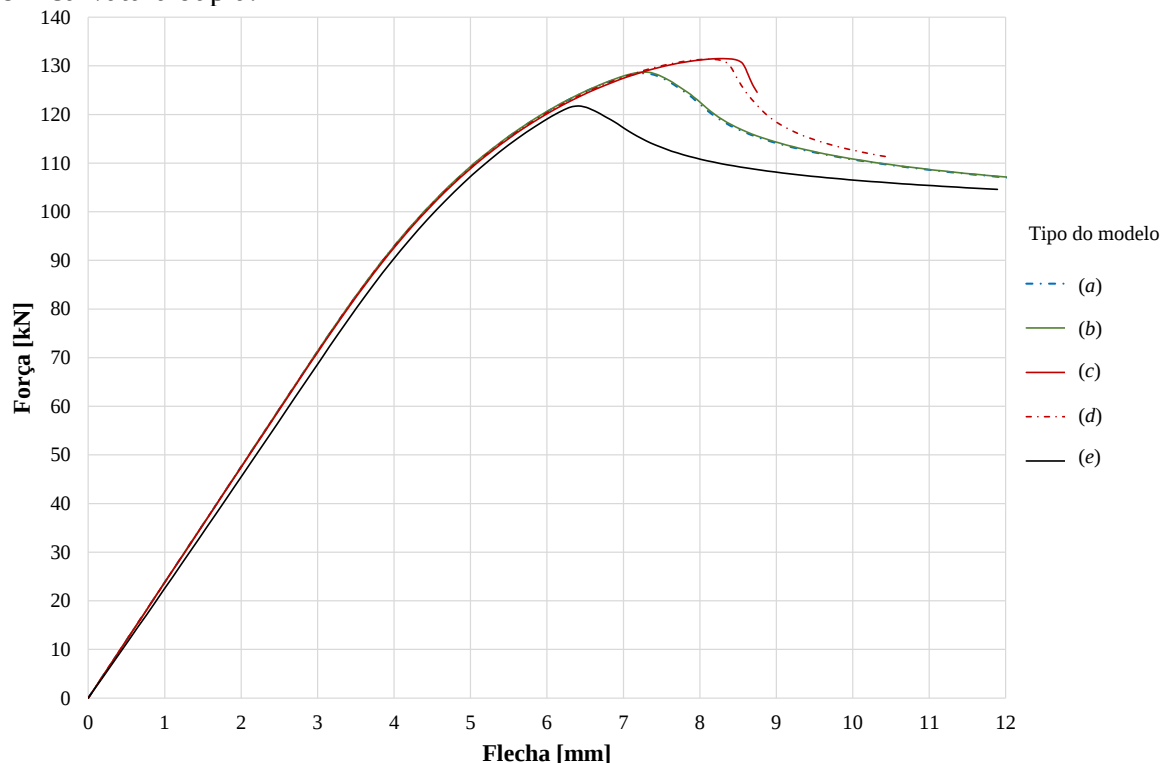


Figura 11. Viga A2 – Resposta para diferentes formas de imperfeição inicial ($\delta_w=h_g/100$)

3.3 Modelos sujeitos ao mecanismo Vierendeel

Os modelos simulados sujeitos ao mecanismo Vierendeel apresentaram comportamentos qualitativos semelhantes entre si, e por essa razão estão apresentados neste Subitem os resultados referentes ao modelo numérico da viga A4, que é representativo para os demais.

Assim como nos modelos sujeitos à FMA, os modelos sujeitos ao mecanismo Vierendeel com curvatura simples apresentam resultados semelhantes quando comparados entre si. Contudo, diferentemente dos modelos sujeitos à FMA, nos modelos com curvatura inicial simples a diferença entre modelos com diferentes magnitudes de curvatura inicial não é significativa, tendo sido observadas as maiores diferenças após a força crítica (Figura 12). Também pode ser observado que a variação do módulo de elasticidade dos modelos resultou

em uma maior flexibilidade do sistema, mas com pouca alteração na força última. Esse comportamento era esperado, uma vez que a formação das regiões de plastificação do mecanismo Vierendeel têm pouca ligação com as imperfeições iniciais.

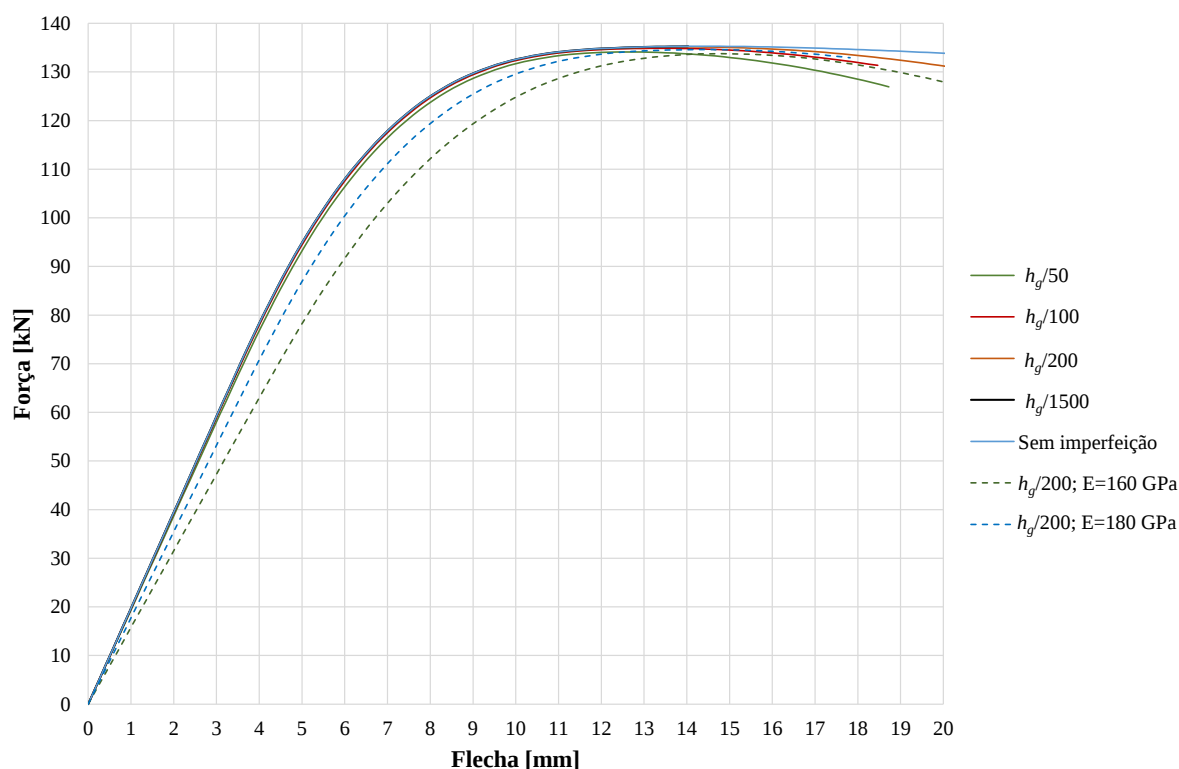


Figura 12. Viga A4 – Modelo a – Força versus flecha (imperfeição com curvatura simples)

Nos modelos com imperfeição inicial dupla sujeitos ao mecanismo Vierendeel, pode ser observado que existe uma variação maior do comportamento à medida que se aumenta a magnitude da imperfeição inicial. Conforme pode ser observado na Figura 13, para que essa diferença seja significativa, é necessário que a imperfeição inicial seja grande, tendo sido observado que para imperfeições com magnitude inferiores à $h_g/100$ essas diferenças se tornam muito pouco significativas. A variação no comportamento apresentada ao se utilizar valores altos de imperfeições iniciais faz com que, assim como quando é reduzido o módulo de elasticidade, ocorra um aumento na flexibilidade do modelo, mas não alterando significativamente a força última.

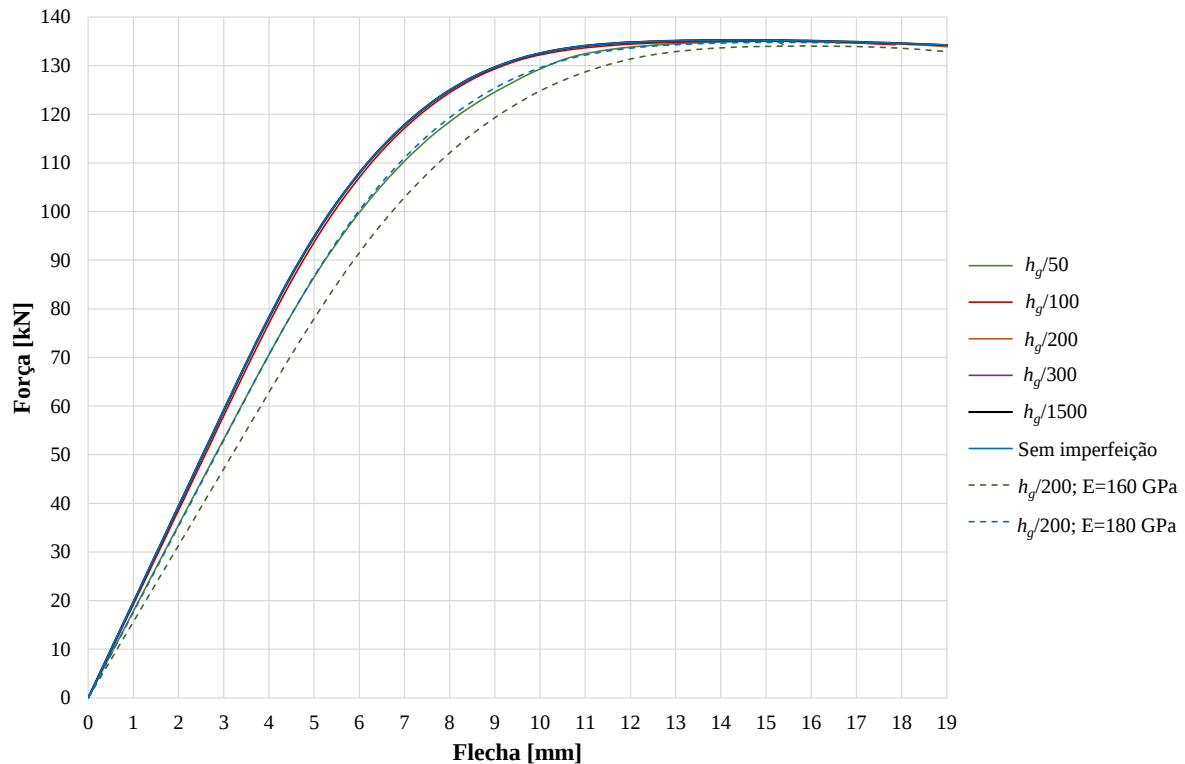


Figura 13 – Viga A4 – Modelo e – Força versus flecha (imperfeição com curvatura dupla)

Conforme pode ser observado na Figura 14, diferentemente do que ocorre em vigas sujeitas à FMA, os modelos sujeitos ao mecanismo Vierendeel com curvatura dupla apresentam valor de força última superior ao dos modelos com curvatura simples, além de ser possível observar que não ocorre um aumento da força última em modelos com deformação inicial com magnitudes elevadas, sendo o comportamento da variação da força última em relação à imperfeição inicial monotônico. Esse comportamento, apesar de poder ser observado claramente, não tem, para os modelos estudados, impacto significativo no valor da força última. Conforme é possível observar, a maior diferença entre modelos é da ordem de 2%. Essa diferença de comportamento em relação aos modelos sujeitos à FMA corrobora a tese de que o aumento da força última, em modelos sujeitos à FMA com grandes magnitudes de imperfeição inicial, é causado pela energia despendida ao se reconfigurar os montantes de alma para a geometria com curvatura dupla, uma vez que essa reconfiguração não ocorre nos modelos sujeitos ao mecanismo Vierendeel.

Contudo, quando são consideradas imperfeições iniciais inferiores à $h_g/100$, os comportamentos de todos os tipos de modelos passam a ser muito semelhantes (Figura 15), tendo a maior diferença após a força última, mas, ainda assim, não tendo diferenças significativas.

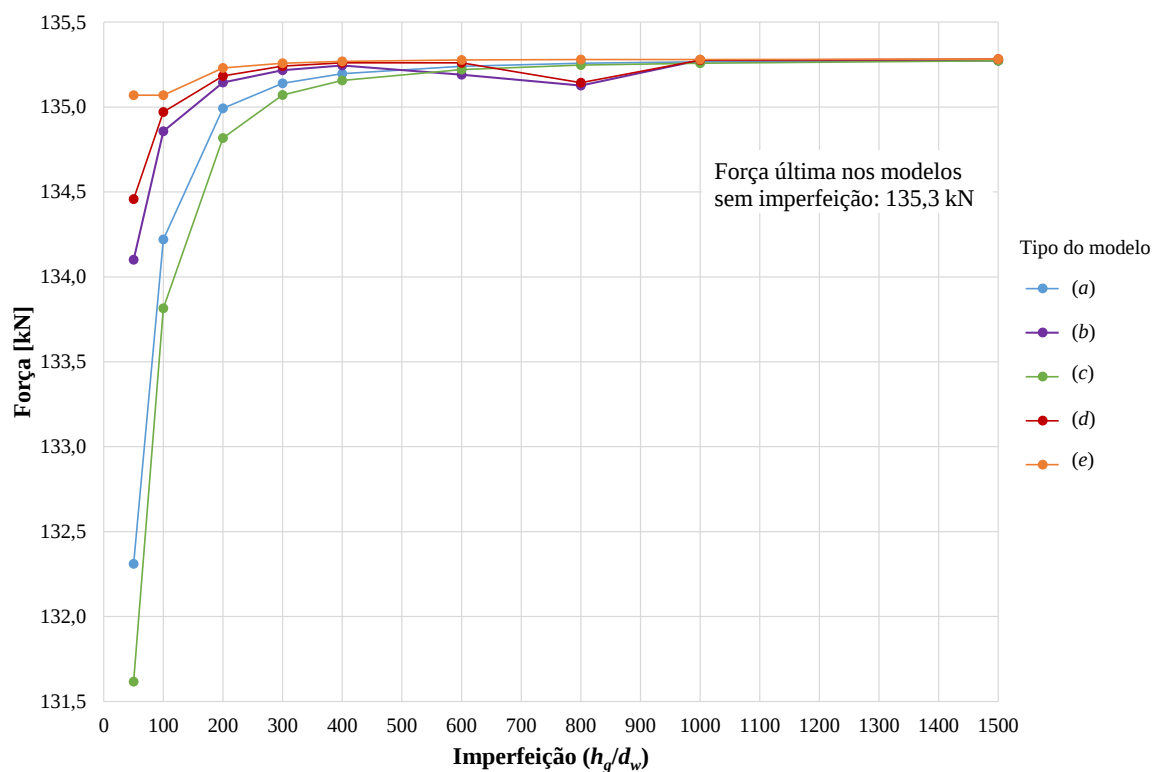


Figura 14 – Viga A4 – Força última em função da imperfeição inicial para colapso por Mecanismo Vierendeel

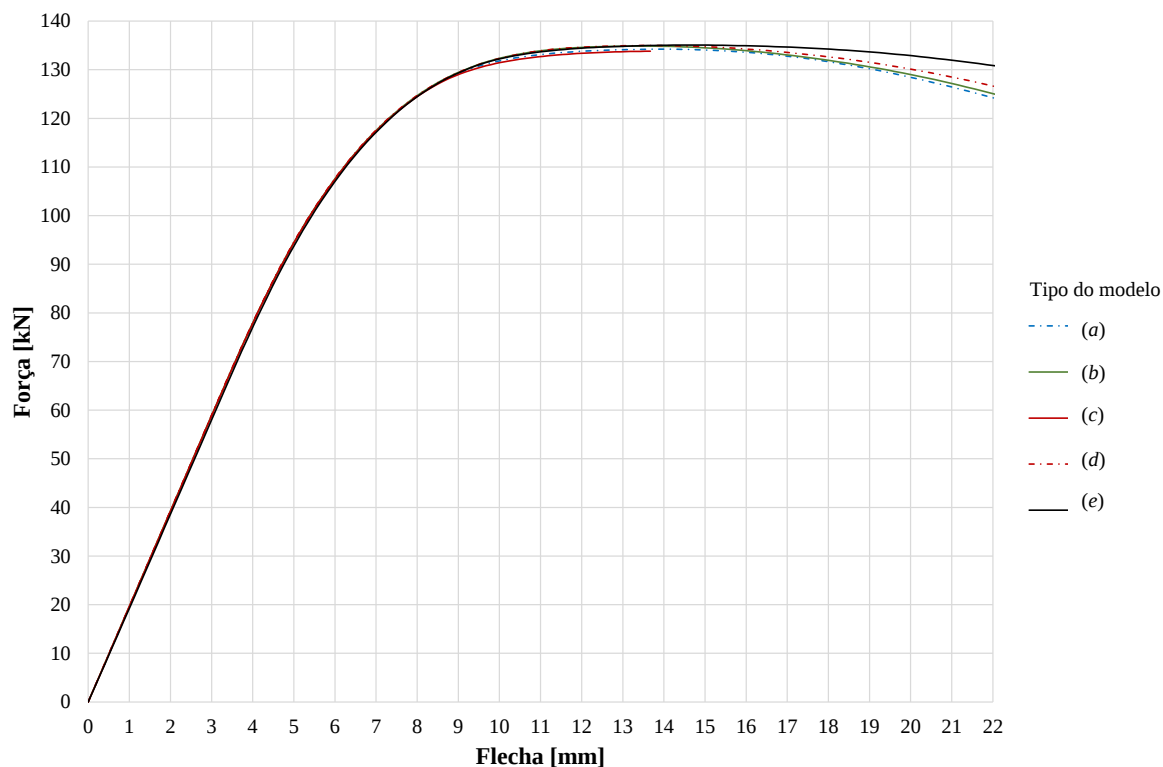


Figura 15 – Viga A4 – Resposta para diferentes formas de imperfeição inicial ($\square w=h_g/100$)

4 CONCLUSÕES

No estudo numérico preliminar foram simulados 714 modelos, sendo constatado que, em modelos com imperfeição inicial com curvatura simples, o fato de se fixar o ponto central inferior da viga, assim como o de se impor a rotação ou não das mesas nas imperfeições iniciais, não altera de forma significativa o comportamento dos modelos.

A modelagem de vigas celulares com imperfeição inicial do montante de alma com curvatura simples, embora represente melhor a geometria real dos modelos experimentais, incorre em uma série de complicações numéricas que ainda não foram completamente solucionadas neste trabalho, sendo necessário verificar a geometria deformada das vigas para validar o resultado.

Além desse fato, com esta metodologia, a malha necessária para garantir a confiabilidade dos resultados é demasiadamente refinada, além de que os incrementos de força utilizados na solução numérica pelo método do comprimento de arco precisam ser muito pequenos, combinação de fatores que levam os modelos a requererem muito espaço para armazenamento.

Dessa forma, sugere-se que os modelos numéricos sejam, a princípio, feitos utilizando imperfeição inicial com curvatura dupla, para aferição com a análise experimental.

Agradecimentos

Os autores agradecem os apoios financeiros concedidos pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais).

REFERÊNCIAS

Abreu, L. M. P., 2011. *Determinação do Momento Fletor Resistente à Flambagem Lateral com Torção de Vigas de Aço Celulares*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

Castro e Silva, A. L. R., 2006. *Análise Numérica Não-Linear Da Flambagem Local De Perfis De Aço Estrutural Submetidos à Compressão Uniaxial*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais.

Chung, K. F.; Liu, T. C. H.; Ko, A. C. H., 2001. Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 57, n. 5, p. 467-490.

Demirdjian, S., 1999. *Stability of Castellated Beam Webs*. Dissertação de Mestrado, McGill University, Canadá.

Erdal, F., 2011. *Ultimate Load Capacity of Optimally Designed Cellular Beams*. Tese de Doutorado, Middle East Technical University, Turquia.

Erdal, F.; Saka, M. P., 2013. Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 80, p. 355-368.

Lawson, R. M.; Hicks, S. J., 2001. Design of composite beams with large web openings. *Steel Construction Institute*, Reino Unido.

Lawson, R. M.; Saverirajan, A. H. A., 2011. Simplified elasto-plastic analysis of composite beams and cellular beams to Eurocode 4. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 67, n. 10, p. 1426-1434.

Mahamadi, S. B., 2010. *Cellular Beams at Ambient and Elevated Temperatures*. Tese de Doutorado, The University of Manchester.

Silveira, E. G., 2011. *Avaliação do Comportamento de Vigas Alveolares de Aço com Ênfase nos Modos de Colapso por Plastificação*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

Sonck, D., 2013. *Global Buckling of Castellated and Cellular Steel Beams and Columns*. Tese de Doutorado, Ghent University, Bélgica.

Sonck, D.; Belis, J., 2015. Lateral–Torsional Buckling Resistance of Cellular Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 105, p. 119-128.

Sonck, D.; Belis, J., 2016. Weak-axis Flexural Buckling of Cellular and Castellated Columns. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 124, p. 91-100.

Veríssimo, G. S., 1996. *Análise e Comportamento de Vigas de Aço e Vigas Mistas com Aberturas na Alma*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

Verweij, J. G., 2010. *Cellular Beam-Columns in Portal Frame Structures*. Delft University of Technology, Nederland.

Vieira, W. B., 2015. *Estudo Numérico-Experimental da Flambagem do Montante de Alma em Vigas Casteladas de Aço*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Brasil.

Vieira, H. C. *Análise Numérica da Flambagem do Montante de Alma devida ao Cisalhamento em Vigas de Aço Celulares*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2014.

Vieira, H. C.; Castro e Silva, A. L. R.; Fakury, R. H.; Veríssimo, G. S., 2014. Capacidade Resistente de Vigas Celulares para o Estado-Limite Último de Instabilidade do Montante de Alma por Cisalhamento. *Revista da Estrutura de Aço*, v. 3, n. 3, p. 283-302.

Ward, J. K., 1990. Design of Composite and Non-Composite Cellular Beams. *The Steel Construction Institute*.