http://journal.unoeste.br/index.php/ce/index
DOI: 10.5747/ce.2022.v14.e387
ISSN on-line 2178-8332

Colloquium Exactarum

Submetido: 07/06/2021 Revisado: 17/08/2022 Aceito: 22/08/2022

ANÁLISE TEÓRICA PELO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA DE SEÇÕES DUPLAS DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO SOB COMPRESSÃO

Theoretical analysis by the direct strength method of built-up sections of cold-formed steel under compression

Danilo Menezes Zambrano, Larissa Maria Alves, Matheus Lessa Moreira, Riterson Jacques Nunes

Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE, Presidente Prudente, SP.
E-mail: danilozambranoo@hotmail.com, lmalves01@gmail.com, matheuslessa_23@outlook.com, rit_nunes@hotmail.com

RESUMO - A necessidade de construções mais leves e de baixo custo se intensificou, assim sendo, a presença de perfis formados a frio passou a ser comum na construção civil, oferecendo menor relação peso/resistência para suportar as solicitações presentes. O presente artigo visou o estudo teórico sobre a estabilidade de seções duplo U e U enrijecido, compostos de perfis de aço formados a frio, submetidas à compressão. Sob a justificativa de analisar a resistência desse tipo de elemento estrutural, com o auxílio do Software CUFSM que utiliza o Método das Faixas Finitas (MFF), e verificar a resistência pelo Método da Resistência Direta (MRD). Os objetivos deste estudo foram: investigar a modelagem no software CUFSM para seção dupla com perfis conectados entre si; e aplicar o MRD na análise teórica de seções duplas com perfis comerciais brasileiros. Constatou-se que a variação da quantidade de conexões influencia a análise e pode reproduzir o comportamento de conexão parcial. A aplicação de dobras mostrou-se eficiente, apresentando pouquíssima influência na instabilidade local e considerável influência na instabilidade distorcional. O MRD apresentou perda de resistência para os modelos que apresentaram modo de falha local, sendo, portanto, o fator mais importante quanto à resistência.
Palavras-chave: Instabilidades; Flambagem; CUFSM; Método das Faixas Finitas.

ABSTRACT – The need for lighter, lower-cost construction has intensified, so the presence of cold-formed profiles has become common in civil construction, offering greater efficiency in the ability to withstand the current demands. The present article aimed at the theoretical study on the stability of double U and U lipped sections, composed of cold formed steel profiles, submitted to compression. Under the justification of analyzing the effectiveness of this type of structural element, with the help of the CUFSM Software that uses the Finite Strip Method, and verify the resistance by the Direct Strength Method (DSM). The objectives of this study were: to investigate the modeling in the CUFSM software for a double section with profiles connected to each other; and apply the DSM to the theoretical analysis of double sections with Brazilian commercial profiles. It was found that the variation in the number of connections influences the analysis and can reproduce the partial connection

behavior. The application of folds proved to be efficient, with little influence on local instability and considerable influence on distortion instability. The DSM showed a loss of resistance for the models that presented a local failure mode, being, therefore, the most important factor regarding the resistance.
Keywords: Instabilities; Buckling; CUFSM; Finite Strip Method.

1. INTRODUÇÃO

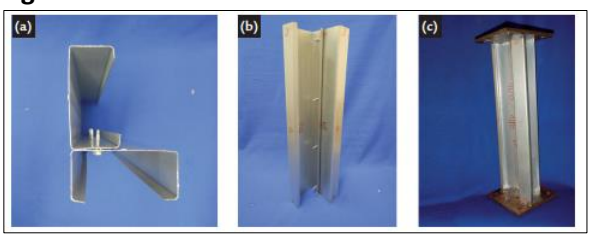
Com o passar dos anos, a necessidade de construções mais leves e de baixo custo vem sendo intensificada. Assim sendo, estruturas com a presença de perfis formados a frio passou a ser comumente utilizada na construção civil, oferecendo menor relação peso/resistência e maior eficiência na capacidade de suportar as solicitações presentes.

Esses perfis agregam múltiplas vantagens, tais como: alta resistência, ductilidade, leveza, fácil transporte e montagem.

O presente artigo visou o estudo teórico sobre a estabilidade de seções duplo U e U enrijecido, compostos de perfis de aço formados a frio, submetidas à compressão. Sob a justificativa de analisar a resistência desse tipo de elemento estrutural, com o auxílio do Software CUFSM que analisa os padrões de flambagem local, distorcional e global, através do Método das Faixas Finitas (MFF), e verificar a resistência à compressão pelo Método da Resistência Direta (MRD). Foram considerados arranjos compostos por dois perfis iguais, conectados por parafusos, onde, analisar-se-á a estabilidade dos mesmos.

Bastos e Batista (2019) fizeram análises experimentais de montantes de colunas espaciais, de perfis formados a frio, conectados por parafusos. Os autores obtiveram resultados quanto ao modo de flambagem e identificação das cargas críticas. Os corpos de prova foram ensaiados à compressão centrada, apresentando flambagem local e distorcional. No estudo, a análise é feita sobre uma seção duplo U enrijecido, onde suas dimensões apresentadas são de 89x42x12 mm com espessura de 0,8 mm, conectados por parafusos auto-atarrachantes de diâmetro equivalente a 4,8 mm. Na análise feita, variou-se a quantidade de parafusos inseridos longitudinalmente no conjunto. A Figura 1 apresenta fotos de um dos modelos do montante da coluna.

Figura 1. Fotos do montante da coluna

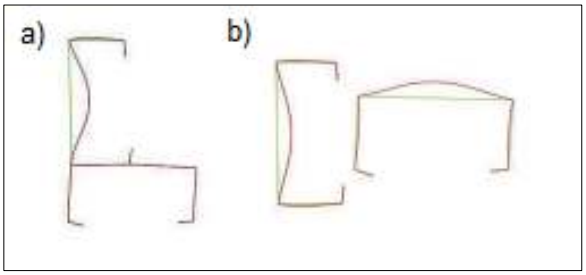


Fonte: (Bastos e Batista, 2019)

Para essa pesquisa, além dos experimentos realizados em laboratório, fora utilizado também o software GBTUL, que produz análises pela teoria generalizada das vigas. Com o auxílio do programa, considerou-se perfis compostos e não compostos. Ou seja, experimentou-se estruturas com e sem conexão, onde, a estrutura com conexão foi modelada de forma que o contato entre os dois perfis tenha o dobro da espessura, considerando ligação rígida completa entre os mesmos.

Os modos de instabilidades foram analisados de forma separada, como mostra a Figura 2, onde, em a) estudou-se a estrutura composta, com dupla espessura na área de contato entre os perfis e em b) a estrutura de forma não-composta. Observa-se também que a modelagem não considerou as dobras arredondadas, característica inerente aos perfis formados a frio.

Figura 2. Modos de instabilidades



Fonte: (Adaptado de Bastos e Batista 2019)

Os autores ressaltam que o comportamento estrutural real dos modelos experimentais, são de uma ligação parcial entre os perfis. Ou seja, a modelagem feita inicialmente, utilizando estrutura composta e não composta, não representaria o modelo real.

Com esta ressalva, o estudo aqui realizado investigou a modelagem das conexões de forma a se chegar o mais próximo possível do modelo experimental, sendo assim, aplicando conexões parciais e inserindo as dobras arredondadas.

É importante citar que perfis com enrijecedores dificultam consideravelmente a montagem de pilares treliçados espaciais, sendo necessária a realização de recortes como mostra a Figura 3.

Figura 3. Enrijecedores recortados para ligação entre perfis de pilar treliçado



Fonte: (Adaptado de Bastos, 2019)

Os objetivos deste estudo são: investigar a modelagem no software CUFSM para seção dupla com perfis conectados entre si; e aplicar o Método da Resistencia Direta (MRD) na análise teórica de seções duplas com perfis comerciais brasileiros.

2. APLICAÇÃO DO SOFTWARE CUFSM

O software CUFSM foi disponibilizado em 2001 e desde então vem sendo atualizado e adicionadas novas ferramentas. A versão empregada neste estudo é a 5.04, que utiliza o MFF para a obtenção das tensões críticas globais e locais.

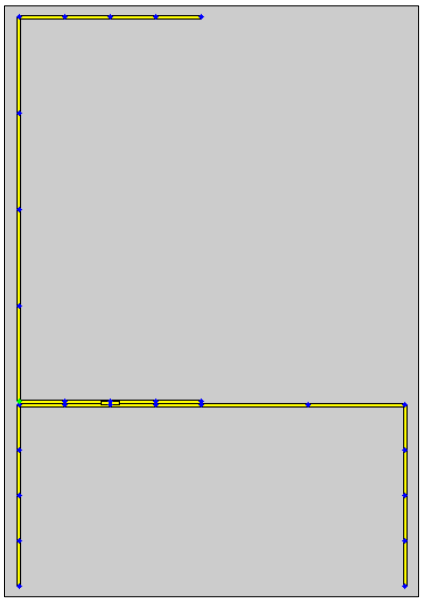
Chicaiza *et al.* (2019) comenta que o MFF é uma alternativa interessante frente ao Método dos Elementos Finitos, simplificando o processo de análise e reduzindo assim, o tempo de processamento.

Schafer (2019) apresenta um artigo sobre os avanços na aplicação do MRD para perfis de aço formados a frio, e também cita atualizações incorporadas nas versões 5.01 em diante do CUFSM.

Em sua utilização é possível simular perfis de seção dupla conectados entre si, primeiramente insere-se os dados que o programa necessita para a modelagem, como dimensões e propriedades do material, por fim, duplica-se o perfil para obter a seção dupla e incorporar as conexões.

É possível utilizar técnicas que representem conexões entre os perfis, por exemplo quando a modelagem simula os perfis em contato, conforme ilustrado na Figura 4, pode-se notar que os perfis estão muito próximos, possibilitando a criação de um elemento de comprimento desprezível que represente uma ligação feita por um parafuso.

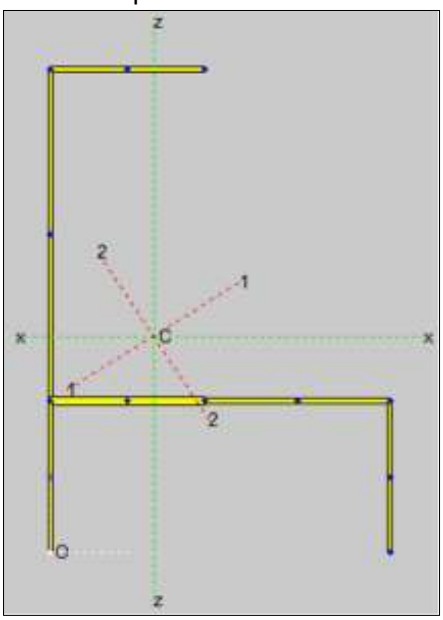
Figura 4. Modelo com uma conexão no CUFSM



Fonte: Os autores.

Outra possível técnica, utilizada por Bastos (2019), pode ser observada na Figura 5, onde após a duplicação do perfil, na região que há contato entre alma e mesa dos perfis, emprega-se o dobro da espessura.

Figura 5. Modelo no CUFSM com espessura dupla no contato entre perfis



Fonte: (Bastos, 2019)

Influência da espessura das conexões

Foi analisada a aplicação da ligação localizada em perfis U89x41x0,8, criando elementos de comprimento desprezível, um dos parâmetros analisados foi a espessura dos elementos, simulando com valores de 0,5, 1, 2, 3 e 4 mm.

As propriedades mecânicas do aço utilizado para esse estudo são:

. Tensão de escoamento: fy = 240 MPa;

. Módulo de elasticidade: E = 20.000 kN/cm²;

. Módulo de elasticidade transversal: G = 7.700 kN/cm²;

. Coeficiente de Poisson: n = 0,3;

O Quadro 1 apresenta os resultados obtidos, em simulações no CUFSM, para tensão elástica local, e pode-se observar que houve um aumento total desprezível, na ordem de 1%. Ressalta-se que a instabilidade local foi a única crítica nas simulações.

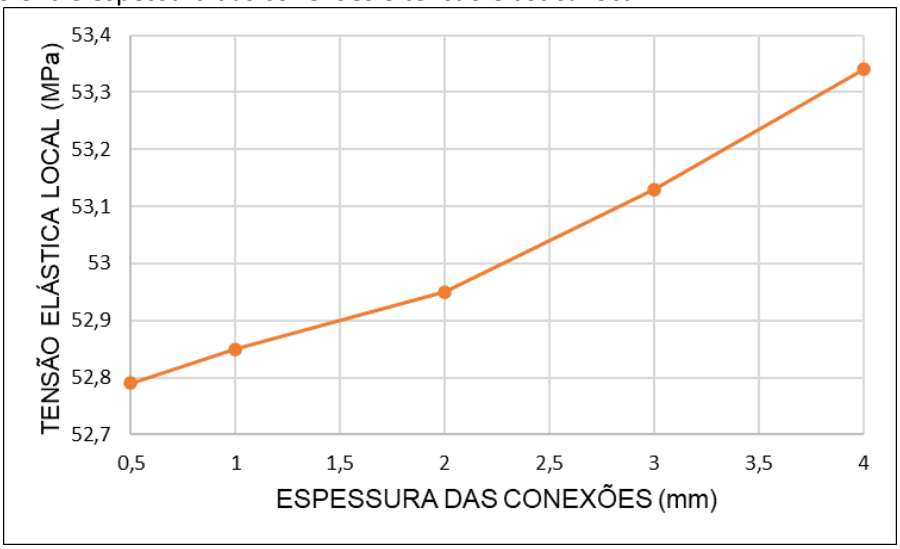
Quadro 1. Relação entre espessura da conexão e tensão elástica local

Espessura das conexões	Tensão Elástica Local (MPa)
0,5	52,79
1	52,85
2	52,95
3	53,13
4	53,34
Variação Total	0,5

Fonte: Os autores.

A Figura 6 ilustra o gráfico correspondente ao Quadro 1, evidenciando a pequena variação. Portanto, a influência da espessura do elemento de conexão é muito baixa, sendo assim, foi adotada a espessura de 1 mm para as demais simulações do estudo.

Figura 6. Relação entre espessura das conexões e tensão elástica local



Fonte: Os autores.

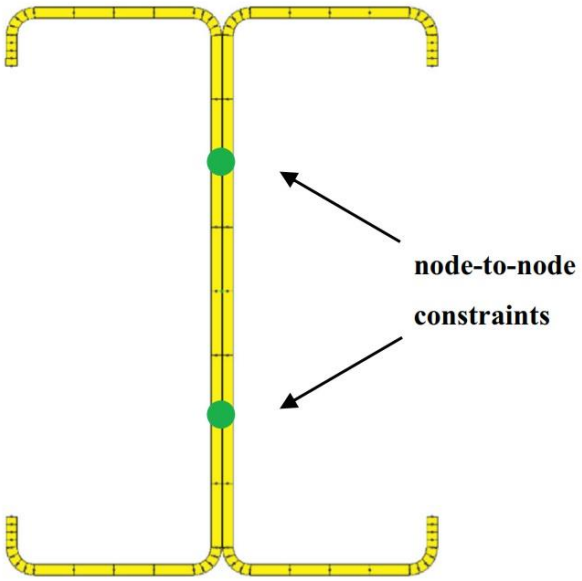
Influência do tipo de conexão

Fratamico *et al.* (2018b) analisaram experimentalmente seções costa a costa em duplo U enrijecido, ligados entre si por dois parafusos. Fratamico *et al.* (2018a) deram sequência ao estudo, investigando a ação conjunta entre os perfis, comparando os resultados práticos com simulações numéricas, pelo MFF no CUFSM e Método dos Elementos Finitos no programa ABAQUS.

Os autores ressaltaram que a ação conjunta completa entre os perfis resulta em maiores resistências, podendo oferecer dados não conservadores. Portanto, não indicam este tipo de modelagem para seções que apresentam conexão parcial.

Quanto à modelagem feita no CUFSM, os autores propuseram o acoplamento dos nós que recebem a conexão parafusada. A Figura 7 apresenta tal condição proposta pelos autores.

Figura 7. Proposta de modelagem com dois parafusos no Software CUFSM

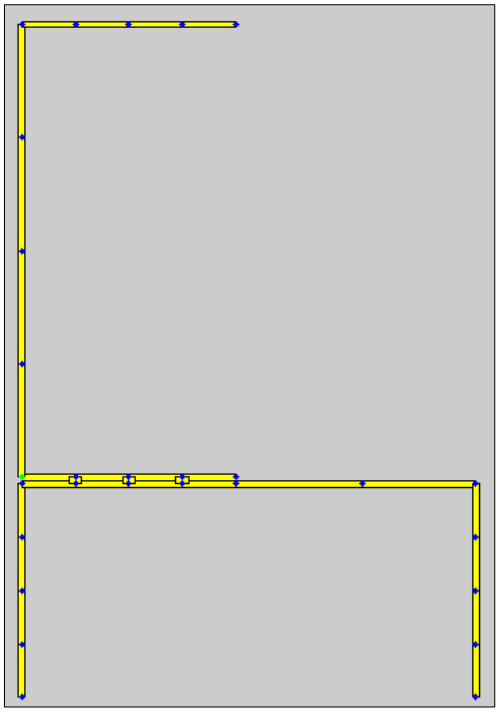


Fonte: (Fratamico *et al.*, 2018b)

Uma das conclusões de Fratamico et al (2018b) foi de que a técnica de acoplamento dos nós apresentou boa precisão nos resultados de resistência.

Diante disto, foram analisadas seções em perfis U89x42 com espessuras de 0,8 e 1,25 mm. A análise dos perfis duplos variou a quantidade de conexões entre 1, 2, 3, 4 e 5. A Figura 8 apresenta o modelo U89x41x1,25 com três conexões.

Figura 8. Modelagem com 3 conexões no CUFSM



Fonte: Os autores.

A variação do número de conexões nas simulações, buscou comparar os resultados apresentados com modelagens de perfis sem conexão e com conexão completa rígida. Para o modelo de conexão rígida, aplicou-se o dobro da espessura na região de contato dos perfis, como antes mostrado na Figura 5.

Os Quadros 2 e 3 apresentam os resultados da tensão elástica local dos perfis analisados, variando o número de conexões.

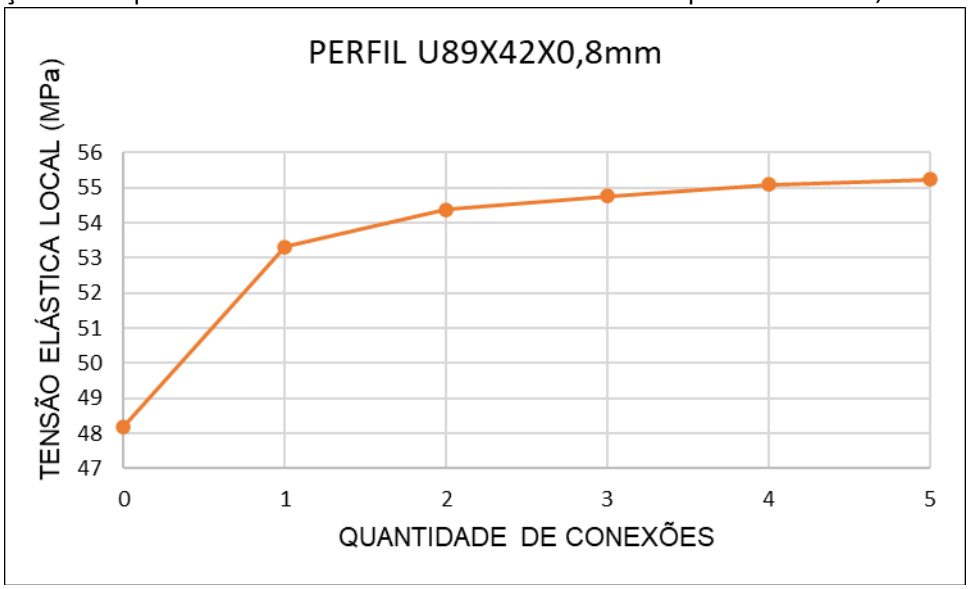
Quadro 2. Relação entre quantidade de conexões e tensão referente ao perfil U89x42x0,8

Perfil U89X42X0,8mm	
Número de Conexões	Tensão Elástica Local (MPa)
0	48,2
1	53,32
2	54,37
3	54,76
4	55,08
5	55,24
Conexão Rígida	56,37

Quadro 3. Relação entre quantidade de conexões e tensão referente ao perfil U89x42x1,25

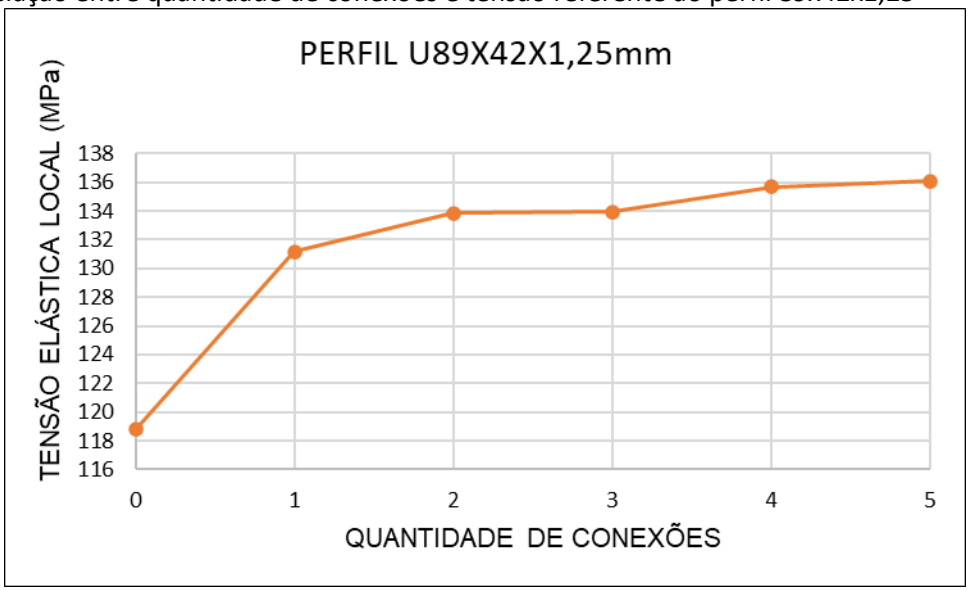
Perfil U89X42X1,25mm	
Número de Conexões	Tensão Elástica Local (MPa)
0	118,79
1	131,18
2	133,87
3	133,93
4	135,69
5	136,07
Conexão Rígida	139,10

Figura 9. Relação entre quantidade de conexões e tensão referente ao perfil U89x42x0,8



Fonte: Os autores.

Figura 10. Relação entre quantidade de conexões e tensão referente ao perfil 89x42x1,25



Fonte: Os autores.

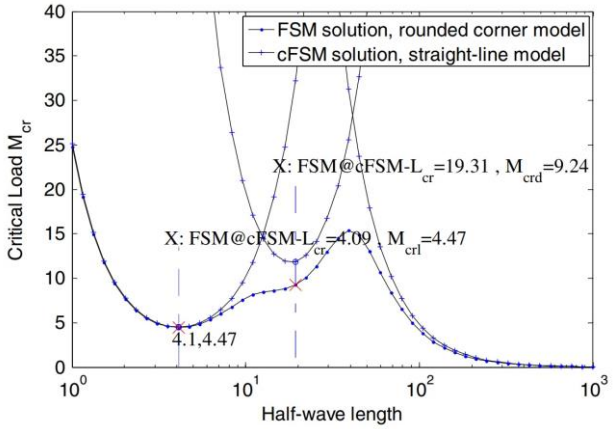
As Figuras 9 e 10 mostram os gráficos que representam o comportamento dos modelos simulados, observa-se que houve um salto de resistência dos modelos sem conexão entre perfis, barras isoladas, para os modelos com apenas uma conexão, evidenciando que o CUFSM passou a reconhecer o comportamento conjunto da seção.

A partir da aplicação de conexões, as curvas apresentaram um comportamento mais suave. Para a seção U89x42x0,8 o aumento de resistência da aplicação de uma conexão para 5 conexões, foi de 3,6%, e a mesma comparação quanto ao perfil U89x42x1,25 apresentou ganho de 3,7%, variações muito similares.

Influência da aplicação de dobras arredondadas

Li e Schafer (2010) apresentaram um estudo sobre a modelagem em softwares que utilizam o MFF, no qual indicam, entre outros fatores, diferenças nas curvas de instabilidades para modelos com e sem dobras arredondadas. A Figura 11 apresenta um exemplo em que ocorrem diferenças nas tensões críticas quando comparados tais modelos.

Figura 11. Curvas de instabilidades para modelos com e sem dobras



Fonte: Li e Schafer (2010)

Diante do exposto em 2010, os autores não recomendaram a aplicação de dobras em tais modelagens. Porém, posteriormente no estudo de Li *et al.* (2014), foi apresentada uma revisão sobre modelagens empregando o MFF, na qual os autores afirmaram que a aplicação das dobras é recomendada, pois mesmo que influencie um pouco nos resultados para instabilidades local e distorcional, a não aplicação pode influenciar em resultados para instabilidades globais.

Bastos (2019) em seu estudo, modelou suas seções duplas com cantos retos, portanto, outro fator aqui estudado foi a aplicação das dobras arredondadas nos modelos analisados pela autora, buscando investigar sua influência e aproximar as modelagens dos perfis reais ensaiados, uma vez que, tais dobras são características dos perfis formados a frio.

Modelando com as dobras arredondadas, houve uma pequena redução na área, como apresentado no Quadro 4.

Quadro 4. Comparativo de área entre perfis com e sem dobras

Descrição	Área (cm²)	
	Sem Dobras	Com Dobras
2Ue 89x41x12 #0,8 mm	3,09	2,97
2U 89x41 #0,8 mm	2,71	2,66
2Ue 89x41x12 #1,25 mm	4,80	4,58
2U 89x41 #1,25 mm	4,20	4,13

Fonte: Os autores.

Quanto aos resultados das simulações, os modelos com perfis U não apresentaram diferenças significativas. Porém, a tensão crítica distorcional diminuiu cerca de 9,7% nos modelos com perfil U enrijecido, enquanto que houve um aumento desprezível da tensão crítica local, em torno de 1%, como evidenciado no Quadro 5.

Quadro 5. Comparativo das tensões críticas entre perfis com e sem dobras

Descrição	Tensões Críticas (MPa)			
	σ_{crL} (local)		σ_{crD} (distorcional)	
	Sem dobra	Com sobra	Sem dobra	Com dobra
2Ue 89x41x12 #0,8 mm	90,30	94,19	249,28	243,59
2U 89x41 #0,8 mm	56,94	57,52		
2Ue 89x41x12 #1,25 mm	240,26	248,81	453,56	438,54
2U 89x41 #1,25 mm	153,39	152,42		

Fonte: Os autores.

As tensões críticas são observadas através das análises feitas no software CUFSM. Nota-se nas Figuras 12 e 13, a curva de instabilidades que difere entre os perfis U e Ue, havendo instabilidade distorcional quando o perfil apresenta enrijecedores.

Ao analisar as cargas críticas, percebe-se que há uma significativa redução na carga crítica elástica relativa ao modo distorcional, em cerca de 7%. Porém, em relação ao modo local, a variação é insignificante, como apresentado no Quadro 6.

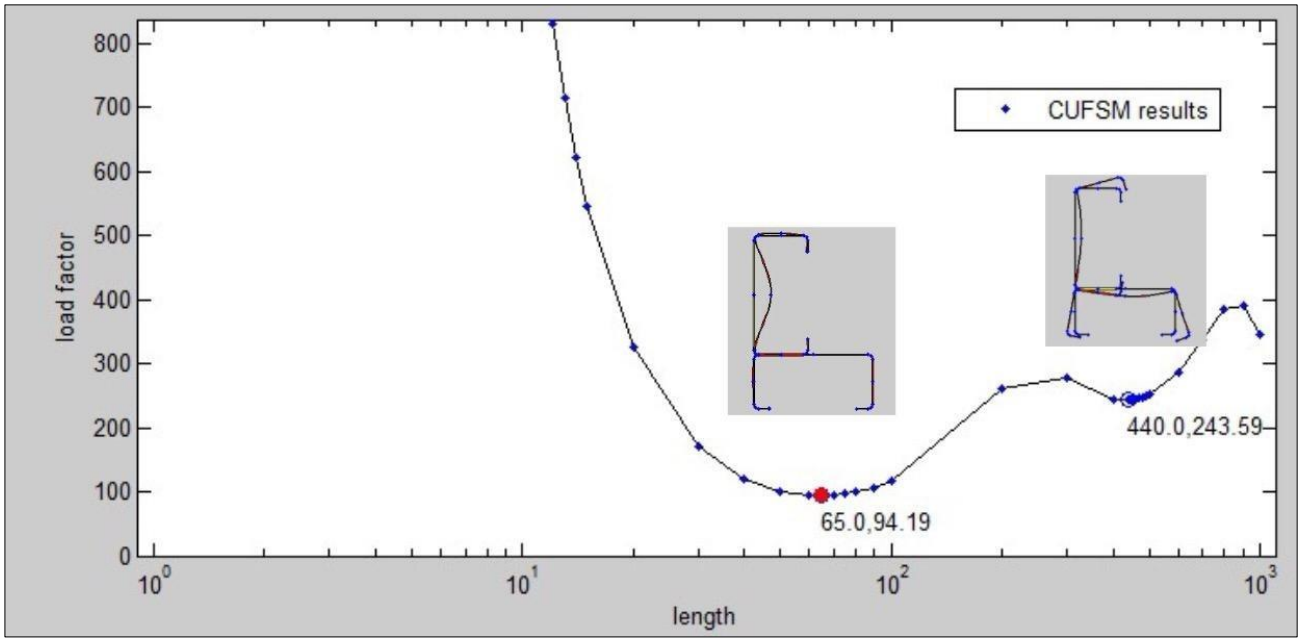
Quadro 6. Comparativo de cargas críticas entre perfis com e sem dobras

Descrição	Cargas Críticas (kN)			
	P_{crL} (local)		P_{crD} (distorcional)	
	Sem Dobra	Com Dobra	Sem Dobra	Com dobra
2Ue 89x41x12 #0,8 mm	27,91	27,94	77,05	72,27
2U 89x41 #0,8 mm	15,42	15,30		
2Ue 89x41x12 #1,25 mm	115,44	113,95	217,92	200,85
2U 89x41 #1,25 mm	64,50	62,91		

Fonte: Os autores.

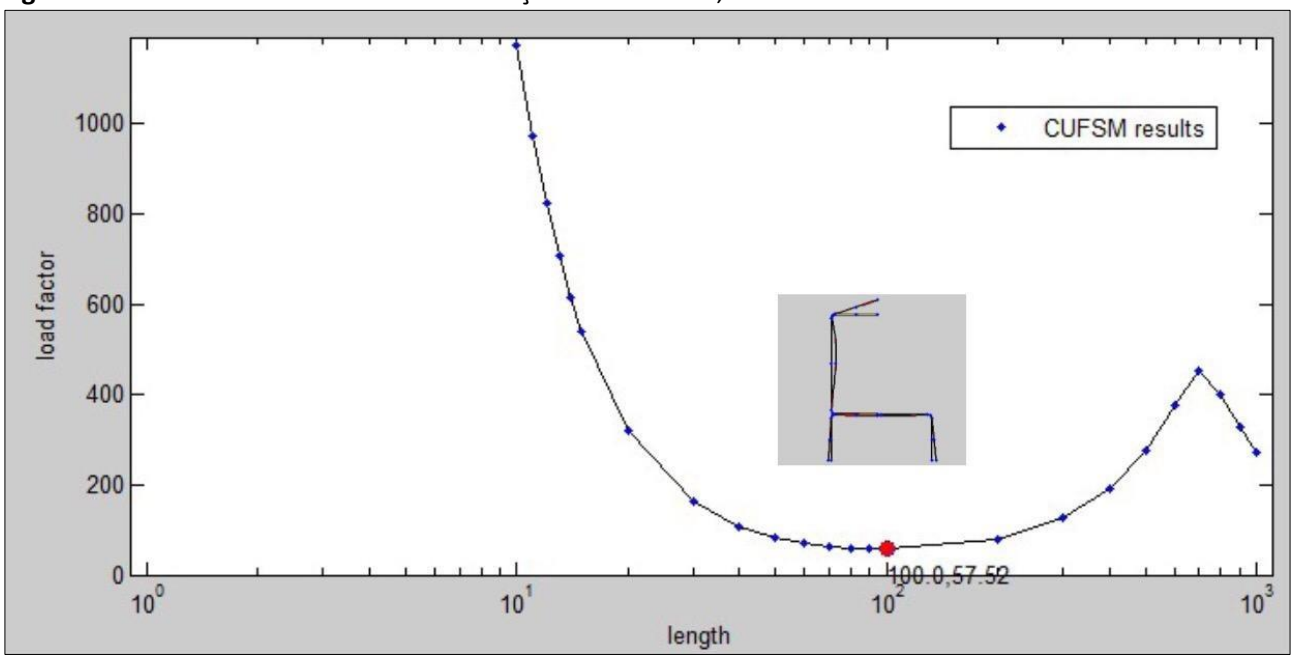
Portanto, a aplicação das dobras se mostrou pouco influente na instabilidade local dos modelos, porém, apresentou variações consideráveis para instabilidade distorcional, reduzindo as tensões e cargas críticas.

Figura 12. Análise das tensões críticas da seção 2Ue 89x41x12 #0,8 mm através do software CUFSM



Fonte: Os autores.

Figura 13. Análise das tensões críticas da seção 2U 89x41 #0,8 mm através do software CUFSM



Fonte: Os autores.

3. MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

Conforme o Anexo C da ABNT NBR 14762: 2010, seguiu-se o Método da Resistência Direta (MRD) para calcular o valor característico da resistência à compressão axial. Deste modo, os valores normais de resistência são calculados para os modos de flambagem global, local e distorcional, onde o valor mínimo é utilizado.

Modo global

Para o modo global, calcula-se a resistência da barra submetida à compressão centrada conforme a Equação (1).

$$N_{c,Re} = \begin{cases} \left(0{,}658^{\lambda_0^2}\right) Af_y ; Para\ \lambda_0 \leq 1{,}5 \\ \left(\frac{0{,}877}{\lambda_0^2}\right) Af_y ; Para\ \lambda_0 > 1{,}5 \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

λ_0 é índice de esbeltez reduzido relacionado à flambagem global, dado pela Equação (2).

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Af_y}{N_e}} \quad (2)$$

A é a área bruta da seção transversal.

f_y é a resistência ao escoamento do aço.

A força normal de flambagem global elástica por flexão é calculada ao longo de duas direções principais utilizando a Equação (3).

$$N_{e(x,y)} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (3)$$

Onde:

N_e corresponde à força normal crítica de flambagem elástica

E é o módulo de elasticidade.

I é momento de inércia.

KL é o comprimento efetivo de flambagem.

Como o perfil submetido no estudo é assimétrico, é necessário utilizar a Equação (4) para calcular a força normal de flambagem elástica por torção.

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2}.\left[\frac{\pi^2 EC_w}{(KL)^2} + GJ\right] \quad (4)$$

Onde:

r_0 é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção.

C_w é a constante de empenamento da seção.

G é o módulo de elasticidade transversal.

J é a inércia à torção.

A partir da obtenção dos resultados encontrados (N_{ex}, N_{ey} e N_{ez}), utiliza-se a Equação (5) de terceiro grau, onde, o valor da força crítica elástica (N_e) será a menor das raízes.

$$r_0^2(N_e - N_{e1})(N_e - N_{e2})(N_e - N_{ez}) - N_e^2(N_e - N_{e2})x_0^2 - N_e^2(N_e - N_{e1})y_0^2 = 0 \quad (5)$$

Onde:

x_0 e y_0 são as distâncias do centro de torção ao centroide nas direções dos eixos principais.

Modo local

Para o modo local, calcula-se a resistência de uma barra submetida à compressão centrada conforme a Equação (6).

$$N_{c,Rl} = \begin{cases} N_{c,Re};\ Para\ \lambda_l \leq 0{,}776 \\ \left(1 - \frac{0{,}15}{\lambda_l^{0,8}}\right)\left(\frac{N_{c,Re}}{\lambda_l^{0,8}}\right); Para\ \lambda_0 > 0{,}776 \end{cases}$$

(6)

Onde:

λ_l é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local, na qual, para sua obtenção utiliza-se a Equação (7).

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{N_{c,\mathrm{Re}}}{N_l}} \quad (7)$$

N_l é a força normal crítica elástica relativa ao modo local.

Modo distorcional

Para o modo distorcional, calcula-se a resistência de uma barra submetida à compressão centrada conforme a Equação (8).

$$N_{c,Rdist} = \begin{cases} Af_y ; Para\ \lambda_{dist} \leq 0{,}561 \\ \left(1 - \frac{0{,}25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right)\left(\frac{Af_y}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right); Para\ \lambda_{dist} > 0{,}561 \end{cases} \quad (8)$$

Onde:

λ_{dist} é o índice de esbeltez reduzido relacionado à flambagem distorcional estimado pela Equação (9).

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{dist}}} \quad (9)$$

N_{dist} é a força normal crítica elástica relativa ao modo distorcional.

Para obter valores de Nl e Ndist, é necessária a utilização de softwares, no caso foi realizada a análise de estabilidade elástica com o auxílio do software CUFSM.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram escolhidos perfis que constam na ABNT NBR 6355: 2012 para serem utilizados nas modelagens no software CUFSM, e aplicado o Método da Resistência Direta.

A modelagem considerou os perfis ligados por apenas um parafuso, espaçados ao longo dos seus comprimentos, portanto utilizando apenas um ponto de conexão.

O Quadro 7 apresenta as seções duplas em perfis U e U enrijecido que foram analisados, suas respectivas áreas de seção transversal e resultados obtidos.

Quadro 7. Resultados para as seções duplas compostas por perfis formados a frio

Descrição	Área (cm²)	Tensões Críticas (MPa)		Cargas Criticas (kN)		Pn (kN)	Modo de Falha
		$\sigma_{cr}L$ (local)	$\sigma_{cr}D$ (distorcional)	$P_{cr}L$ (local)	$P_{cr}D$ (distorcional)		
2U 100x50 #3,00 mm	11,43	568,43	-	649,87	-	229,61	Global
2Ue 125x50x17 #3,00 mm	14,38	623,47	744,89	896,28	1070,82	307,65	Global
2U 100x75 #3,00mm	14,43	275,87	-	398,16	-	289,87	Local
2U 150x50 #3,00 mm	14,43	342,99	-	495,03	-	290,74	Global
2Ue 150x60x20 #3,00 mm	17,44	429,04	581,67	748,06	1014,18	387,64	Global
2U 150x75 #3,00 mm	17,43	238,35	-	415,51	-	336,31	Global
2U 200x50 #3,00 mm	17,43	200,34	-	349,25	-	298,33	Local
2U 100x50 #4,75 mm	17,55	1148,81	-	2542,71	-	359,70	Global
2U 100x75 #4,75 mm	22,30	706,78	-	1576,14	-	484,02	Global
2U 150x50 #4,75 mm	22,30	865,47	-	19030,02	-	452,01	Global
2Ue 200x75x25 #3,00 mm	22,84	239,94	402,21	547,92	918,47	451,70	Local
2U 200x100 #3,00 mm	23,43	134,43	-	315,01	-	382,23	Local
2Ue 250x85x25 #3,00 mm	27,04	153,48	263,76	414,94	713,09	462,79	Global
2U 150x75 #4,75 mm	27,05	603,18	-	1631,62	-	599,30	Global
2U 200x50 #4,75 mm	27,05	503,63	-	1362,33	-	547,17	Global
2U 200x100 #4,75 mm	36,55	339,52	-	1240,96	-	810,00	Local

Fonte: Os autores.

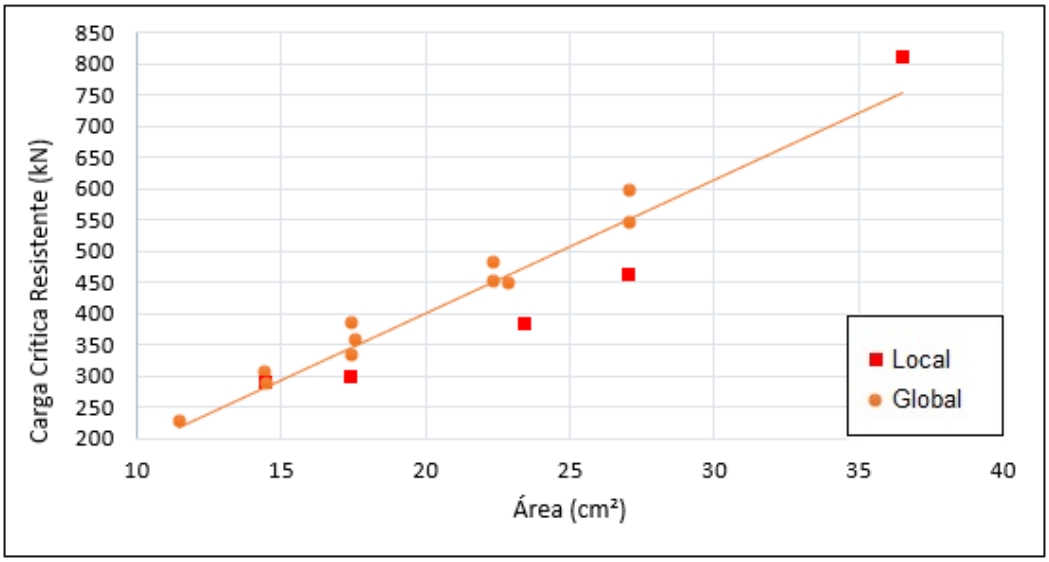
Os conjuntos foram dispostos no Quadro 7 em ordem crescente de área, para comparar melhor o consumo de aço com a resistência.

Buscou-se variar a relação dos comprimentos de alma e mesa dos perfis, para dois valores diferentes de espessura, sendo 3 e 4,75 mm. Foram escolhidos perfis do tipo U enrijecido que possuíssem valores de área da seção transversal próximos aos do tipo U, analisando assim, a influência da presença dos enrijecedores para perfis que acarretam o mesmo consumo de aço.

As propriedades geométricas utilizadas no cálculo pelo MRD foram retiradas da modelagem das seções no CUFSM, o programa ao realizar a análise disponibiliza os valores mínimos para cada modo de flambagem elástica, podendo ser exequível calcular a resistência através do MRD e indicar o modo de falha previsto teoricamente.

Os modelos são em seções monossimétricas e foram considerados com comprimento igual a um metro.

Figura 14. Gráfico da área pela carga crítica resistente calculada pelo MRD



Fonte: Os autores.

A Figura 14 apresenta um gráfico da relação da área por resistência dos modelos, onde pode-se observar que a norma brasileira ABNT NBR 14762:2010 produz resultados menores para carga crítica resistente quando considerado o modo de falha local, mesmo que para modelos de áreas muito próximas.

Também se observou que, o ganho de resistência entre perfis com modo de falha global teve uma tendência linear conforme o aumento da área de seção transversal.

5. CONCLUSÕES

Considerando o emprego de diferentes espessuras da conexão, concluiu-se que esse parâmetro estudado é desprezível na modelagem pelo CUFSM, ou seja, esse parâmetro não influenciou nos resultados.

Constatou-se que a variação da quantidade de conexões frente aos modelos livres e de conexão rígida, no contato entre perfis, influencia na análise e pode reproduzir o comportamento de conexão parcial para tipos específicos de conexões.

A aplicação de dobras mostrou-se eficiente para simular modelos de perfis formados a frio, apresentando pouquíssima influência nos resultados de instabilidade local, porém com considerável influência para instabilidade distorcional.

O Método da Resistência Direta apresentou um ganho linear de resistência conforme o aumento da área de seção transversal, exceto para os modelos que foram identificados com modo de falha local. Portanto o modo de falha foi o fator mais importante quanto à resistência.

Observando os resultados de modelos de áreas similares, outros dois fatores que também influenciaram no ganho de resistência foram: a espessura e a presença de enrijecedores.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14762:2010**. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6355:2012**. Perfis estruturais de aço formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

BASTOS, C. C. D. D´O.; BATISTA, E. M. Experimental analysis of built-up cold-formed steel lipped channel stub column**. Rem - International Engineering Journal,** Rio de Janeiro v. 72, n. 4, p. 571-579, Oct. 2019. https://doi.org/10.1590/0370-44672019720008

BASTOS, C. C. D. D´O. **Estabilidade estrutural de colunas treliçadas espaciais constituídas de perfis de aço formados a frio**. 2019. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Pós-Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

CHICAIZA, A., PROLA, L., MARTINEZ, L., GRAÇA, P. CONGRESSO DE CONSTRUÇÃO METÁLICA E MISTA, 12., 2019, Coimbra. **FSplines: um aplicativo para análise linear de estabilidade.** Coimbra, 2019. 9 p.

FRATAMICO, D. C.; TORABIAN, S.; ZHAO, X.I.; RASMUSSEN, K. JR.; SCHAFER, B. W.Experimental study on the composite action in sheathed and bare built-up cold-formed steel columns. **Thin-Walled Structures**, Baltimore, v. 127, p. 290-305, fev. 2018a. https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.02.002

FRATAMICO, D. C.; TORABIAN, S.; ZHAO, XI; RASMUSSEN, K. J.R.; SCHAFER, B. W.. Experiments on the global buckling and collapse of built-up cold-formed steel columns. **Journal of Constructional Steel Research**, Baltimore, v. 144, p. 65-80, jan. 2018a. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.01.007

LI, Z.; ABREU, J. C. B; LENG, J.; ÁDÁNY, S.; SCHAFER, B. W. Review: constrained finite strip method developments and applications in cold-formed steel design. **Thin-Walled Structures**, Baltimore, v. 81, p. 2-18,ago., 2014. https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.09.004

LI, Z.; SCHAFER, B.W. Application of the finite strip method in cold-formed steel member design. **Journal of Constructional Steel Research,** Baltimore, v. 66, n. 8-9, p. 971-980, ago., 2010. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.04.001

SCHAFER, B. W. Advances in the Direct Strength Method of cold-formed steel design. **Thin-walled structures**, . v. 140, p. 533–541, 2019. https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.03.001