



ANÁLISE DA FLAMBAGEM LOCAL E DISTORCIONAL EM PERFIS FORMADOS A FRIO COM PERFURAÇÕES

Luiz Henrique de Almeida Neiva¹

lhalmeidaneiva@gmail.com

Vinícius de Oliveira Faria¹

v.oliveirafaria@gmail.com

Flávio Teixeira Souza²

flavio.souza@ifmg.edu.br

Ellen Martins Xavier¹

ellen.mxavier@hotmail.com

Arlene Maria Cunha Sarmanho¹

arlene.sarmanho@gmail.com

Juliane Aparecida Braz Starlino¹

justarlino@yahoo.com.br

Guilherme Cássio Elias¹

gc.elias@yahoo.com.br

¹ Universidade Federal de Ouro Preto

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

Resumo. Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência das perfurações na estabilidade e carga última de colunas em perfis formados a frio sob carregamento centrado, enfatizando os modos local e distorcional. As seções analisadas são do tipo rack, comumente utilizadas em sistemas de armazenagem e as colunas possuem perfurações ao longo do seu comprimento para facilitar a montagem. Por meio de estudos numéricos foram realizadas análises paramétricas com variações nas dimensões dos furos de forma a avaliar a carga última da coluna, bem como a carga crítica de flambagem das seções. Os resultados indicam que as perfurações possuem influência nos modos de estabilidade e na carga última da coluna.

Palavras-chave: Estabilidade, Carga última, Perfil formado a frio, Rack.

1 INTRODUÇÃO

Os fatores econômicos, juntamente com os avanços tecnológicos na indústria da construção civil, levam a uma tendência de projetos de estruturas cada vez mais leves e esbeltas. Em função do aumento de esbeltez dos elementos e da utilização de materiais com maior resistência mecânica, os fenômenos de instabilidade são intensificados, a exemplo da flambagem local e distorcional.

1.1 Perfis formados a frio

Entende-se por perfis formados a frio, aqueles obtidos a partir do dobramento ou perfilagem, em temperatura ambiente, de chapas de aço. Tais chapas são geralmente de pequena espessura, a fim de garantir a trabalhabilidade necessária ao processo de conformação. As principais vantagens desses perfis são a variedade de seções transversais que podem ser obtidas, a versatilidade de aplicação, a facilidade na montagem e o reduzido peso de seus elementos, se comparados aos perfis laminados e soldados.

Devido à utilização de chapas finas, tais perfis apresentam relações elevadas de largura-espessura (esbeltez local), fazendo com que, de maneira geral, estejam mais suscetíveis aos fenômenos de instabilidade local de placa.

1.2 Flambagem local, distorcional e global

Os perfis formados a frio são compostos por uma associação de placas que compõe a seção transversal do perfil. O estudo do comportamento de placas esbeltas envolve a solução de equações de equilíbrio complexas e de difícil utilização em normas de projeto. Assim, faz uso de métodos simplificados de solução tais como o Método da Largura Efetiva (von Karman, 1932 e Winter, 1947 *apud* Sarmanho, 1991); o Método da Resistência Direta (Schafer, 2006); e o Método da Seção Efetiva (Batista, 2010) cuja formulação é prevista exclusivamente na ABNT NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.

A flambagem local de placa caracteriza-se pela perda de estabilidade na qual as paredes que constituem a seção transversal mudam de forma com deslocamentos laterais senoidais, mas os ângulos entre essas paredes mantem-se inalterados, como exemplificado na Figura 1.

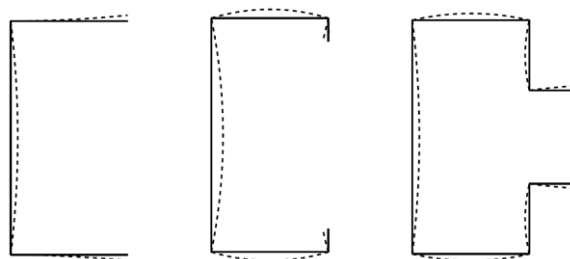


Figura 1. Flambagem local em seções U simples, U enrijecido e tipo Rack (ou garrafa).

O modo de flambagem distorcional se caracteriza pela perda de estabilidade na qual as alterações na seção transversal acontecem com deslocamentos de pelo menos um dos vértices, como pode ser visto na Figura 2.

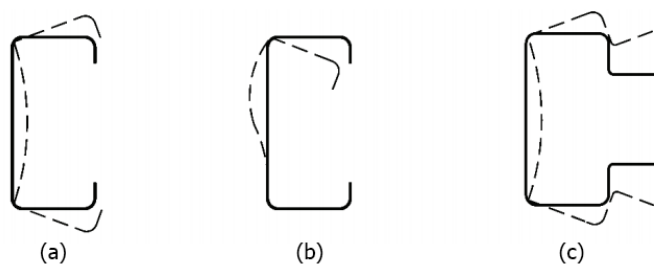


Figura 2. Flambagem distorcional: (a) U enrijecido sob compressão uniforme; (b) U enrijecido sob flexão simples; (c) Seção tipo rack sob compressão uniforme. (FONTE: NBR 14762:2010)

Com relação à flambagem global de elementos comprimidos, colunas, o modo se caracteriza quando o elemento perde estabilidade devido a deslocamentos laterais ao longo de seu comprimento. A flambagem global de elementos comprimidos pode ser: por flexão em torno de um dos eixos da seção transversal; por torção em torno do eixo longitudinal ou, por flexo-torção, situação em que os dois tipos de flambagem ocorrem simultaneamente.

1.3 Sistemas de armazenagem industrial

Os sistemas de armazenagem industrial, Figura 3, são estruturas utilizadas para armazenar produtos manufaturados e são conhecidos também como racks. Variam de pequenas estantes carregadas manualmente até estruturas de mais de 30 m de altura com carregamento automatizado (Godley, 1991). São, em geral, construídos em perfis formados a frio, com seções especialmente desenvolvidas para facilitar sua montagem e com perfurações ao longo de seu comprimento para facilitar as ligações.



Figura 3. Sistemas de armazenagem industrial. (FONTE: Águia, 2017)

Devido à utilização de perfis de seção esbelta, os elementos constituintes desses sistemas estão sujeitos aos fenômenos de instabilidade anteriormente citados. Além disso, a existência

das perfurações ao longo do comprimento dos elementos, modificam o comportamento estrutural bem como a capacidade de carga da estrutura.

A seção comumente utilizada para as colunas desses sistemas é a tipo rack ou garrafa, Figura 4, uma seção aberta que apresenta perfurações ao longo de seu comprimento. A existência dos flanges de ligação permite que os contraventamentos sejam fixados diretamente no perfil, sem a necessidade da inserção de novos elementos. Na Figura 5 é representado um exemplo da ligação das vigas (longarinas) e contraventamentos às colunas.

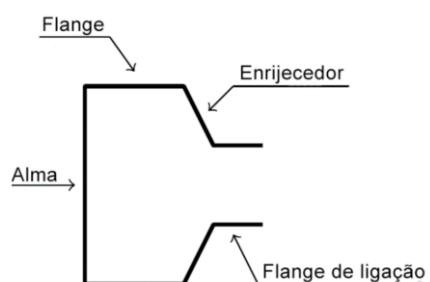


Figura 4. Seção tipo rack.



Figura 5. Fixação dos elementos. (FONTE: Neiva, 2017)

O estudo da influência das perfurações na estabilidade e carga última de elementos comprimidos visa dar continuidade às diversas pesquisas que tem sido realizadas nos últimos anos. A exemplo dos trabalhos de Schafer (2008), Souza (2013), Casafont (2016), Faria (2016), dentre outros.

2 ANÁLISE NUMÉRICA

A utilização de modelos numéricos na análise estrutural é de suma importância, uma vez que quando os mesmos estão calibrados com resultados experimentais, proporcionam economia em relação a redução ou eliminação de ensaios em laboratório. Para análise de estabilidade existem alguns métodos clássicos, como a Teoria Generalizada de Vigas, utilizando o software GBTul (Bebiano, 2008) e o Método das Faixas Finitas, via programa CuFSM (Schafer e Àdani, 2006). Todavia, os métodos anteriormente citados não permitem a avaliação de seções com perfurações, motivo pelo qual, neste trabalho foi utilizado o Método dos Elementos Finitos (MEF) via software ANSYS (Ansys, 2016).

2.1 Geometria e identificação das colunas

Foram estudadas 16 seções transversais tipo rack, variando-se a largura da alma, b_w , (80 mm, 90 mm, 110 mm e 120 mm) e a espessura da chapa, t , (1,4 mm, 1,8 mm, 2,25 mm e 3,0 mm), como indicado na Figura 6. Também foram considerados quatro tipologias de perfurações verticais e duas perfurações inclinadas, gerando um total de 66 modelos.

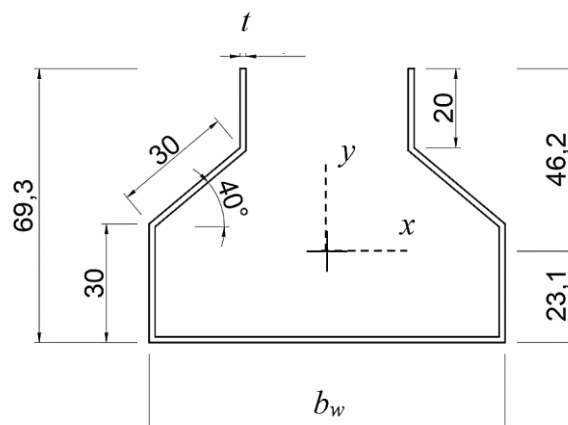


Figura 6. Dimensões da seção transversal dos modelos analisado (em milímetros).

Como foram utilizadas diversas seções, procurou-se criar uma nomenclatura que facilitasse a identificação das colunas e os parâmetros que foram variados (Tabela 1). Por exemplo, a coluna V-80-1,4-F10%, indica furo vertical, largura da alma da seção transversal, b_w , de 80 mm, espessura, t , de 1,4 mm e a existência de furo com altura igual a 10% de b_w .

Tabela 1. Nomenclatura utilizadas nos modelos.

Descrição: Q-WWW-XX-YYY-ZZ	
Q	Furos verticais: V
	Furos inclinados: I
WWW	Largura da alma (b_w): 80 mm, 90 mm, 110 mm e 120 mm
XX	Espessura da seção (t): 1,4 mm, 1,8 mm, 2,25 mm e 3,0 mm
YYY	Altura de furos de 10% a 40% de b_w : F10%, F20%, F30% e F40% (nomenclatura utilizada para os furos verticais)
	Altura de furos de 31 mm: F31mm (nomenclatura utilizada para os furos inclinados)
ZZ	Angulação dos furos: 10° ou 30°

Com relação às perfurações, na Figura 7 tem-se um esquema para as perfurações verticais. As alturas dos furos, variam de 10% a 40% da largura de alma utilizada. As outras dimensões e espaçamentos foram escolhidas de modo a fornecer uma correlação entre a perfuração e a largura da alma e proporcionar uma melhor adequação da malha utilizada nas análises.

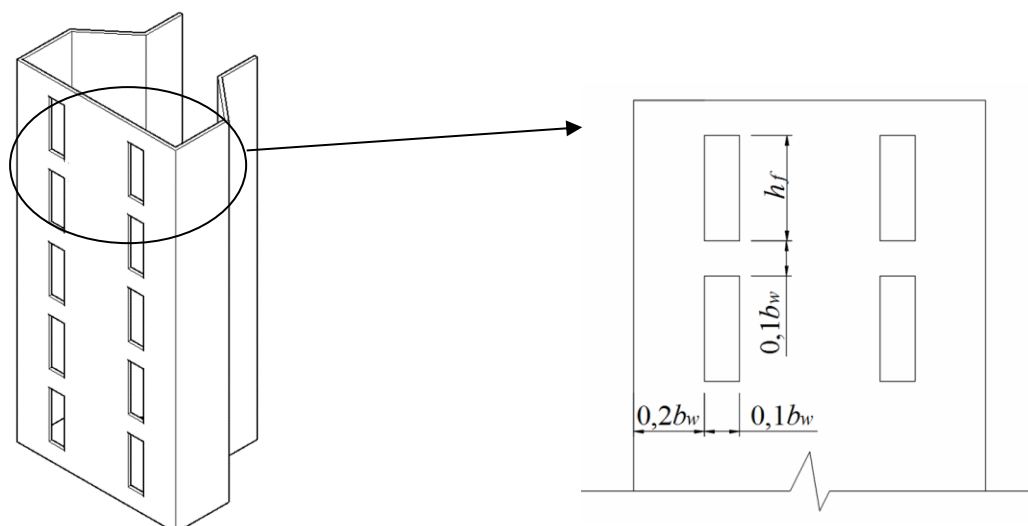


Figura 7. Perfurações verticais.

Para os furos inclinados (Figura 8), a altura do furo, h_f , têm valor constante e igual a 31 mm, independente da largura de alma utilizada. A inclinação entre os furos é igual a 10° ou 30° . As outras dimensões e espaçamentos apresentam valores constantes. A motivação para não variação dessas dimensões é a padronização em função da fixação da longarina na coluna, que é por meio das perfurações e são padronizadas para quaisquer dimensões.

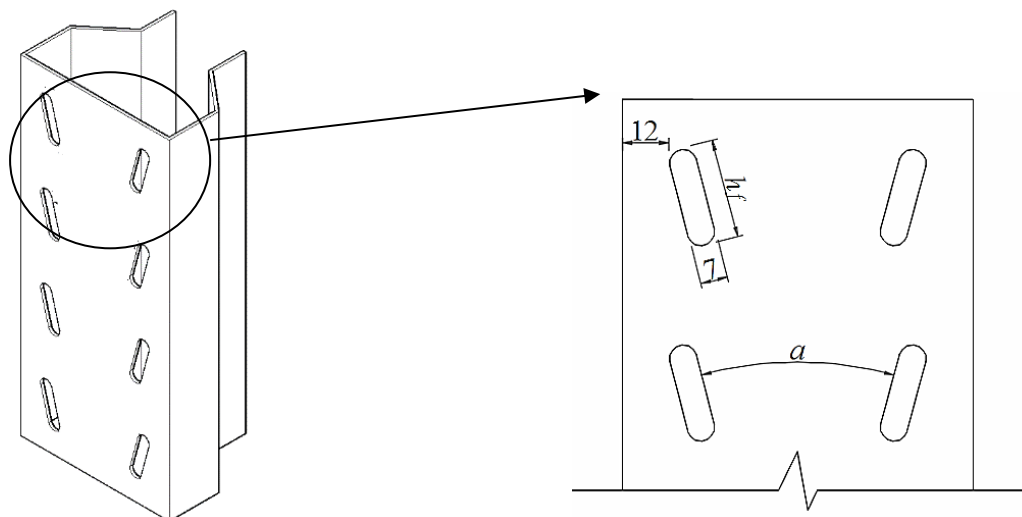


Figura 8. Perfurações inclinadas (valores em milímetros).

Na Figura 9 apresenta-se as seis tipologias de furos estudadas.

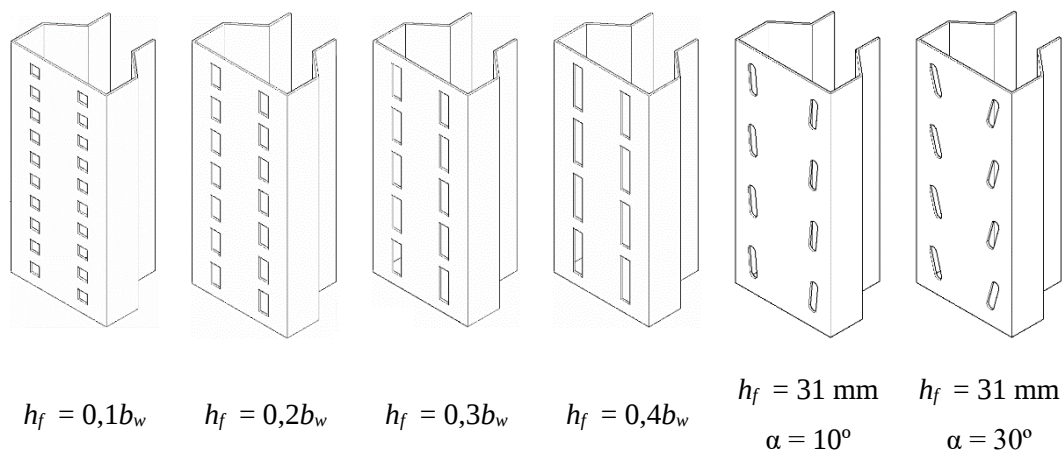


Figura 9. Tipologias de perfurações utilizadas nas análises numéricas.

2.2 Modelo de elementos finitos

O modelo numérico utilizando o Método dos Elementos Finitos tem como base os trabalhos de Souza (2013) e Faria (2016). O modelo é composto por uma coluna com seção do tipo rack, utilizando o elemento SHELL181 (Figura 10), conforme estudos anteriores (Souza, 2013) que preconizam a utilização do mesmo, uma vez que apresenta melhores resultados. Tal elemento possui quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó.

A fim de que o empenamento fosse restringido, foram modeladas chapas retangulares de 200 mm x 200 mm nas extremidades das colunas. As chapas são representadas pelo elemento SOLID45 (Figura 11), definido por oito nós, com três graus de liberdades (translações) em cada nó. Essas chapas foram modeladas para se comportarem como elementos de rigidez bastante elevada, a fim de que não se deformassem. Para isso, o módulo de elasticidade empregado nas mesmas foi cem vezes maior que aquele considerado no perfil.

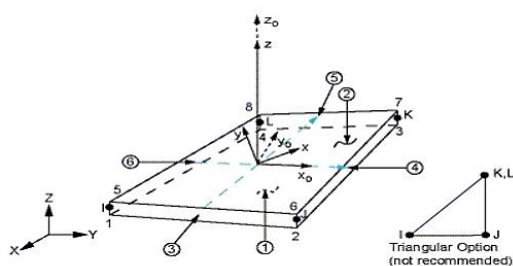


Figura 10. Elemento SHELL181.

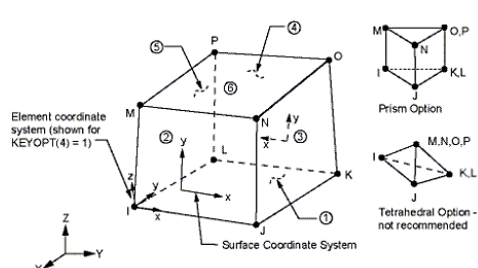


Figura 11. Elemento SOLID45.

De forma a aliar precisão de resultados, baixo custo computacional e uniformidade da malha, realizou-se um estudo de malhas, a fim de que tais condições fossem otimizadas. Para os elementos de superfície, foram utilizados elementos quadrangulares com lado igual a 10%

da largura da alma para os furos verticais (Faria, 2016) e elementos de 2,0 mm na região entre as perfurações inclinadas. A Figura 12 representa essas distribuições.

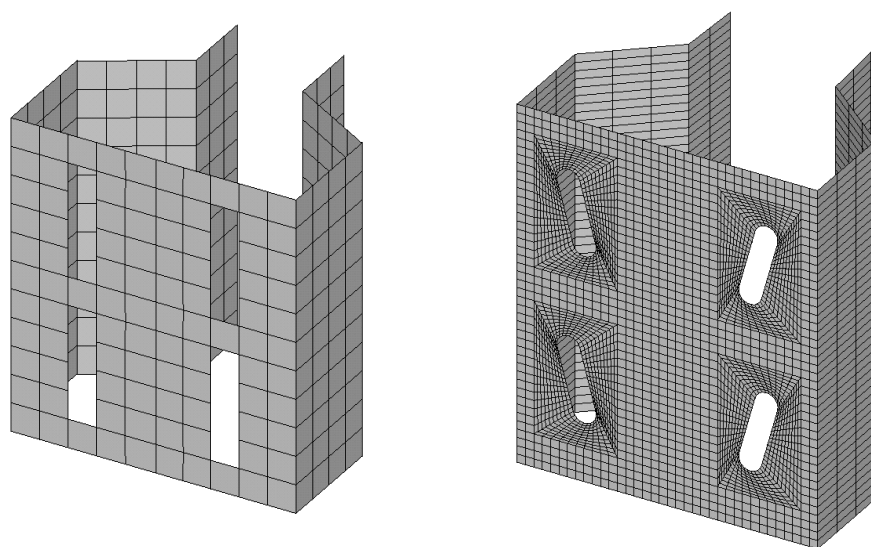


Figura 12. Distribuição da malha de elementos finitos das perfurações verticais e inclinadas.

Para os elementos de volume, utilizou-se uma malha mapeada, Figura 13, com volumes hexaédricos, com elementos de largura igual a 10% de b_w .

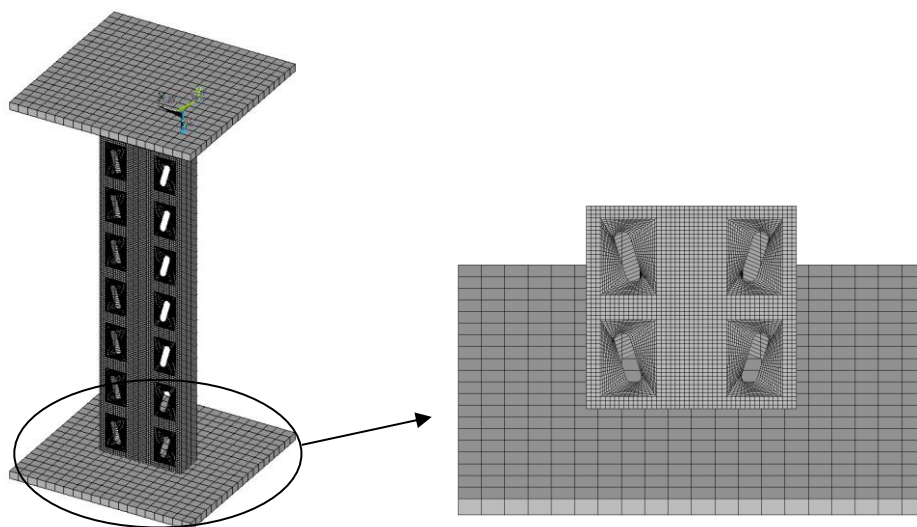


Figura 13. Distribuição da malha na chapa de extremidade.

As condições de contorno utilizadas simulam extremidades rotuladas, com empenamento restringido. Para tal, no modelo numérico os nós coincidentes da seção transversal da coluna com a chapa foram acoplados em todas as direções (Figura 14).

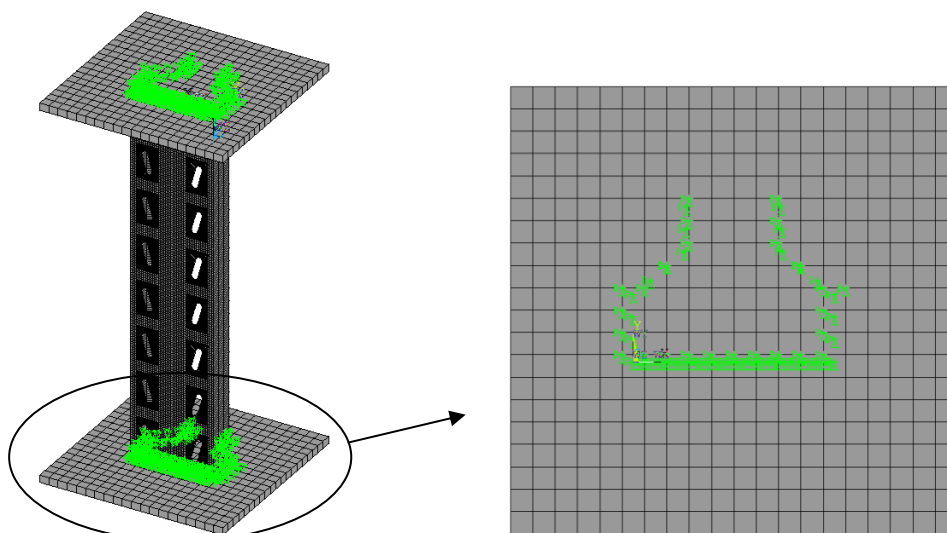


Figura 14. Acoplamento dos nós coincidentes da chapa e da coluna.

Para impedir a rotação da coluna em relação ao eixo longitudinal, foram inseridas duas restrições de deslocamentos em nós de cada uma das chapas de extremidade (Casafont, *et al.*, 2016). Em uma das chapas de extremidade, todos os graus de liberdade do nó correspondente à aplicação de carga são restringidos a fim de simular as reações. Na outra chapa, no respectivo ponto, apenas os dois deslocamentos no plano da chapa são restringidos e aplica-se o carregamento pontual, como pode ser visto na Figura 15.

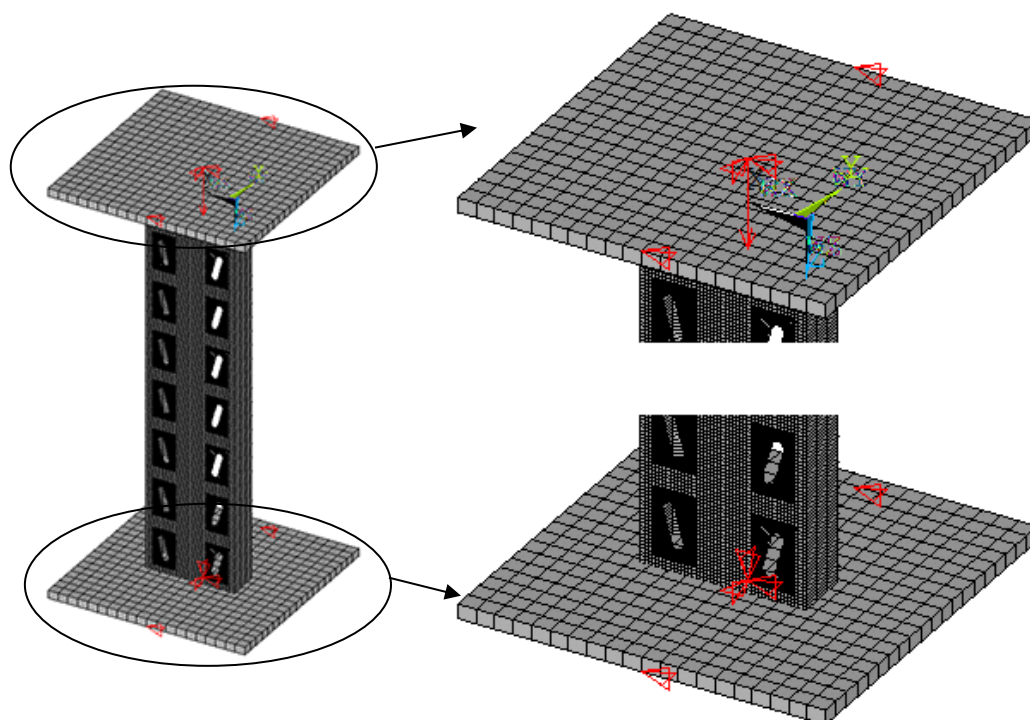


Figura 15. Restrição de deslocamentos e aplicação de força pontual no sentido longitudinal.

2.3 Análise estática linear e não-linear

De forma a propiciar a automatização da construção do modelo, variação dos parâmetros e realização de análise paramétrica, foi utilizada a linguagem de programação APDL (*ANSYS Parametric Design Language*) do software ANSYS.

Inicialmente foi realizada uma análise de flambagem elástica da seção tipo rack submetida à compressão centrada, na qual é resolvido o problema de autovalor e autovetor, de forma a serem obtidas as cargas críticas e os modos de flambagem associados. Posteriormente, realiza-se uma análise não-linear, em que as não-linearidades física e geométrica são inseridas.

Para a consideração da não-linearidade física foram inseridas as propriedades elastoplásticas do material, na qual utilizou-se um aço A36 ($f_y = 250$ MPa e $f_u = 400$ MPa), com um diagrama de tensão x deformação multilinear (Faria, 2016). A não-linearidade geométrica foi obtida atualizando a geometria das colunas com a introdução de imperfeições iniciais baseadas no primeiro modo de flambagem determinado na análise linear.

3 ANÁLISE DE FLAMBAGEM ELÁSTICA DA SEÇÃO

Nesta etapa, serão apresentados os valores das cargas críticas obtidas na análise linear realizada via ANSYS. Foram estudadas 66 colunas submetidas a carregamento de compressão centrada, com diversas esbeltezes da alma e tipologias de furos. Para cada seção determinou-se a primeira carga crítica de flambagem e o modo associado considerando os comprimentos variando de 100 mm a 3000 mm.

Na Figura 16 são apresentadas as curvas para o modelo com furos verticais V-80-1,4 com a indicação dos pontos de mudança do modo de flambagem predominante: local (ML), distorcional (MD) e global (MG).

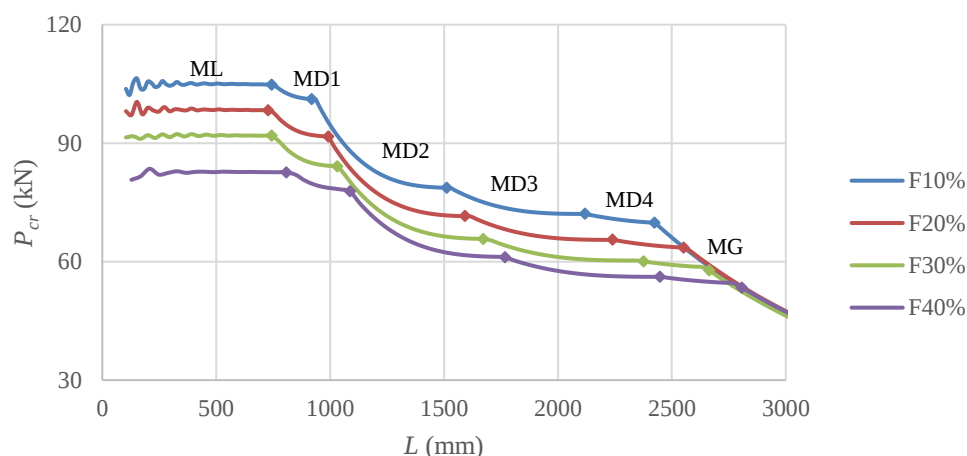


Figura 16. Relação entre as cargas críticas e comprimentos para modelos V-80-1,4.

Os modelos verticais apresentaram quatro modos distorcionais (D1, D2, D3 e D4), variando a quantidade de meias-ondas apresentadas, conforme apresentado na Figura 17.

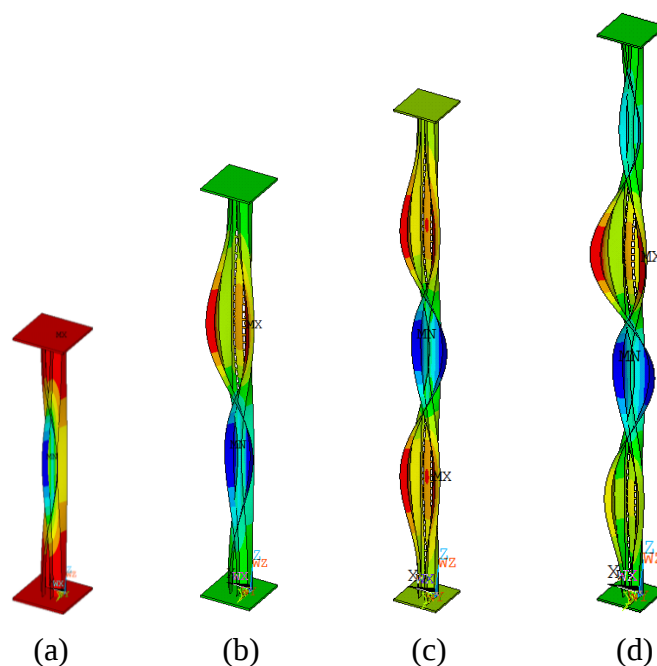


Figura 17. Modos distorcionais para furos verticais: (a) D1, (b) D2, (c) D3 e (d) D4.

Observando a Figura 16, percebe-se que a tendência do comportamento das curvas é similar e dependente da altura dos furos verticais, analisando uma mesma espessura. Para menores alturas de furo, como esperado, a carga crítica de flambagem da coluna é maior.

Observa-se que para comprimentos em que os modos predominantes são o local e distorional, a altura do furo influencia a carga crítica de flambagem. Todavia, conforme o modo de flambagem global se torna evidenciado, a altura do furo apresenta pouca influência na carga crítica, uma vez que as quatro curvas tendem para uma única curva. Comportamento similar foi observado nos outros modelos estudados.

Em relação ao modo global, para as seções com larguras de 80 mm e 90 mm, devido à pouca diferença do momento de inércia dos eixos principais, a flambagem global da coluna é de flexo-torção (Figura 18a). Para as larguras de 110 mm e 120 mm, como o restante das dimensões foi mantida, aumentando-se apenas a largura, a diferença entre as inércias dos eixos principais torna-se mais evidenciada. Isso faz com que o modo de flambagem global para esses casos seja por flexão em torno do menor eixo de inércia (Figura 18b).

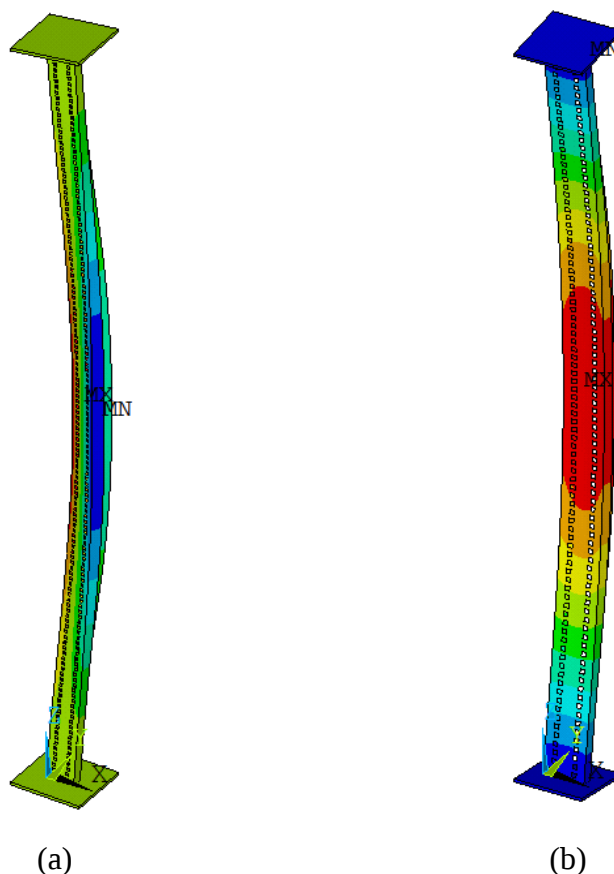


Figura 18. Flambagem global: por (a) flexo-torção e (b) por flexão em torno do eixo de menor inércia.

Em relação aos furos inclinados, na Figura 19 tem-se a representação das curvas de flambagem elástica das seis tipologias de perfurações para o modelo I-80-1,4, com a indicação dos pontos de mudança do modo de flambagem predominante.

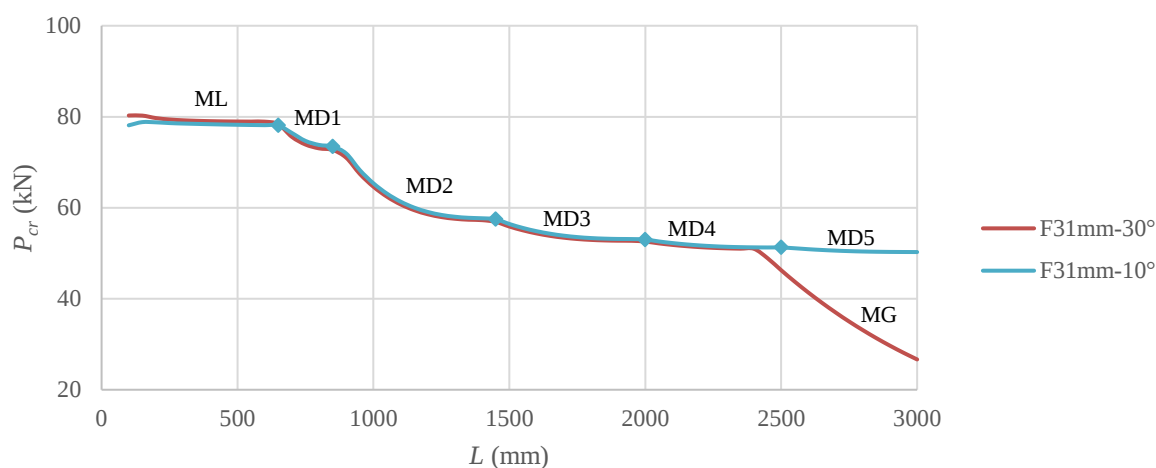


Figura 19. Relação entre as cargas críticas e comprimentos para modelos I-80-1,4.

Como pode ser observado, na região em que os modos local e distorcional são evidenciados, a angulação tem pouca influência na carga crítica de flambagem elástica, uma vez que as curvas para os pares com mesmas alturas de furo e inclinações distintas, praticamente coincidem. Comportamento semelhante foi observado nas outras larguras e espessuras estudadas.

4 ANÁLISE DE CARGA ÚLTIMA DA SEÇÃO

Nesta etapa, serão apresentados os valores das cargas últimas e modos de falha obtidos na análise não-linear realizada via ANSYS. Foram estudadas colunas submetidas a carregamento de compressão centrada, com diversas esbeltezes da alma e tipologias de furos. Para cada uma dessas seções, determinou-se a carga última da coluna, com comprimentos variando de 300 mm a 1500 mm. De forma que o modo distorcional foi o modo de falha mais frequente. A escolha do intervalo levou em consideração os comprimentos destravados usualmente encontrados nos sistemas de armazenagem.

Na Figura 20 são apresentadas as curvas de carga última para o modelo com furos verticais V-80, em função das diferentes espessuras e tamanhos de furos.

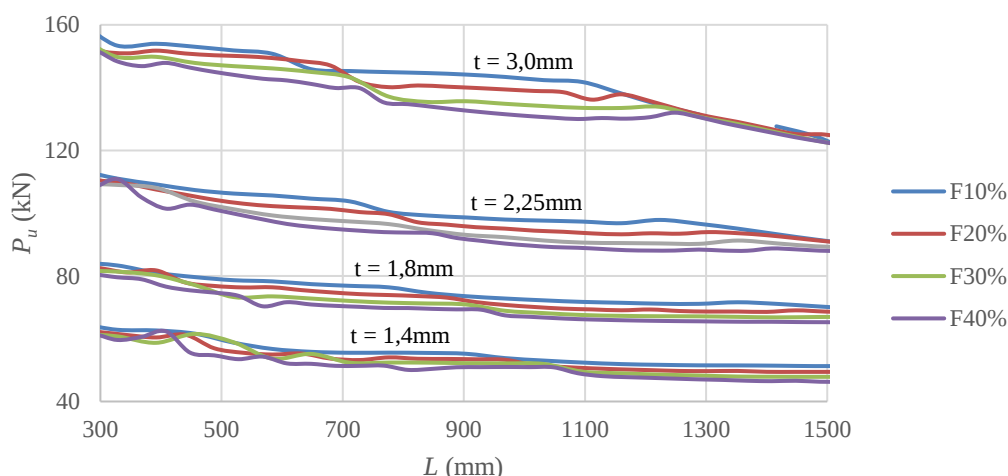


Figura 20. Relação entre as cargas últimas e comprimentos para modelos V-80.

Percebe-se que a tendência do comportamento das curvas para a tipologia de furos estudadas é semelhante. Para menores alturas de furos, a carga última da coluna é maior. Pode ser observado que conforme aumenta-se a espessura, a altura do furo influencia mais na dispersão dos valores de cargas críticas. Isso é associado que com o aumento da espessura a perda de área, para um mesmo tamanho de furo, se torna mais evidente.

Para as seções com furos inclinados, como as colunas com elevadas esbeltezes de placa apresentaram acoplamento do modo local e distorcional, optou-se por excluir da análise não-linear as seções com espessuras de 1,4 mm e 1,8 mm com larguras de 110 mm e 120 mm. Também foram excluídas as seções com espessuras de 2,25 mm e 3,0 mm com larguras de 80 mm e 90 mm, pois apresentaram menos efeitos de instabilidade em função de menor esbeltez da seção.

Na Figura 21 são apresentadas as curvas para o modelo com furos inclinados I-80-F31mm, em função das diferentes espessuras e tamanhos de furos.

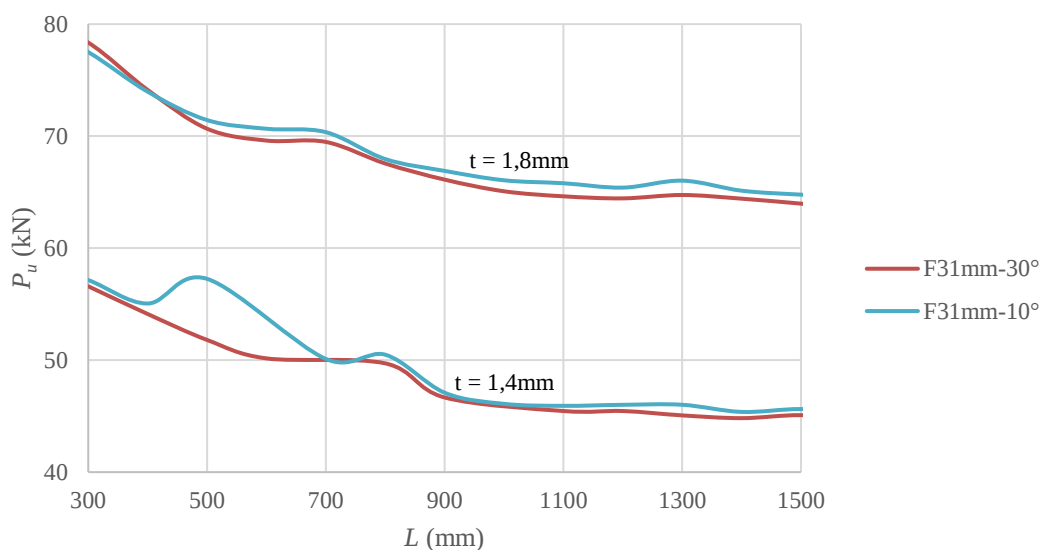


Figura 21. Relação entre as cargas últimas e comprimentos para modelos I-80-F31mm.

Pode ser observado que as angulações, considerando os comprimentos estudados, não têm influência significativa na carga última das colunas. A menor angulação apresenta cargas ligeiramente maiores que a inclinação de 30°. Tal fato está condizente com os resultados da análise linear, em que os pares de curvas com mesmo tamanho de furo apresentavam comportamento similar para essa ordem de comprimentos.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência das perfurações na estabilidade e carga última dos perfis formados a frio do tipo rack sob carregamento centrado. As colunas estudadas apresentam variações na seção transversal e nas perfurações ao longo dos seus comprimentos, gerando 66 modelos distintos de colunas. A influência das perfurações no comportamento estrutural das colunas foi considerada via análises numéricas utilizando o Método dos Elementos Finitos via ANSYS.

Observou-se que, como esperado, as perfurações verticais assim como as inclinadas influenciam na carga crítica e na carga última das colunas, reduzindo seus valores. Mantendo-se constante a largura da alma, b_w , notou-se que conforme aumenta-se a espessura, a altura do furo influencia mais na dispersão dos valores das cargas crítica e última. Isso é associado que com o aumento da espessura, a perda de área, para um mesmo tamanho de furo, se torna mais evidente.

Em relação aos furos inclinados, percebeu-se que considerando o intervalo de comprimentos utilizados (até 1500 mm), as angulações não têm influência significativa na carga últimas das colunas estudadas. A menor angulação, 10°, apresenta cargas ligeiramente maiores que a inclinação de 30°.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) e a UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto).

REFERÊNCIAS

- Águia, 2017. Disponível em < <http://www.aguiasistemas.com.br/aguiasistemas/>>.
- ANSYS, 2016. User's Manual. Swanson Analysis Systems Inc. Inc., Houston, PA.
- Batista, E. M., 2010. *Effective section method: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local-global buckling interaction*. Thin - Walled Structures 47, 345–356.
- Bebiano R.; Pina P.; Silvestre N.; Camotim D., 2008. *GBTUL – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members*, DECivil/IST, Technical University of Lisbon (<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>).
- Casafont, M.; Bonada, J.; Roure, F.; Pastor, M. M., 2016. *Distortional Influence of Pallet Rack Uprights Subject to Combined Compression and Bending*. Structures 8, 275-285.
- Faria, V. O., 2016. *Análise de estabilidade de perfis formados a frio com perfurações*. Dissertação de Mestrado, PROPEC – UFOP.
- Godley, M.H. R., 1991. *Storage Racking In Design of Cold Formed Steel Members*. Chapter 11, Ed Rhodes. Elsevier Applied Science, Amsterdam. pp. 361-399.
- NBR 14762, 2010. *Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio*.
- Neiva, L. H. A., 2017. *Análise da influência da variação de perfurações no comportamento e capacidade de carga de perfis formados a frio de seção tipo rack*. Dissertação de Mestrado, UFOP.
- Sarmanho, A. M. C., 1991. *Estudo do Comportamento Pós-Crítico de Paredes Esbeltas de Perfis Metálicos*. Dissertação de Mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Schafer, B., 2006. *Designing cold-formed steel using the direct strength method*. 18th International Specialty Conference on Cold Formed Steel Structures, Orlando, Florida.
- Schafer, B., 2008. *Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design*. Journal of Constructional Steel Research 64, p.766-778.
- Schafer, B., Ádani, S., 2006. *Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained methods*. 18th International Specialty Conference on Cold Formed Steel Structures, Orlando, Florida.
- Souza, F. T., 2013. *Análise Teórico-Experimental da Estabilidade de Colunas Perfuradas em Perfis de Aço Formados a Frio em Seções Tipo Rack*. Tese de Doutorado, UFOP.