



ESTABILIDADE E RESISTÊNCIA ESTRUTURAL DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO COM SEÇÕES ENRIJECIDAS

João Pedro M. Garcia

Eduardo de M. Batista

joaopedro@coc.ufrj.br

batista@coc.ufrj.br

Programa de Engenharia Civil – COPPE – UFRJ

Centro de Tecnologia - Av. Horácio Macedo, s/n - Cidade Universitária, 21941-450, Rio de Janeiro, Brasil

Juarez M. S. Franco

juarezfranco@ufrj.br

Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rodovia BR 465, Km 07, s/n - Zona Rural, Seropédica – RJ, Brasil

Resumo. Este artigo apresenta os resultados de estudo numérico-computacional sobre a resistência à flexão de perfis trapezoidais enrijecidos de aço. Perfis abertos de aço formados a frio são sujeitos à flambagem elástica segundo modos Local, Distorcional e Global, os quais podem ser obtidos por ferramentas computacionais. Este estudo adota a implementação CUFSM do Método das Faixas Finitas para a análise da flambagem elástica. As formulações para a predição da resistência destes perfis relacionam os momentos críticos associados a cada um desses modos, incluindo suas possíveis interações com o momento de início de plastificação (M_y) da seção transversal. Em estudos anteriores, os autores concluíram que as soluções de mais alto desempenho apresentam valores aproximadamente iguais de momento crítico (M_{cr}) para modos local e distorcional. Adicionalmente, foram encontrados modos de flambagem cuja identificação modal não se adequa claramente aos critérios previstos na literatura. Para esclarecer estes temas, este artigo foi dividido em duas etapas. Na primeira parte, é realizado um estudo paramétrico de estabilidade elástica e resistência de chapas enrijecidas, considerando configurações variáveis de enrijecedores, com revisão bibliográfica sobre critérios de identificação modal nestes elementos. Na segunda parte, são analisados perfis trapezoidais enrijecido gerados pela associação de diferentes placas enrijecidas.

Palavras-chave: Perfis de aço formados a frio, modos de flambagem, seções trapezoidais corrugadas, seções enrijecidas

CILAMCE 2017

Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering
P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil,
November 5-8, 2017.

INTRODUÇÃO

Os perfis de aço formados a frio (PFF) são esbeltos, leves e eficientes; além da facilidade de pré-fabricação e produção em massa, permitem montagem rápida e fácil instalação. Em contraposição a esta praticidade, estes perfis apresentam comportamentos de estabilidade que devem ser considerados pelos engenheiros, como a flambagem das paredes finas das seções transversais que desenvolvem modos locais (L) e distorcionais (D), além da flambagem global (G) (por exemplo, flexão, torção ou flexo torção) da barra. As soluções clássicas para esses modos de flambagem e predição da resistência destes perfis relacionam os momentos críticos associados a cada um dos modos L, D e G e suas possíveis interações com o momento de início de plastificação (M_y). Contudo, elas se tornam excessivamente trabalhosas para o modo distorcional. É previsto na literatura que a interação entre os modos de flambagem pode provocar degradação da resistência da peça, tornando-se mais pronunciada quando a diferença entre os valores de momentos críticos é suficientemente pequena e os comprimentos de semi-onda dos modos L e D são múltiplos entre si.

De acordo com Malite et al. (1998), estes perfis passaram a ser amplamente utilizados para telhados apenas a partir do final dos anos 60 com a implantação da NB -143/67 – Cálculo de estruturas de aço constituídas por perfis leves (ABNT, 1967), e a relação entre diversas variáveis geométricas e de fabricação com seu comportamento mecânico ainda não está completamente compreendido.

Os perfis de aço corrugados aplicados a coberturas, conforme apresentado na Fig. 1, estão normalmente sujeitos à flexão simples. Seus projetos baseiam-se na capacidade resistente à flexão e limitação dos deslocamentos verticais (flecha admissível). Esses perfis são muito leves e esbeltos e os elementos que compõem sua seção transversal possuem uma elevada relação largura/espessura.

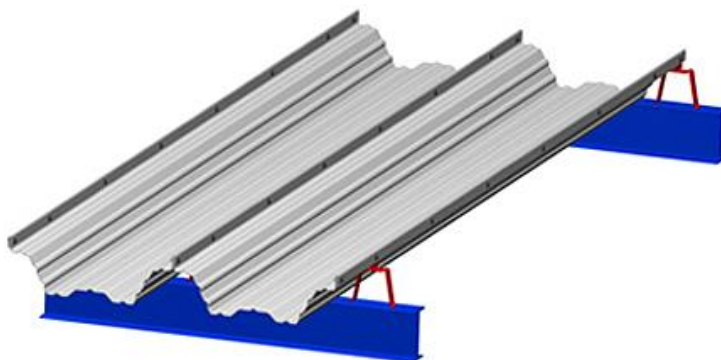


Figura 1. Perfil de aço corrugado conforme sistema de telhamento ortotrópico

Este trabalho concentra-se na contribuição de aspectos geométricos sobre a resistência destes perfis, com especial atenção aos seus enrijecedores transversais. Para esclarecer os temas de identificação modal nestes perfis, este artigo foi dividido em duas etapas. Na primeira parte, é realizado um estudo paramétrico de estabilidade elástica e resistência de chapas enrijecidas, considerando configurações variáveis de enrijecedores com duas, três ou quatro dobras, com

revisão bibliográfica sobre critérios de identificação modal nestes elementos. Na segunda parte, são analisados perfis trapezoidais com ou sem enrijecedores.

A revisão bibliográfica permitiu identificar limitações de algumas formulações matemáticas e destacar que diferentes experimentos para as mesmas geometrias de perfil de aço corrugados chegaram a resultados distintos, conforme apresentados em (Xu et al., 2001), (Cybulski et al., 2014) e (Piekarczyk et al., 2015).

A maioria das necessidades relativas à identificação modal está associada ao requisito de cálculo das tensões de flambagem para modos locais, distorcionais e globais. Uma vez que as tensões críticas para os modos globais são relativamente fáceis de calcular para a maioria dos casos práticos, a pesquisa da identificação de modos locais e distorcionais e o cálculo das tensões de flambagem correspondentes torna-se mais relevante. Os métodos de projeto de praticamente todos os procedimentos de dimensionamento modernos para perfis formados a frio exigem o valor destas tensões para os modos local e distorcional, e é fácil demonstrar que os projetos destes perfis são dependentes dos cálculos adequados das tensões de flambagem. Para que o estudo de perfis corrugados esteja correto, então há a necessidade de (i) definições claras e sem ambiguidades para os modos de flambagem local, distorcional e global, (ii) determinar a importância das dobras entre os elementos de placa que compõem o perfil e (iii) esclarecer a influência dos enrijecedores na determinação dos modos puros e/ou de suas interações.

Entre os resultados encontrados por este estudo, foi possível perceber que através de certas configurações de enrijecedores no perfil corrugado com seção trapezoidal, tem-se a presença de dois modos de flambagem distorcionais. E através do comparativo de soluções para o cálculo de resistências através dos métodos de elementos finitos, faixas finitas e da resistência direta, pode-se perceber a necessidade de compatibilizações entre esses procedimentos, visto que o da resistência direta não está calibrado para o cálculo de perfis com este tipo de seção. Embora sejam relevantes para o projeto de coberturas com estes perfis, os efeitos da deformação a frio sobre as propriedades do aço e as ações de vento sobre a estrutura não foram abordados neste artigo.

1 MODOS DE FLAMBAGEM

1.1 MÉTODO DAS FAIXAS FINITAS SEGUNDO O PROGRAMA COMPUTACIONAL CUFSM

Entre as principais ferramentas computacionais para a determinação dos modos de flambagem em perfis abertos de aço formados a frio (PFF) encontram-se (i) GBTul (Bebiano et al., 2008), baseado na Teoria Generalizada de Vigas (Schardt, 1989) e (ii) o CUFSM (Li & Schafer, 2010), uma implementação do Método de Faixas Finitas (MFF). Ambos os métodos relacionam o modo de flambagem de menor valor de carga crítica a diferentes comprimentos do elemento de barra em um gráfico chamado curva de assinatura, como ilustrado na Fig. 2. Os pontos de mínimo desta curva são de especial interesse no dimensionamento de PFF. Em geral, estes programas são capazes de associar a cada um deles as participações (L, G ou D) atuantes em cada modo de flambagem, o que permite ao projetista identificar o modo predominante e estimar, através de curvas de resistências apropriadas, a capacidade destas colunas e vigas. Em

alguns casos particulares, no entanto, a experiência do projetista é requerida para classificar os modos onde os critérios canônicos se mostram ambíguos. Como a automação do projeto de PFF requer métodos passíveis de implementação computacional, parte desta pesquisa dedica-se a superar estas ambiguidades para vigas trapezoidais enrijecidas, uma tipologia bem definida de PFF, embora pouco estudada experimentalmente.

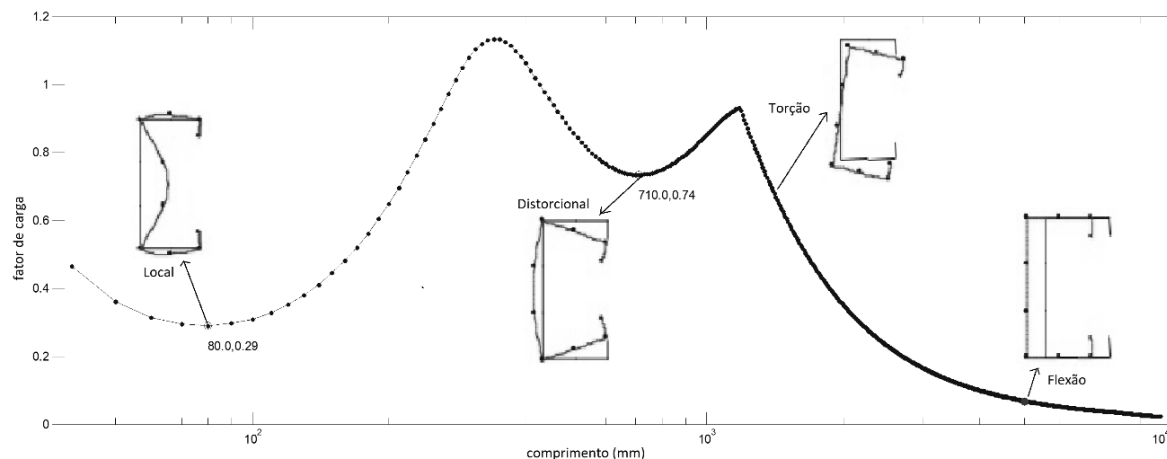


Figura 2. Curva de flambagem típica obtida com o programa computacional CUFSM

O modo de flambagem representa a configuração deformada de um perfil sob compressão quando ocorre perda de equilíbrio, sendo caracterizado por uma deformação lateral repentina de um ou mais de seus elementos estruturais. Para realizar análise de faixa finita, o perfil é carregado por forças normais (P) ou momentos fletores (M) em suas extremidades e o fator de carga (LF_i – sendo i referente a cada um dos modos de flambagem) obtido por essa análise multiplicado por estas cargas apresentam o valor crítico de resistência, segundo Eq. 1 e 2.

$$P_{cr} = LF_i P \quad (1)$$

$$M_{cr} = LF_i M \quad (2)$$

1.2 Determinação dos modos de flambagem

Como já pontuado anteriormente, a classificação automática dos modos apresenta ambiguidades em casos particulares. Esta seção faz uma breve caracterização de L, D e G e apresenta exemplos, encontrados nesta pesquisa, onde os critérios canônicos contradizem a experiência do projetista.

Na flambagem global (G) de uma barra, sua seção transversal não sofre alteração da geometria inicial, de acordo com a teoria clássica de vigas. O modo global possui uma resistência pós-flambagem muito pequena, que está relacionada às propriedades geométricas do perfil (momento de inércia, constantes de torção e de empenamento), à excentricidade da carga aplicada e às condições de contorno da barra. Maiores detalhes sobre este modo podem ser encontrados em Timoshenko (1963).

A flambagem local (L) é um modo referente a deformação de placas isoladas que pode ocorrer em um ou mais elementos de um perfil formado a frio e se caracteriza por deslocamentos fora do plano dos elementos de placa sem a translação das linhas de intersecção

adjacentes aos elementos de placa. O modo local dos elementos de um perfil pode ser tratado de forma análoga ao de uma placa isolada, levando-se em conta a interação entre os elementos através de vinculação elástica das bordas da placa.

A predominância do modo local (L) sobre os demais depende das condições de contorno e da esbeltez das paredes do perfil, definida como a razão entre largura e espessura (b/t) dos elementos. Este modo apresenta pequenos comprimentos de meia onda, na ordem de magnitude da largura dos elementos de placa individuais. Perfis que flambam localmente podem possuir grande resistência pós-flambagem, dependendo dos valores da tensão crítica de flambagem elástica de seus elementos e da resistência ao escoamento do aço com os quais são fabricados. Sua interação com outros modos é um fenômeno recorrente.

Além da flambagem local, os elementos de um perfil estão sujeitos à flambagem distorcional. Nesse modo, ocorre a distorção nas seções transversais que envolvem a translação de pelo menos um dos nós de intersecção adjacentes aos elementos de placa. Geralmente, o modo distorcional apresenta comprimentos de meia onda com valores intermediários entre os modos global e local e oferece uma reserva de pós-flambagem menor do que a apresentada por perfis que sofrem flambagem local.

De forma geral, pode-se adotar como método para a realização da identificação modal de perfis o estudo desenvolvido por Schafer e Ádány (2006), que considera três regras diferentes para a classificação dos modos de flambagem global (G), distorcional (D), local (L) e outros (O, modo que não atende nenhum dos critérios pré-definidos), como apresentado na Tab. 1. O critério #1, baseado nos estudos de Vlasov (1961), é atendido quando a tensão de cisalhamento e a tensão transversal da membrana no plano são nulas, bem como os deslocamentos longitudinais são lineares no eixo transversal no interior do elemento.

Tabela 1. Critérios de classificação modal

	Modo G	Modo D	Modo L	Modo O
Critério #1 – hipótese de Vlasov	Sim	Sim	Sim	Não
Critério #2 – deformação longitudinal	Sim	Sim	Não	-
Critério #3 – seção transversal não distorcida	Sim	Não	-	-

As características e identificação dos modos de flambagem local, distorcional e global são discutidas de forma mais específica em (Hara, 2000), (Ádány, 2004), (Schafer & Ádány, 2005) e (Ádány et al., 2010).

Como esclarecimento para este estudo, tem-se que os modos de flambagem L, D, G e O são considerados como puros. Contudo, as suas curvas de assinatura obtidas pelos CUFSM e GBT raramente as classificam como tais, mas sim como combinações destes em proporções variadas. Ambos os programas são capazes de estimar a proporção de cada um desses modos puros em seus resultados, e a esta relação denomina-se participação modal. A exemplo de demonstração desta aplicação, observa-se na Fig. 3 a curva de assinatura referente a um perfil trapezoidal sem enrijecedores, em que o primeiro ponto de mínimo apresenta participação

modal parecidas dos modos local e distorcional. Desta forma, tem-se que este pode ser classificado como distorcional devido ao valor do comprimento de meia onda, e local quando se observa a forma de seu modo de flambagem.

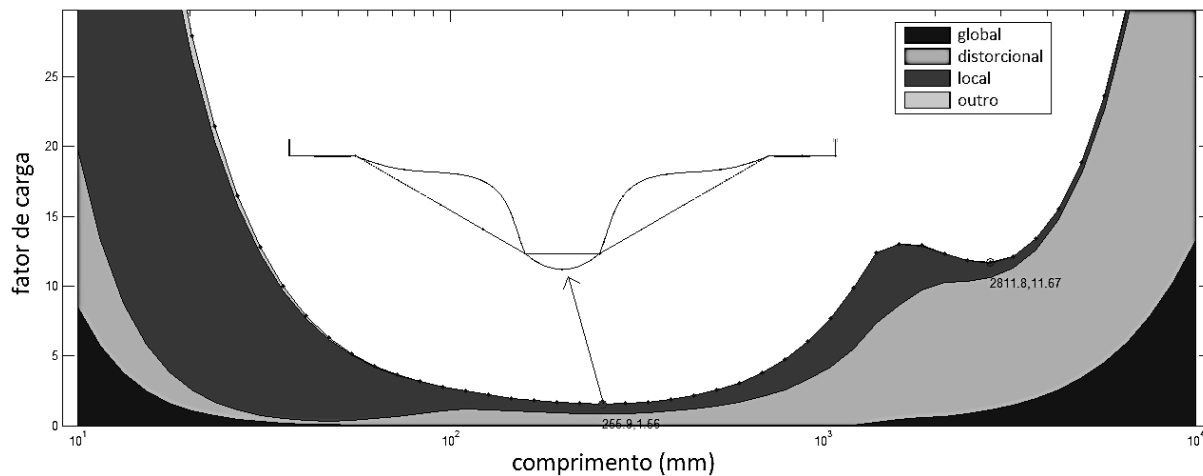


Figura 3. Identificação modal de um perfil trapezoidal sem enrijecedores

É importante ressaltar que a forma com que estes perfis flambam, indicadas nestas curvas de assinatura, são combinações dos chamados “modos puros”. Existem diversos critérios automáticos para a estimativa da participação modal que, eventualmente, apresentam resultados distintos entre si.

Segundo Li et al. (2011) a precisão na decomposição e identificação modal do MFF depende da escolha de base, ortogonalização e normalização pelos métodos vetorial, de energia de deformação e de trabalho. As definições mecânicas usadas para separar as deformações levam a espaços vetoriais únicos para cada um dos modos de flambagem, embora a escolha da base e da norma dentro deste não o seja. O programa CUFSM oferece todas estas alternativas.

2 GERAÇÃO DAS SEÇÕES

Na primeira etapa desta pesquisa, voltada para a influência de variáveis geométricas sobre os modos de flambagem e resistência em PFF, realizou-se um estudo de chapas isoladas, com enrijecedores de duas, três e quatro dobras (ver Fig. 4). Foram consideradas em todas as chapas o módulo de elasticidade constante ($E=200 \text{ GPa}$), projeção horizontal com largura constante de 100,00 mm e variação da altura do enrijecedor (h) entre 1,00 e 20,00 mm, a intervalos de 1,00 mm. No caso do enrijecedor trapezoidal, a largura da parede intermediária (m) foi considerada constante e igual a 5,00 mm. Esta variação das configurações dos enrijecedores permitiu relacioná-los com as suas tensões críticas.

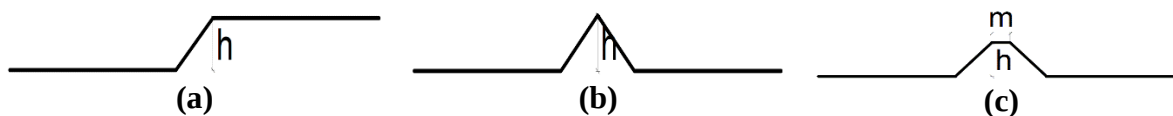


Figura 4. Chapa isolada com enrijecedor (a) duas, (b) três e (c) quatro dobras

Um segundo estudo foi dirigido aos perfis trapezoidais enrijecidos formados por placas associadas, com base nos modelos e análises realizadas em estudos anteriores, (Melo et al., 2016) e (Franco & Batista, 2017), voltados a determinação das características geométricas de perfis de mais alto desempenho. Os resultados estão relacionados ao comportamento de flambagem elástica do perfil trapezoidal fabricado a partir de bobina de chapa de aço com 1200 mm de largura e 1,0 mm de espessura e desempenho estrutural sob efeito de flexão. Foi realizada uma análise com a ajuda de um método combinado de gramática de formas e de faixa finita, permitindo identificar os principais modos de flambagem e determinar os efeitos dos parâmetros geométricos do perfil com maior influência no comportamento destes modos com o intuito de buscar o perfil de melhor desempenho possível. Com relação a estes estudos, podem-se destacar os seguintes aspectos: (i) a taxa de cobertura (C_{ov}) e o momento crítico dos perfis são objetivos geralmente conflitantes; (ii) a proporção entre as larguras das mesas superiores e das almas dos perfis apresenta uma curva com ponto de máximo carregamento crítico; (iii) a determinação do tipo de enrijecedores intermediários das mesas e da alma tem grande influência sobre o comportamento de flambagem e resistência dos perfis; (iv) com relação aos enrijecedores trapezoidais, a variação da configuração de suas larguras superiores, distribuição, quantidade e distância entre enrijecedores possuem impacto sobre o comportamento de resistência destes perfis.

Os resultados referentes à análise de flambagem indicaram que o acoplamento entre modos está mais vinculado à configuração geométrica dos enrijecedores do que a inclinação da alma. Neste contexto, verificou-se que os enrijecedores intermediários trapezoidais (com quatro cantos dobrados) nas mesas e almas dos perfis apresentaram os maiores efeitos sobre o carregamento crítico.

3 MODELOS MEF

O Método dos Elementos Finitos (MEF) implementado no software ANSYS® (2015) foi empregado neste trabalho para estudo de flambagem e análise não linear (geométrica e de material) com a adoção da formulação SHELL181. Este modelo é próprio para elemento do tipo casca/placa, caracterizada por elementos de quatro nós com seis graus de liberdade em cada um, com translações e rotações sobre três eixos ortogonais, considera as deformações na espessura da placa e é adequado para aplicações em estruturas que apresentem grandes rotações, comportamento com deformação linear e/ou casos de deformação fortemente não-linear. No domínio do elemento, a formulação oferece os esquemas de integração completo e reduzido.

Foi adotado um modelo de viga simplesmente apoiada nas extremidades e submetida a flexão pura associada a carregamento de sucção do vento, com compressão na mesa inferior e tração na mesa superior (ver Fig. 5). As não-linearidades geométricas e de material (curva bilinear tensão-deformação) são consideradas nas análises, que são resolvidas aplicando o método do controle com arco, desenvolvido por Riks (1979). As imperfeições geométricas da

seção transversal são introduzidas nos modelos, por um fator de 10% da espessura da parede como magnitude máxima desta irregularidade.

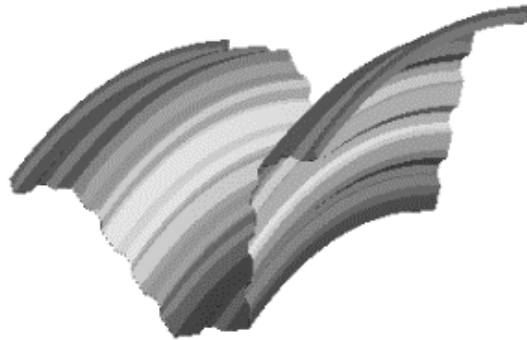


Figura 5. Configuração deformada associada ao esforço de sucção de vento no perfil corrugado

As primeiras análises não lineares para estimativa da resistência foram realizadas em diferentes configurações de viga sem enrijecedores intermediários onde as imperfeições iniciais correspondem aos respectivos modos de flambagem dominantes. Estudos posteriores foram realizados com perfis enrijecidos, obedecendo aos mesmos procedimentos.

As resistências dos modelos analisados obtidas pelo MEF foram comparadas com os resultados obtidos por fórmulas fechadas, segundo formulação proposta por Batista (2009, 2010) e adotada na Norma Brasileira para dimensionamento de perfis formados a frio ABNT (2010). Adicionalmente, optou-se por aplicar neste estudo o método da resistência direta (MRD) para o cálculo de resistência dos exemplos estudados, com o intuito de validar os resultados obtidos por estes outros métodos. Um dos objetivos desta pesquisa é a qualificação dos perfis corrugados com seções trapezoidais para o MRD.

A estimativa da resistência a flexão pelo MRD baseia-se no cálculo do menor valor entre momento fletor resistente associado à flambagem global (Eq. 3), à flambagem local (Eq. 4) e à flambagem distorcional (Eq. 5). O momento fletor resistente associado à flambagem global (M_{Re}) é dado pela expressão.

$$M_{Re} = W f_y \quad (3)$$

Onde:

W é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento;

f_y é a resistência ao escoamento do material

O momento fletor de resistência na flambagem local, por sua vez (M_{Rl}) é obtido através da seguinte formula:

$$\begin{aligned} M_{Rl} &= M_{Re} && \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \\ M_{Rl} &= \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \frac{M_{Re}}{\lambda_l^{0,8}} && \text{para } \lambda_l > 0,776 \end{aligned} \quad (4)$$

Onde:

$$\lambda_l = \left(\frac{M_{Re}}{M_l} \right)^{0,5}$$

λ_l é o índice de esbeltez reduzido associado a flambagem local

Por fim, o momento fletor de resistência na flambagem distorcional (M_{Rdist}) é dado por:

$$\begin{aligned} M_{Rdist} &= W f_y && \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,673 \\ M_{Rdist} &= \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}} \right) \frac{W f_y}{\lambda_{dist}} && \text{para } \lambda_{dist} > 0,673 \end{aligned} \quad (5)$$

Onde:

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{W f_y}{M_{dist}} \right)^{0,5}$$

λ_{dist} é o índice de esbeltez reduzido associado a flambagem distorcional

Claramente, temos então que a resistência é dada pelo mínimo:

$$M_R = \min(M_{Re}, M_{Rl}, M_{Rdist})$$

4 RESULTADOS

4.1 Chapas isoladas com enrijecedores

Na primeira etapa deste estudo foram realizadas análises de estabilidade elástica em CUFSM de chapas isoladas com enrijecedores. As curvas de assinatura destes modelos apresentaram dois modos de flambagem predominantes, que foram denominados modos 1 e 2 (Fig. 6).

Com relação aos estudos referentes à base, ortogonalização e normalização tem-se que o MFF com uma base modal apresenta bons paralelos com a Teoria Generalizada de Vigas. A normalização dos vetores de base tem um impacto nos resultados da identificação modal e a normas vetorial e de trabalho se apresentam como opções viáveis. A Tab. 2 apresenta as disparidades de resultados obtidos através de cada um desses métodos.

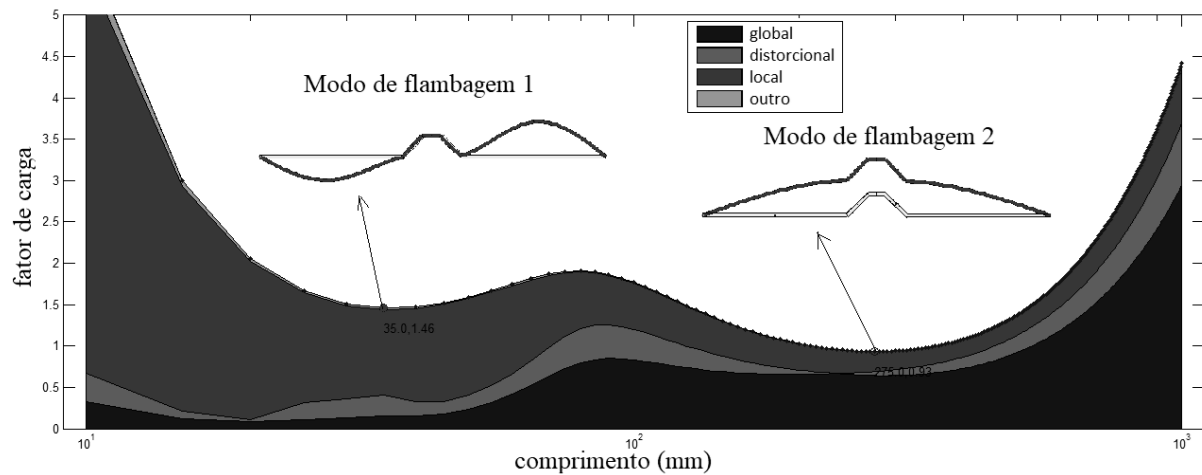


Figura 6. Curva de assinatura e modos de flambagem do perfil com enrijecedores trapezoidais ($h=6,00$ mm)

Tabela 2. Porcentagem de participação modal para chapa com enrijecedor triangular ($h=5,00$ mm) referentes à base, ortogonalização e normalização

Norma	Base	Modo de flambagem 1			Modo de flambagem 2		
		Global (%)	Distorcional (%)	Local (%)	Global (%)	Distorcional (%)	Local (%)
Vetorial	Natural	27,9	12,7	57,6	66,8	3,3	29,6
	Modal	25,4	11,6	62,1	67,5	3,3	29,1
Energia de deformação	Natural	8,0	4,7	65,6	3,8	0,4	85,3
	Modal	21,1	12,3	48,3	38,6	3,8	40,7
Trabalho	Natural	28,2	13,2	57,5	70,2	3,6	26,0
	Modal	26,5	12,4	60,3	68,3	3,5	28,2

Particularmente relevantes para esta pesquisa são os casos onde (i) diversos mínimos da curva de assinatura têm valores equivalentes de carregamento crítico ou (ii) a participação modal não indica predominância de L, D ou G sobre os demais. As Fig. 7, 8 e 9, por exemplo, exibem um estudo paramétrico de chapa isolada com um enrijecedor trapezoidal cuja altura (h) varia entre t e $20t$, onde t é a espessura das paredes (ver Fig. 4b). Nota-se que o modo 1 (fig.7) é predominantemente local no intervalo $h=[1t,18t]$ e distorcional se $h>18t$. Note-se que os modos L e D exibem participações próximas onde $h=18t$.

É possível observar na Fig. 7 a diferença de configuração do modo de flambagem 1 entre as chapas com $h=17t$ e $h=19t$. Na primeira predomina o modo local e na segunda o distorcional,

mesmo estas apresentando comprimentos de meia ondas iguais (ver Fig. 8), devido a mudança do elemento de placa que influencia a determinação dos vetores dos modos de flambagem. Foram observadas diferenças de identificação e participação modal entre o GBTul e o CUFSM para estes casos. Este exemplo é relevante para este estudo porque, sem critérios seguros para a classificação modal, não é possível desenvolver procedimentos automáticos para o projeto de PFF inovadores e de alto desempenho.

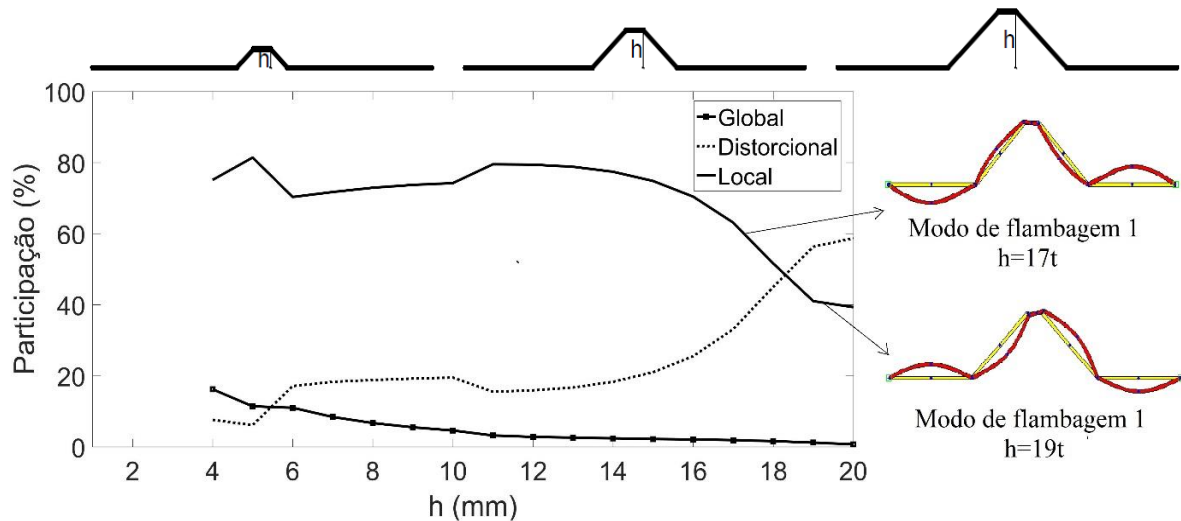


Figura 7. Participação modal para o modo 1 da chapa com enrijecedores trapezoidais e configuração modal para $h=17t$ e $h=19t$

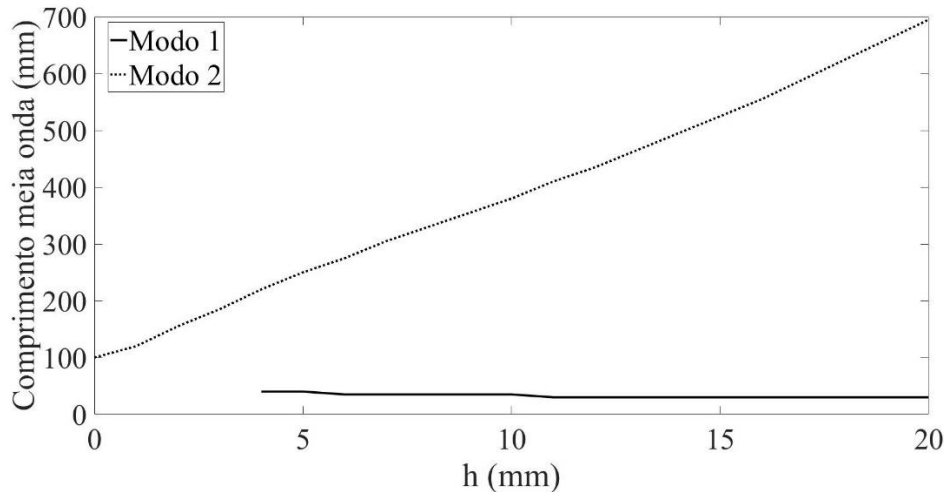


Figura 8. Comprimentos de meia onda para os modos 1 e 2 da chapa com enrijecedores trapezoidais

É possível interpretar o modo 2 (Fig. 6) como local de placa com um enrijecedor ineficiente. No entanto, o CUFSM (Schafer e Ádány, 2010) o classifica como predominantemente global em todo o intervalo $h=[1,20]$ (ver Fig. 9). Estes resultados reforçam

o entendimento de que os critérios para a classificação modal em chapas isoladas não são os mesmos para as demais tipologias de PFF.

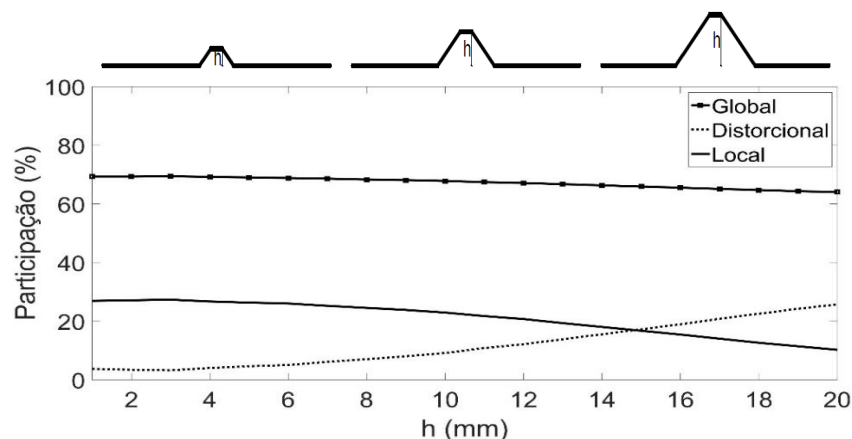


Figura 9. Participação modal para o modo 2 da chapa com enrijecedores trapezoidais

A segunda etapa do estudo paramétrico de chapas isoladas desenvolveu gráficos que relacionam a variação dos parâmetros h com a razão (σ_{cr}/f_y) , onde f_y é o valor de resistência de escoamento do aço e σ_{cr} é a tensão crítica. Observa-se na Fig. 10 esta relação para os enrijecedores triangulares e trapezoidais, na qual o modo de flambagem 1 manifesta-se apenas a partir de certa configuração dos valores de h , e apresenta valores de tensão crítica superiores aos de f_y . Ambos os modos apresentam o fator de carregamento crescente com a altura h .

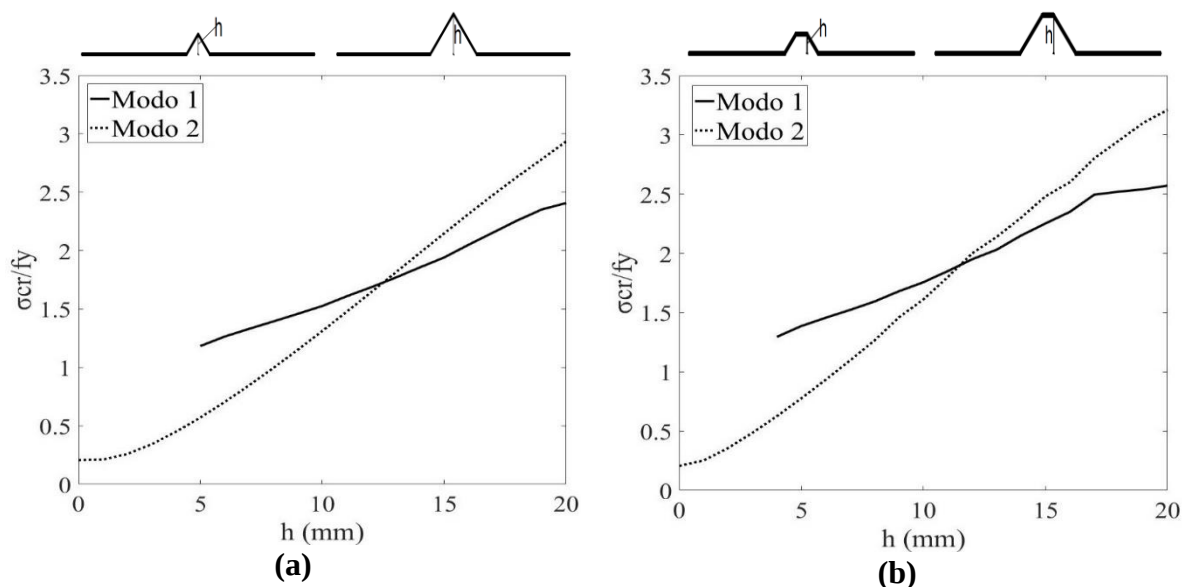


Figura 10. Variação da tensão crítica em função do parâmetro h para enrijecedores (a) triangulares e (b) trapezoidais

Foram realizadas simulações pelo MEF, com procedimento em três etapas: (i) determinação dos modos de flambagem através de análise de estabilidade elástica, (ii) seleção

dos modos predominantes pelo critério de menor carregamento crítico ou por inspeção visual, nos casos em que houve divergência entre MEF e MFF sobre os modos dominantes e (iii) análise não linear física e geométrica, onde a imperfeição inicial das placas corresponde ao modo de flambagem amplificado pelo fator $0.1t$, onde t é a espessura das paredes.

Com base nos resultados apresentado na Fig. 10b, foram escolhidos os elementos de placa com enrijecedores de altura $h=6$, porque esta geometria atende ao critério de pelo menos um dos modos apresentarem valores de tensão crítica inferiores aos de f_y , visto que desta forma pode-se observar de forma mais correta o comportamento de flambagem dessas chapas.

As Fig. 11 e 12 apresentam os resultados das análises de uma placa isolada com enrijecedor trapezoidal de 6mm de altura ($h=6$) para a estimativa de sua resistência. Dos resultados anteriores, sabe-se que se trata de um perfil onde os modos 1 e 2 não apresentam valores de carregamento crítico equivalentes ($LF_1/LF_2 = 1,56$), sendo LF o fator de carga, e a participação modal indica claramente a predominância de L no modo 1. Na Fig. 11a percebe-se que a chapa atinge seu limite último com valor de 61% da carga crítica referente ao modo de flambagem 1 e inferior a carga de escoamento. Na Fig. 11b observa-se a distribuição das tensões de Von Mises e sua configuração deformada.

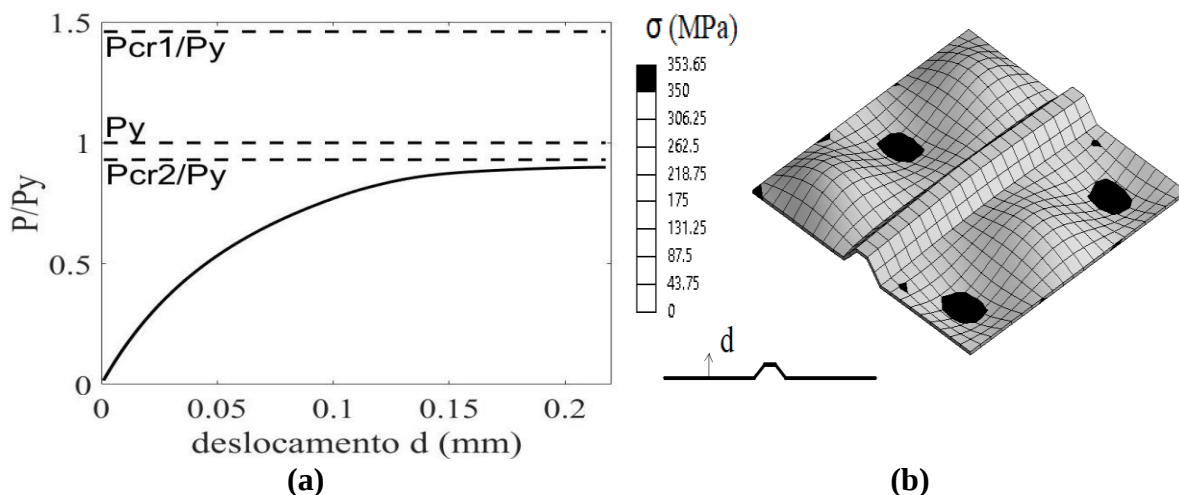


Figura 11. Chapa com enrijecedor trapezoidal para o modo local na compressão uniforme segundo o MEF: (a) relação de tensões P/P_y e deslocamento e (b) configuração da deformada (amplificação de 25x) e distribuição das tensões de Von Mises

Na Fig. 12a percebe-se que a chapa atinge seu limite último com valor de 86% da carga crítica referente ao modo de flambagem 2 e inferior a carga de escoamento. Na Fig. 12b observa-se a distribuição das tensões de Von Mises e sua configuração deformada.

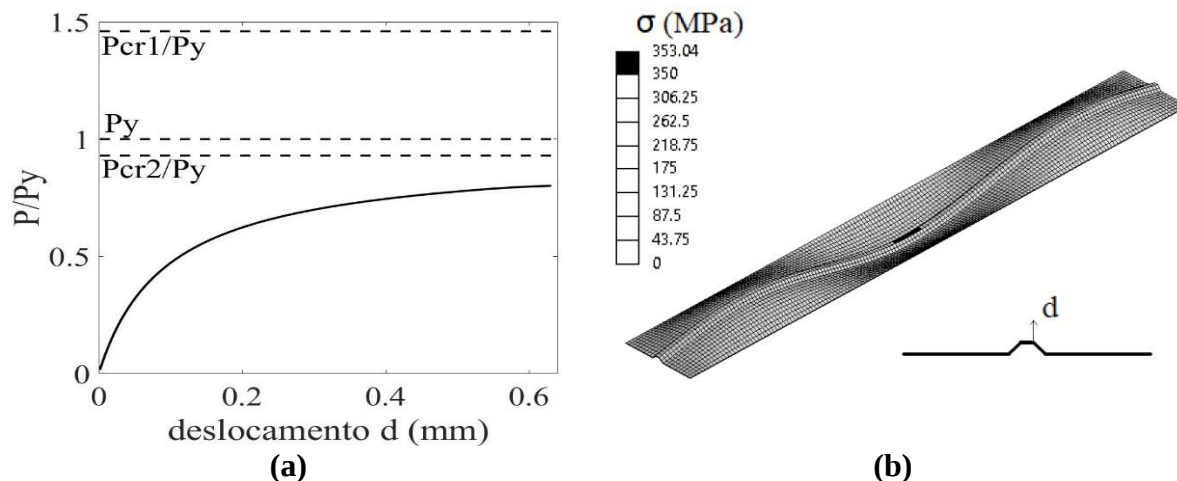


Figura 12. Chapa com enrijecedor trapezoidal para o modo local de placa enrijecida na compressão uniforme segundo o MEF: (a) relação de tensões σ/f_y e deslocamento e (b) configuração da deformada (amplificação de 35x) e distribuição das tensões de Von Mises

4.2 Perfis trapezoidais

O estudo de perfis trapezoidais foi realizado com tipologias (i) sem enrijecedores e (ii) com enrijecedores intermediários nas mesas e almas das vigas. Se observados apenas os carregamentos que induzem a compressão na mesa inferior (M^{BC}), são obtidas curvas de assinatura com dois ou três mínimos, respectivamente para peças não enrijecidas e enrijecidas (Fig. 13 e 14).

A partir da Fig. 13, pode-se realizar a identificação dos modos de flambagem dominantes Local e Distorcional, com seus respectivos comprimentos de semi onda. Na Fig. 14 há a presença de três pontos de mínimo, sendo o primeiro representativo do modo local e os dois outros referentes aos distorcionais. Percebe-se assim, que com a aplicação de enrijecedores na configuração destes perfis, estes acabam por desenvolver curvas de assinatura com a presença de um segundo modo distorcional que, às vezes, possui fatores de carga muito próximos aos demais, porém com maiores valores de comprimento de meia onda.

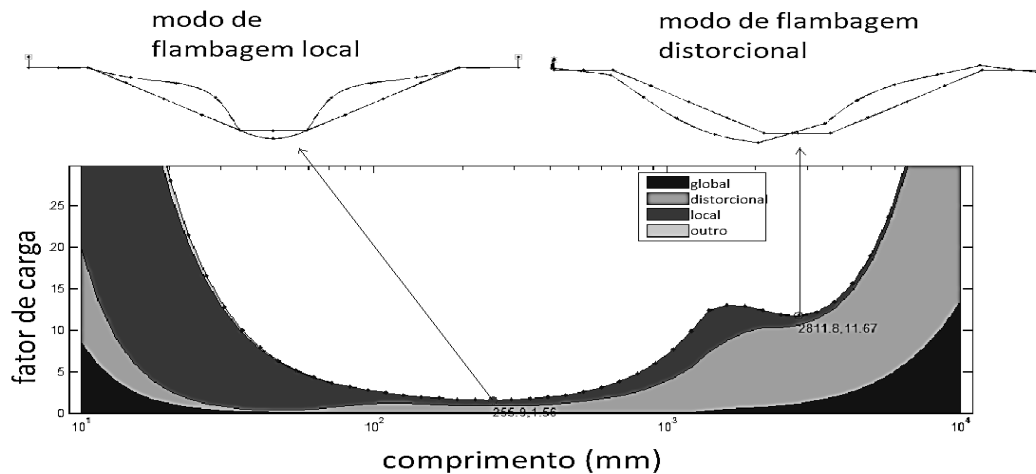


Figura 13. Curva de assinatura de perfis trapezoidal sem enrijecedores

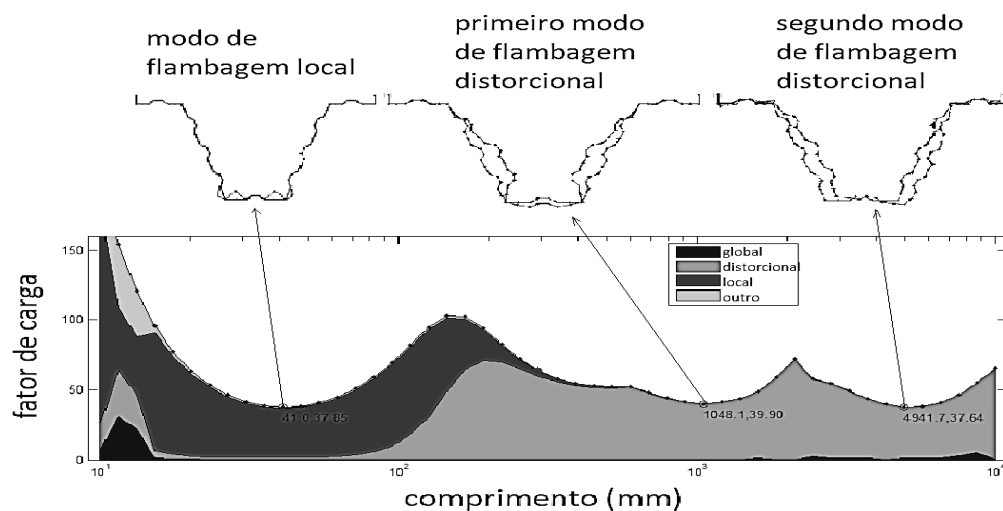


Figura 14. Curva de assinatura de perfis trapezoidais com enrijecedores

Considerando os perfis adotados por Franco e Batista (2017), pode-se fazer a análise através do MEF de um mesmo perfil para o comprimento de semi onda de cada modo dominante obtidos pelo programa CUFSM. A Fig. 15b apresenta o perfil com comprimento correspondente a 3 semi ondas e imperfeição inicial correspondente ao modo L (Fig.14), a distribuição de tensões de Von Mises e a configuração deformada desta peça quando submetida ao carregamento último de colapso. É perceptível que a curva de equilíbrio converge assintoticamente para os valores de resistência associada a L, obtidos pelas fórmulas fechadas da Eq. 4, confirmando a validade do MRD para este caso.

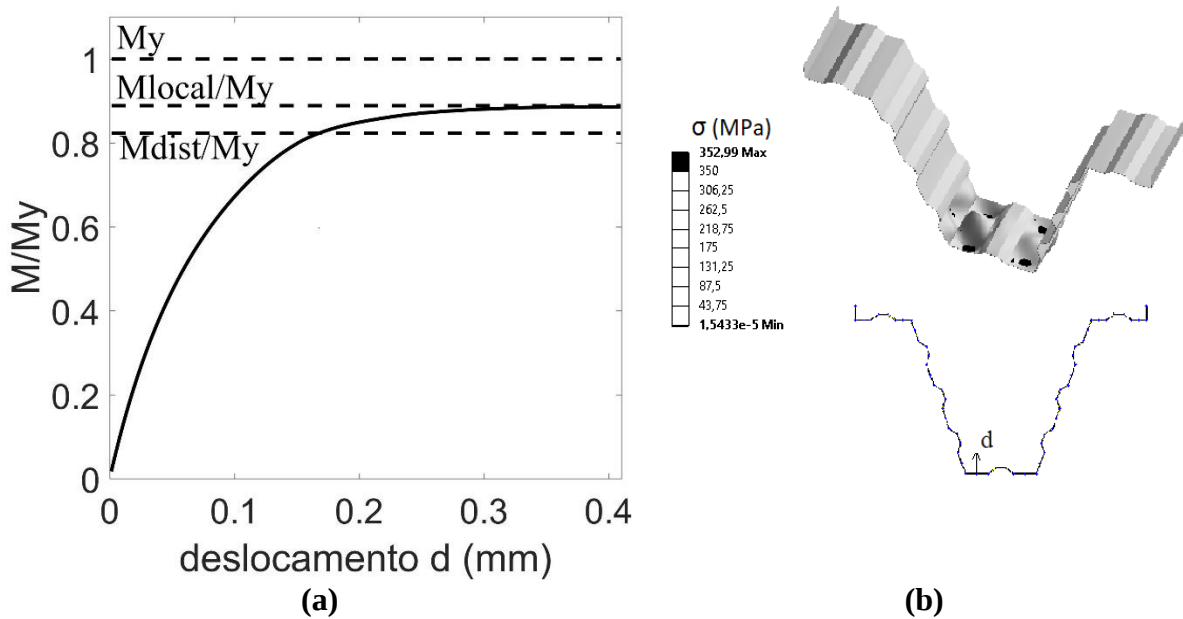


Figura 15. Perfil corrugado com enrijecedor trapezoidal para o modo local na compressão da mesa inferior segundo o MEF: (a) relação dos momentos M/M_y e deslocamento e (b) configuração da deformada (amplificação de 60x) e distribuição das tensões de Von Mises

A Fig. 16 apresenta o perfil com o comprimento e imperfeição de semi onda correspondente ao primeiro modo de flambagem distorcional (Fig. 14), a distribuição de tensões de Von Mises e a configuração deformada desta peça quando submetida ao carregamento último de colapso. Neste caso, a curva de equilíbrio converge para valores de resistência maiores do que os associados ao modo correspondente, obtidos pelas fórmulas fechadas da Eq. 5, além de ser perceptível a presença do modo local na mesa inferior desse perfil, o que acarreta em possível interação. Tais questões indicam a necessidade de mais pesquisas para a calibração do modelo numérico.

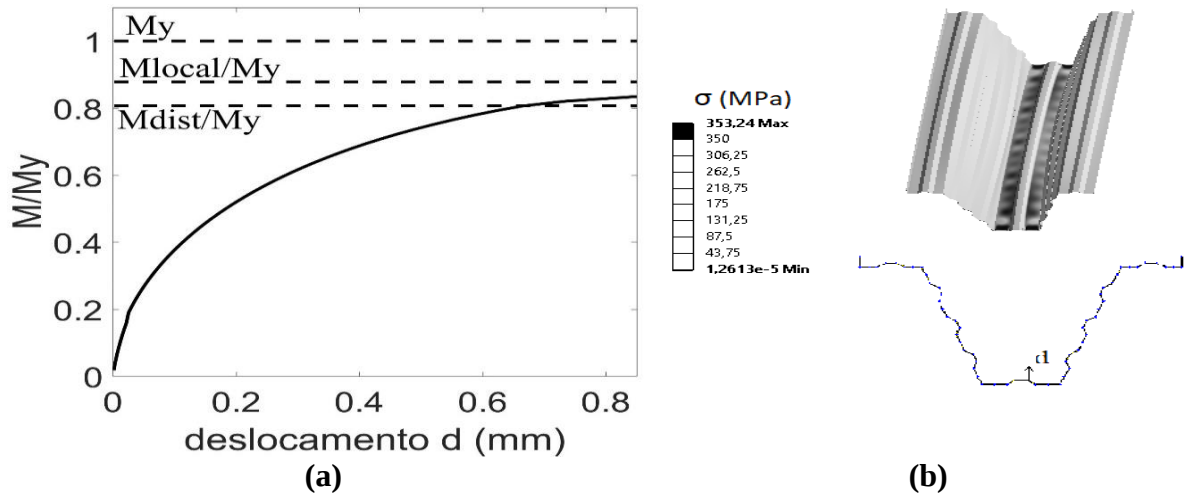


Figura 16. Perfil corrugado com enrijecedor trapezoidal para o primeiro modo distorcional na compressão da mesa inferior segundo o MEF: (a) relação dos momentos M/M_y e deslocamento e (b) configuração da deformada (amplificação de 25x) e distribuição das tensões de Von Mises

Contudo, com base nas análises dos resultados do segundo modo de flambagem distorcional presentes na Fig. 17, percebe-se que o momento fletor resistente está abaixo do previsto para o modo distorcional puro. Tais questões indicam a necessidade de mais pesquisas para a calibração do modelo numérico.

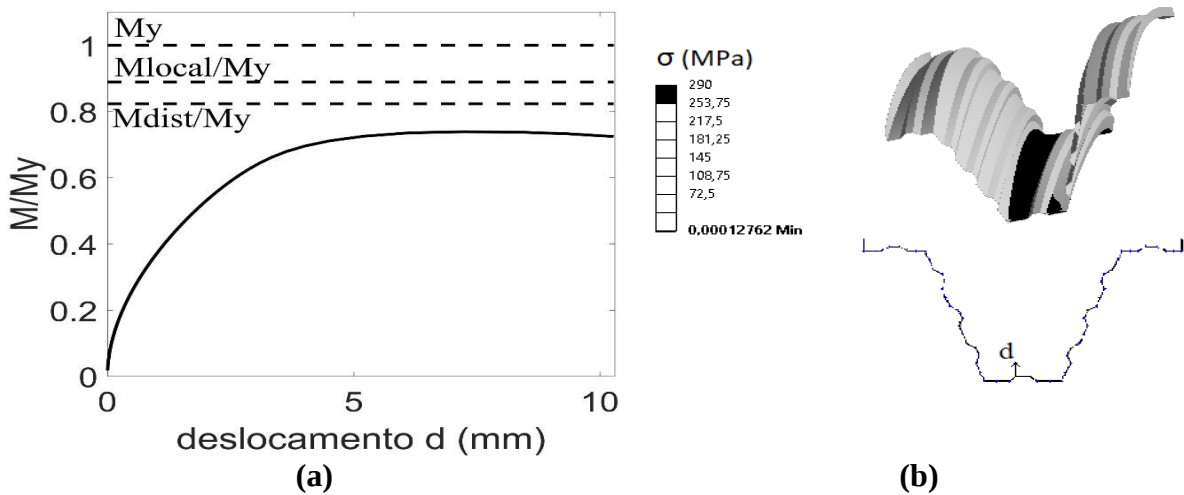


Figura 17. Perfil corrugado com enrijecedor trapezoidal para o segundo modo distorcional na compressão da mesa inferior segundo o MEF: (a) relação dos momentos M/M_y e deslocamento e (b) configuração da deformada (amplificação de 4,6x) e distribuição das tensões de Von Mises

A tabela 3 apresenta a comparação inicial entre resultados de resistências obtidas pelo MRD e pelo Ansys, para um perfil trapezoidal (i) sem enrijecedores e (ii) com enrijecedores.

Tabela 3. Resultados de momento fletor resistente obtidos pelo MRD e pelo MEF (Ansys) para perfis trapezoidais sem e com enrijecedores

	MRD			Ansys	
	M_{Re} (kNm)	M_{Rlocal} (kNm)	M_{Rdist} (kNm)	M_{Local} (kNm)	M_{Dist} (kNm)
Trapezoidal sem enrijecedores	20,602	5,21	12,94	5,91	14,39
Trapezoidal com enrijecedores	34,221	30,07	27,61	30,32	24,78

A partir destes resultados, percebe-se valores extremamente próximos quando se considera momentos fletores resistentes associados ao modo local, visto que em modos curtos não há a possibilidade de interações com L-D ou L-G. Contudo, conforme o perfil tem um aumento de comprimento, passa a ser necessário o cálculo dos momentos fletores resistentes associados ao modo distorcional e a possibilidade de interação entre modos. Neste estágio da pesquisa, ainda não foi possível demonstrar se a interação modal em perfis trapezoidais está plenamente contemplada pela formulação atual do MRD.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados no estudo da flambagem de chapas isoladas, pode-se concluir que este é uma boa alternativa para a identificação das configurações dos modos primários de flambagem, quando comparadas aos dos perfis corrugados de seção trapezoidal, visto que as formas modais 1 e 2 apresentam, em relação a mesa inferior do perfil, configurações semelhantes aos modos local e o primeiro distorcional, respectivamente.

A comparação entre as análises pelo método das faixas finitas e de elementos finitos apresentam resultados análogos, para configurações de modos de flambagem e carregamentos críticos. Desta forma, esta investigação pode dar continuidade ao estudo em questão, podendo posteriormente ser comparadas com outros procedimentos, no caso apresentado, o método da resistência direta, em que se busca obter parâmetros de referência que compatibilizem a configuração e interação modal desses perfis para estas fórmulas.

Considerando os dados obtidos pelas análises dos perfis corrugados pelo MRD e pelo MEF, percebe-se que os valores dos momentos fletores resistentes apresentam boa correlação para modos de flambagem local, sendo necessário para o primeiro e segundo distorcional apenas compatibilizações para esses procedimentos. Esses resultados permitem antever a continuidade das pesquisas nessa direção.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio à bolsa de mestrado do primeiro autor (processo de concessão número 134192/2016-8).

REFERÊNCIAS

- ABNT, 1967. *NB - 143/67 - Cálculo de estruturas de aço constituídas por perfis leves*. s.l.:Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT, 2010. *NBR14762:2010: Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio*. s.l.:Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Ádány, S., 2004. *Buckling mode classification of members with open thin-walled cross-sections by using the Finite Strip Method*, Baltimore: Johns Hopkins University.
- Ádány, S., Joó, A. L. & Schafer, B. W., 2010. Buckling mode identification of thin-walled members by using cFSM base functions. *Thin-Walled Structures*, 12 Junho, pp. 806-817.
- ANSYS, Inc., 2015. *Workbench User's Guide*. Canonsburg: ANSYS, Inc..
- Batista, E. M., 2009. Local–global buckling interaction procedures for the design of cold-formed columns: Effective width and direct method integrated approach. *Thin-Walled Structures*, 47(11), pp. 1218-1231.
- 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*, 48(4-5), pp. 345-356.
- Bebiano, R., Silvestre, N. & Camotim, D., 2008. *GBTUL - A code for the buckling analysis of cold-formed steel members*, Lisboa: Technical University of Lisbon - Portugal.
- Cybulski, R., Walentyński, R. & Cybulska, M., 2014. Local buckling of cold-formed elements used in arched building with geometrical imperfections. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 96, pp. 1-13.
- Franco, J. M. S. & Batista, E. M., 2017. Buckling behavior and strength of thin-walled stiffened trapezoidal CFS under flexural bending. *Thin-Walled Structures*, Agosto, pp. 268-281.
- Hara, R., 2000. *Design of Cold Formed Thin Gauge Members*. Helsinki, s.n.
- Li, Z., Hanna, M. T., Ádány, S. & Schafer, B. W., 2011. Impact of basis, orthogonalization, and normalization on the constrained Finite Strip Method for stability solutions of open thin-walled members. *Thin-Walled Structures*, Volume 49, pp. 1108-1122.
- Li, Z. & Schafer, B. W., 2010. *Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods*. St. Louis, MO, Proceedings of the 20th Int'l. Spec. Conf. on Cold-Formed Steel Structures.
- Malite, M., Sales, J. J. & Gonçalves, R. M., 1998. Algumas considerações sobre a nova norma brasileira de dimensionamento de elementos estruturais de aço formados a frio. *Construção Metálica*, 8(33), pp. 22-26.
- Melo, J. M. S. d., Franco, J. M. S. & Batista, E. M., 2016. Sistema generativo e flambagem de seções trapezoidais enrijecidas: Aplicação em sistema ortotrópico de cobertura em aço. *Congresso Latinoamericano da Construção Metálica*.
- Piekarczyk, A. et al., 2015. Stability and bearing capacity of arch-shaped corrugated shell elements: experimental and numerical study. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 63(1), pp. 113-124.

- Riks, E., 1979. An incremental approach to the solution of buckling and snapping problems. *Int. J. Solids Struct*, Volume 15, pp. 524-551.
- Schafer, B. W. & Ádány, S., 2005. *Understanding and classifying local, distortional and global buckling in open thin-walled members*. Montreal, Canada, Annual Conference Structural Stability Research Council.
- Schafer, B. W. & Ádány, S., 2006. *Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods*. Orlando, Florida, s.n.
- Schardt, R., 1989. *Verallgemeinerte Technische Biegetheorie*. Berlin: Springer-Verlag (em alemão).
- Timoshenko, S. P., 1963. *Theory of Elastic Stability*. Singapura: McGraw-Hill International Book Company.
- Vlasov, V. Z., 1961. *Thin-walled Elastic Beams (Tonkostennye uprugie sterzhni)*. 2d ed. ed. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations Ltd..
- Xu, L., Gong, Y. & Guo, P., 2001. Compressive tests of cold-formed steel curved panels. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 57, pp. 1249-1265.