

# Análise Numérica de Perfis Formados a Frio do tipo U Enrijecido com Perfurações Enrijecidas Submetidos à Compressão

*Numerical Analysis of Cold-formed Channel Sections with Stiffened Holes Under Axial Compression.*

Igor A. Neves de Nicolau<sup>1</sup>

 [orcid.org/0000-0002-9858-1418](https://orcid.org/0000-0002-9858-1418)

Arlene M. C. Sarmanho<sup>2</sup>

 [orcid.org/0000-0001-6900-8551](https://orcid.org/0000-0001-6900-8551)

Flávio Teixeira de Souza<sup>1</sup>

 [orcid.org/0000-0003-3261-9089](https://orcid.org/0000-0003-3261-9089)

<sup>1</sup>Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil.

<sup>3</sup> Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil.  
E-mail: [flavio.souza@ifmg.edu.br](mailto:flavio.souza@ifmg.edu.br)

DOI: [10.25286/rep.v8i2.2193](https://doi.org/10.25286/rep.v8i2.2193)

Esta obra apresenta Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

Como citar este artigo pela NBR 6023/2018: NICOLAU, I. A. N.; SARMANHO, A. M. C.; SOUZA, F. T. Análise Numérica de Perfis Formados a Frio do tipo U Enrijecido com Perfurações Enrijecidas Submetidos à Compressão. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v.8, n. 2, p. 1-10, 2023.

## RESUMO

Os Perfis de aço formados a frio constituem uma boa solução estrutural, devido à sua leveza e economia. No entanto, sua esbelteza induz modos de flambagem que podem reduzir sua resistência, fato agravado pela frequente existência de perfurações para fins de ligações ou compatibilização com instalações elétricas ou hidrossanitárias. Como possível solução, existe o emprego de enrijecedores nas bordas das perfurações. Este trabalho avaliou o efeito de perfurações enrijecidas em pilares sujeitos aos modos local e distorcional por meio de análise pelo método dos elementos finitos. Foi observado o efeito positivo das perfurações enrijecidas no aumento da resistência de pilares sujeitos ao modo local, e fatores como o diâmetro da perfuração e o comprimento do enrijecedor são importantes para o bom funcionamento desta solução.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estruturas de aço; Perfis Formados a Frio; Furos com Bordas Enrijecidas; Método dos Elementos Finitos;

## ABSTACT

Cold-formed steel profiles are a light and economic structural solution. They usually have high slenderness and are under buckling modes that can reduce their resistance. They often have perforations to fit connections or installations, that may potentialize the resistance reduction. As a solution, stiffeners in holes borders can be used. This work analyzes stiffened perforations effects in channel columns under local and distortional buckling by Finite Element analysis. It was observed that stiffened perforations increased the columns under local buckling resistance, and the perforations diameter and stiffener length have remarkable influence in analyzed columns.

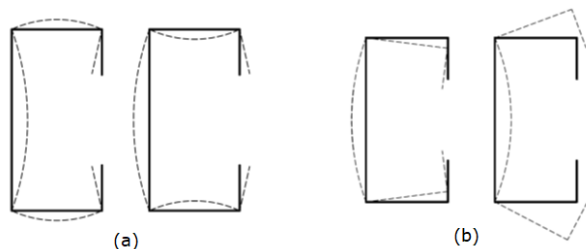
**KEY-WORDS:** Steel Structures; Cold-Formed Steel Profiles; Edge-Stiffened Perforations; Finite Element Method;

## 1 INTRODUÇÃO

Os Perfis Formados a Frio (PFF) são perfis formados a partir da conformação ou dobramento de chapas de aço, em geral de pequena espessura, e recebem este nome devido a este processo de fabricação, durante o qual o aço permanece em temperatura ambiente.

Os Perfis Formados a Frio possuem uma grande variedade de aplicações e são amplamente utilizados em sistemas de armazenagem e na construção civil em geral. Por serem elementos de elevada esbelteza, estão sujeitos a diferentes modos de flambagem: além da flambagem global, por flexão ou flexo-torção, podem sofrer a flambagem local ou a flambagem distorcional, apresentadas na Figura 1.

**Figura 1** - (a) Modo local na seção U enrijecido; (a) Modo distorcional.



Em diversas situações há a necessidade da presença de furos nos elementos constituintes da sua seção transversal para permitir, por exemplo, o encaixe das ligações entre as barras de um sistema de armazenamento, conforme a Figura 2, ou na alma de vigas visando a compatibilização entre projetos de instalações prediais, conforme a Figura 3. Os furos podem alterar a capacidade resistente e o comportamento das estruturas.

**Figura 2** - Sistema de armazenagem.



Fonte: [1].

**Figura 3** - Vigas de piso com furos enrijecidos na alma.



Fonte: [2].

Neste contexto, diversos trabalhos buscam avaliar a influência das perfurações no comportamento dos Perfis Formados a Frio e o desenvolvimento de métodos de dimensionamento capazes de quantificar sua influência na capacidade resistente de vigas e colunas [3- 8].

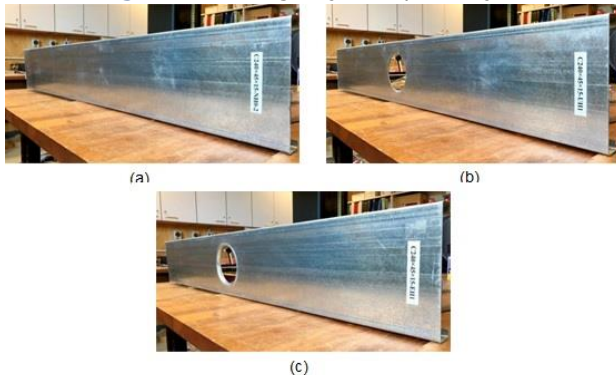
Apesar da norma brasileira NBR14762 [9] não trazer prescrições para a consideração das perfurações nos perfis formados a frio, a norma norte-americana AISI S100-16 [10] traz formulações para este fim que, geralmente, indicam a redução da capacidade resistente dos perfis formados a frio ocasionada pela existência de perfurações.

Assim, buscam-se soluções que reduzam a influência das perfurações no comportamento e na resistência destas estruturas. Uma alternativa é a adoção de enrijecedores nas bordas das perfurações, conforme pode ser visto na Figura 3. Estes enrijecedores podem ser obtidos durante a fabricação a partir do dobramento das bordas durante o processo de punção que gera as perfurações [11], e são objeto de pesquisas recentes que avaliam sua eficiência [12 - 15]. A Figura 4 apresenta a configuração de perfis sem perfurações, com furos sem enrijecedor e com furos com bordas enrijecidas.

Neste contexto, surge a necessidade de avaliar a influência da geometria dos furos e dos enrijecedores da borda do furo no comportamento do perfil formado a frio. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do diâmetro da perfuração e do comprimento do enrijecedor da borda do furo em perfis formados a frio do tipo U enrijecido com uma perfuração circular à meia altura do protótipo, por meio de análise numérica via elementos finitos em modelo

validado a partir de resultados experimentais obtidos na literatura.

**Figura 4** - Configuração de perfuração.



Fonte: [15].

## 2 MODELO NUMÉRICO E VALIDAÇÃO

Nesta seção será apresentada a modelagem numérica de Perfis Formados a Frio de seção transversal U enrijecido submetidos à compressão centrada. O modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) foi implementado através do *software* ANSYS [16]. Ao todo, foram realizadas 300 simulações numéricas, avaliando dois modos de flambagem: local e distorcional.

### 2.1 Seção transversal

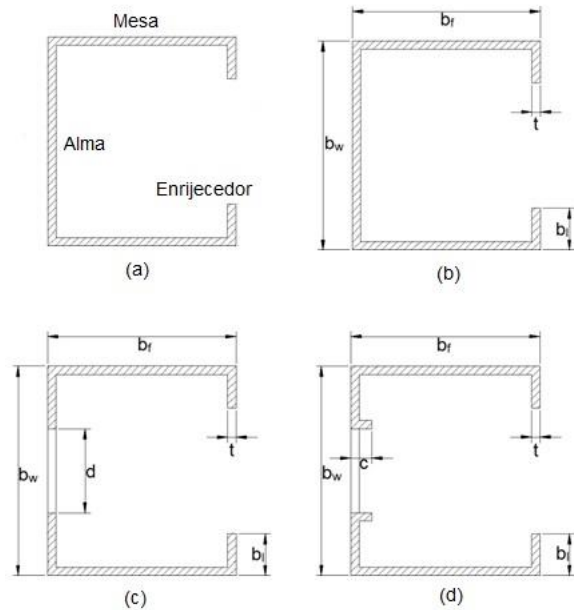
Neste estudo foi adotada a seção U enrijecido, objeto de estudos anteriores [6, 8, 12, 13, 14, 15]. A Figura 5 apresenta a seção U enrijecido e as seções sem perfurações (SF), com furos não enrijecidos (FNE) e com furos enrijecidos (FE), a Tabela 1 apresenta as seções adotadas e a Tabela 2 apresenta as dimensões do diâmetro da perfuração e do comprimento do enrijecedor.

A nomenclatura adotada é a seguinte:

**Ue 100x50x20x1,6 FE D20BW C10BW**

- o termo Ue designa o tipo de perfil, U enrijecido;
- o termo 100x50x20x1,6 representa respectivamente a largura da alma ( $b_w$ ), a largura do flange ( $b_f$ ), a largura do enrijecedor ( $b_l$ ) e a espessura da chapa ( $t$ ), todas em milímetros;
- FE indica o perfil com furo enrijecido
- o termo D20BW indica o diâmetro do furo ( $d$ ) igual a 20% de  $b_w$ ;
- o termo C10BW indica o comprimento do enrijecedor da borda do furo ( $c$ ) igual a 10% de  $b_w$ .

**Figura 5** - Configurações de perfuração das seções estudadas.



**Tabela 1** - Seção transversal por modo de flambagem.

Seção Estudada	$b_w$ (mm)	$b_f$ (mm)	$b_l$ (mm)	$t$ (mm)	$A_g$ (mm <sup>2</sup> )
Modo local					
Ue 100x50x20x1,2	100	50	20	1,2	288
Ue 100x50x20x1,4	100	50	20	1,4	336
Ue 100x50x20x1,6	100	50	20	1,6	384
Ue 100x50x20x1,8	100	50	20	1,8	432
Ue 100x50x20x2,0	100	50	20	2	480
Modo distorcional					
Ue 50x45x10x1,2	50	45	10	1,2	192
Ue 50x45x10x1,4	50	45	10	1,4	224
Ue 50x45x10x1,6	50	45	10	1,6	256
Ue 50x45x10x1,8	50	45	10	1,8	288
Ue 50x45x10x2,0	50	45	10	2	320

**Tabela 2** - Dimensões da perfuração ( $d$ ) e do enrijecedor de borda ( $c$ ).

Seção	$d$	$c$
FNE D20BW	20% $b_w$	-
FNE D40BW	40% $b_w$	-
FNE D80BW	80% $b_w$	-
FE D20BW C5BW	20% $b_w$	5% $b_w$
FE D40BW C5BW	40% $b_w$	5% $b_w$
FE D80BW C5BW	80% $b_w$	5% $b_w$
FE D20BW C10BW	20% $b_w$	10% $b_w$
FE D40BW C10BW	40% $b_w$	10% $b_w$

## 2.2 Análise via Teoria Generalizada de Vigas

Neste estudo, a análise por meio da Teoria Generalizada de Vigas, por meio do *software* GBTul [17], foi utilizada para a determinação da carga crítica de flambagem e do comprimento de flambagem das seções transversais sem perfurações adotadas. Isto foi necessário para a escolha do comprimento das colunas utilizadas no modelo via elementos finitos. A Tabela 3 apresenta, para cada seção transversal estudada, a força axial de flambagem local elástica ( $N_l$ ), o comprimento de meia onda associado ao modo local ( $L_l$ ), a força axial de flambagem distorcional elástica ( $N_{dist}$ ) e o comprimento de meia onda associado ao modo distorcional ( $L_{dist}$ ).

A

Tabela 4 apresenta os comprimentos adotados para os modelos numéricos ( $L_{MEF}$ ). No grupo em que se avalia a flambagem local, foi adotado um comprimento igual a cinco vezes o comprimento de meia onda associado ao modo local ( $L_l$ ), a fim de evitar a inibição do desenvolvimento do modo pelo efeito de extremidade ocasionado pela ação dos apoios. Para o grupo em que se avalia a flambagem distorcional, foi adotado o comprimento de meia onda associado ao modo distorcional ( $L_{dist}$ ).

**Tabela 3** - Força axial de flambagem e comprimento de meia onda das seções sem perfurações.

Seção Estudada	Flambagem Local		Flambagem Distorcional	
	$N_l$ (kN)	$L_l$ (mm)	$N_{dist}$ (kN)	$L_{dist}$ (mm)
Ue 50x45x10x1,2	92,66	50	68,37	350
Ue 50x45x10x1,4	146,70	50	95,37	300
Ue 50x45x10x1,6	218,21	50	126,91	300
Ue 50x45x10x1,8	309,41	50	165,55	300
Ue 50x45x10x2,0	422,37	50	207,86	250
Ue 100x50x20x1,2	40,80	80	89,22	650
Ue 100x50x20x1,4	64,77	80	123,23	600
Ue 100x50x20x1,6	96,64	80	163,28	600
Ue 100x50x20x1,8	137,55	80	209,21	550
Ue 100x50x20x2,0	188,59	80	262,44	500

**Tabela 4** - Comprimento no modelo numérico.

Seção Estudada	Modo Distorcional		Modo Local	
	$L_{MEF}$ (mm)	Seção Estudada	$L_{MEF}$ (mm)	Seção Estudada
Ue 50x45x10x1,2	350	Ue 100x50x20x1,2	400	
Ue 50x45x10x1,4	300	Ue 100x50x20x1,4	400	
Ue 50x45x10x1,6	300	Ue 100x50x20x1,6	400	
Ue 50x45x10x1,8	300	Ue 100x50x20x1,8	400	
Ue 50x45x10x2,0	250	Ue 100x50x20x2,0	400	

## 2.3 Análise via Método dos Elementos Finitos

Os Perfis Formados a Frio sem furos e com furos (enrijecidos e não enrijecidos) submetidos à compressão centrada foram analisados pelo Método dos Elementos Finitos por meio do *software* ANSYS. Nesta seção serão apresentados o tipo de elemento, o refinamento da malha, as condições de contorno e de carregamento e as propriedades mecânicas dos aços adotados neste estudo.

### 2.3.1 Malha de Elementos Finitos

O tipo de elemento finito utilizado foi o SHELL181, um elemento de casca com quatro nós, especialmente indicado para análises plásticas podendo ser utilizado com integração reduzida (IR) ou com integração completa (IC), sendo esta a opção adotada nesta pesquisa. Foram geradas malhas quadrilaterais, com o lado do elemento igual a 10% da largura da alma ( $b_w$ ) [18, 19], conforme mostra a Figura 6.

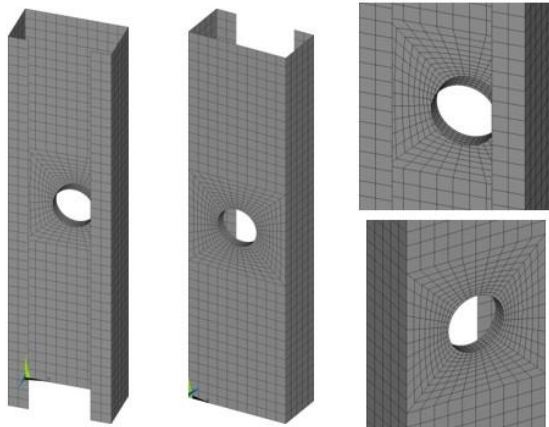
Nos perfis com perfurações, enrijecidas e não enrijecidas, foi realizado um ajuste adicional da malha devido à inserção da perfuração circular na alma da coluna. Para a região da alma próxima ao furo foi utilizada uma malha mapeada para se adequar à malha quadrilateral de dimensão igual a 10% da largura da alma utilizada ao longo do perfil, com a perfuração inserida. Para os perfis com furo enrijecido, a dimensão na direção normal ao plano da alma (dimensão na direção do comprimento do enrijecedor da borda do furo) da malha quadrilateral utilizada no enrijecedor da borda do furo foi igual a 2,5% da largura da alma.

Na Figura 6 é apresentado o modelo de elemento finito da seção Ue 100x50x20x1,6 FE D40BW C10BW implementado através do

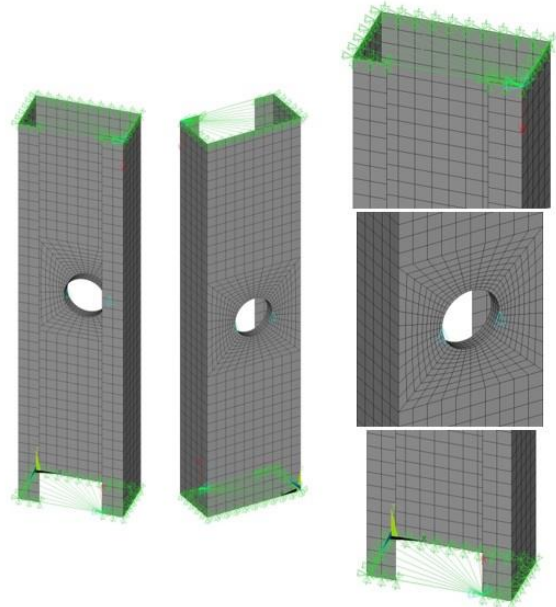


software ANSYS com a malha quadrilateral de dimensão equivalente a 10% da largura da alma. Também é apresentado o ajuste da malha quadrilateral na região da perfuração com a malha mapeada.

**Figura 6** - Modelo de elemento finito da Seção Ue 100x50x20x1,6 D40BW C10BW.



**Figura 7** - Modelo de elemento finito com condições de contorno e carregamento.



### 2.3.2 Condições de contorno e carregamento

Neste estudo os nós localizados em cada uma das extremidades da coluna tiveram todos os seus graus de liberdade acoplados e no nó mestre, foram aplicadas as condições de contorno e carregamento (Figura 7).

Neste tipo de análise as condições de contorno simulam uma barra com as extremidades rotuladas [18], então, para isto, nos nós mestres localizados nas extremidades da coluna foram aplicadas restrições de deslocamento nas direções ortogonais ao eixo da coluna, ou seja, direção X e direção Z (Figura 7). Nestes mesmos nós mestres foram aplicadas as forças concentradas de compressão (Figura 7). Adicionalmente, para impedir o deslocamento de corpo rígido da coluna, em um nó (ou dois nós, para os perfis com furo) localizado à meia altura da coluna foi aplicada a restrição de deslocamento na direção do eixo da coluna, ou seja, na direção Y (Figura 7).

### 2.3.3 Propriedades mecânicas dos materiais

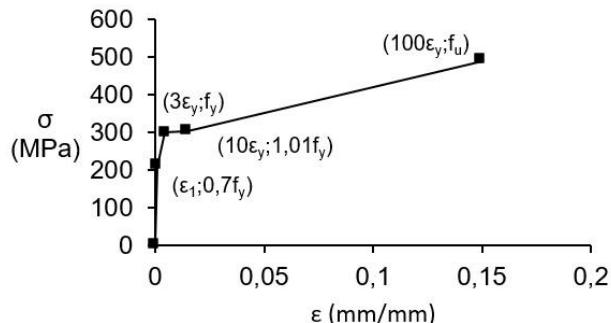
Neste estudo foram adotados os aços CF-30, ZAR 250 e ZAR 400 especificados pela NBR 14762:2010 [9] para uso estrutural, com as respectivas resistências ao escoamento ( $f_y$ ) e resistência última ( $f_u$ ):

- CF-30:  $f_y=300$  MPa e  $f_u=490$  MPa;
- ZAR 250:  $f_y=250$  MPa e  $f_u=360$  MPa;
- ZAR 400:  $f_y=400$  MPa e  $f_u=450$  MPa;

O módulo de elasticidade adotado em todos os modelos foi  $E=200$  GPa e o coeficiente de Poisson é  $\nu=0,3$ . Em todos os modelos foi adotado o diagrama Tensão - Deformação

multilinear proposto por [19], apresentado na Figura 8.

**Figura 8** - Diagrama Tensão X Deformação bilinear Aço CF-30.



Fonte: [19].

### 2.3.4 Solução do problema não linear

A primeira etapa da solução foi a análise de flambagem elástica foi determinado primeiro modo de flambagem que representasse o modo para a análise desejada: modo local ou modo distorcional.

Em seguida atualizou-se a geometria do modelo de elemento finito de acordo com os resultados de deslocamento da análise de flambagem para a introdução das imperfeições. Neste estudo foi adotada uma imperfeição geométrica equivalente à metade da espessura da chapa das seções estudadas. Em trabalhos anteriores [18, 19] foi observado que as imperfeições estão, geralmente, abaixo deste valor.

As propriedades elastoplásticas do material foram introduzidas utilizando o diagrama de tensão-deformação bilinear apresentado na Figura 8. Foi aplicada a carga de compressão que leva o aço ao escoamento nos nós mestres localizados nas extremidades das colunas.

Como estratégia de incremento de carga foi utilizado o método do comprimento de arco, adotando-se como critério de parada um limite de deslocamento suficiente para um pleno desenvolvimento do modo analisado.

### 2.4 Validação do modelo numérico

Com o intuito de validar o modelo de elementos finitos proposto, seus resultados foram comparados com resultados experimentais presentes na literatura [13].

A seção transversal utilizada na validação possui a largura da alma ( $b_w$ ) igual a 190 mm, a largura do flange ( $b_f$ ) igual a 45 mm, a largura do enrijecedor ( $b_l$ ) igual a 15 mm e a espessura da chapa ( $t$ ) igual a 1,45 mm. As colunas com perfurações (enrijecidas e não enrijecidas) selecionadas possuíam apenas um furo localizado à meia altura da coluna. O diâmetro da perfuração circular foi igual a 90 mm. Para o perfil com perfuração enrijecida, o comprimento do enrijecedor da borda do furo foi igual a 13 mm. O comprimento do pilar é 750 mm, pois para este comprimento foi verificado, por meio do *software* GBTul, a ocorrência de flambagem local sem interação com outro modo.

A Tabela 5 apresenta o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local numérico ( $N_{c,RI-MEF}$ ) obtido neste trabalho e o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local experimental ( $N_{c,RI-EXP}$ ) obtido nos estudos de [13], para seções sem furos (SF), com furos não enrijecidos (FNE) e com furos enrijecidos (FE). Também é apresentada a relação entre os valores numéricos e experimentais ( $N_{c,RI-MEF}/N_{c,RI-EXP}$ ) para as três configurações de perfurações. Observa-se boa correlação entre resultados numéricos e experimentais, indicando a validade do modelo numérico proposto.

**Tabela 5** - Resultados numéricos X Resultados experimentais.

Seção Estudada	$N_{c,RI-MEF}$ (kN)	$N_{c,RI-EXP}$ (kN)	$N_{c,RI-MEF} / N_{c,RI-EXP}$
Ue 190x45x15x1,45 SF	69,63	75,65	0,92
Ue 190x45x15x1,45 FNE D90	59,07	60,62	0,97
Ue 190x45x15x1,45 FE D90 C13	73,73	78,83	0,94

## 3 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos através de simulações numéricas baseadas no Método dos Elementos Finitos utilizando o *software* ANSYS. Serão comparadas a influência dos diferentes tipos de perfurações, seus diâmetros e das dimensões dos enrijecedores de borda utilizados no comportamento e na resistência das colunas.

### 3.1 Flambagem Local

A Tabela 6 apresenta os valores característicos da força axial de compressão resistente, associados à flambagem local, em função da configuração da perfuração e da espessura da chapa para a seção Ue 100×50×20 com o aço CF-30. Pode-se verificar que, quanto maior a espessura da chapa, maior é a resistência do perfil para uma mesma configuração de perfuração. Para os perfis com furo não enrijecido (FNE) quanto maior o diâmetro do furo, menor é a resistência do perfil para uma mesma espessura de chapa. Ao avaliar os perfis com furo enrijecido (FE) com comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 5%  $b_w$  e 10%  $b_w$ , pode-se verificar um aumento na capacidade resistente em comparação com os perfis com furo não enrijecido (FNE). Em geral, os perfis com furo enrijecido (FE) de comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 10%  $b_w$  apresentaram resistência superior aos perfis com comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 5%  $b_w$ .

**Tabela 6** - Resistência à compressão associada à flambagem local (kN).

Seção	Espessura da chapa t (mm)				
	1,2	1,4	1,6	1,8	2
SF	46,15	57,99	67,11	76,39	88,40
FNE D20BW	44,05	54,88	62,83	76,45	81,77
FNE D40BW	42,77	51,50	58,22	67,69	81,27
FNE D80BW	34,15	41,18	55,05	62,72	70,29
FE D20BW C5BW	47,75	54,50	63,24	78,16	87,46
FE D40BW C5BW	41,19	51,73	63,58	74,29	83,49
FE D80BW C5BW	34,20	43,35	50,46	63,07	65,29
FE D20BW C10BW	45,06	58,04	63,45	78,42	84,16
FE D40BW C10BW	42,46	55,59	61,57	69,84	84,24
FE D80BW C10BW	35,19	42,84	51,72	58,85	66,87

A Tabela 7 apresenta a relação entre o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local para os perfis com furos enrijecidos ( $N_{c,RI-FE}$ ) ou não enrijecidos ( $N_{c,RI-FNE}$ ), e o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem local para os perfis sem furos ( $N_{c,RI-SF}$ ), sendo:  $N_{c,RI-FE} / N_{c,RI-SF}$  ou  $N_{c,RI-FNE} / N_{c,RI-SF}$ , para a seção Ue 100×50×20 com o aço CF-30. É possível verificar que para os perfis com furos não enrijecidos a relação  $N_{c,RI-FNE} / N_{c,RI-SF}$  foi menor do que 1 em todos os casos, indicando o

efeito deletério da perfuração não enrijecida na resistência dos perfis, e a relação foi tão menor quanto maior foi o diâmetro do furo não enrijecido, chegando a 0,77 para a seção Ue 100×50×20×1,6 FNE D80BW.

Os perfis com furos enrijecidos de diâmetros iguais a 20%  $b_w$  e 40%  $b_w$ , em geral, apresentaram uma relação  $N_{c,RI-FE} / N_{c,RI-SF}$  superior a 100%, indicando que a inserção do enrijecedor na borda da perfuração leva a uma recuperação significativa de resistência em comparação aos perfis com furos não enrijecidos e até mesmo, ultrapassando a capacidade resistente dos mesmos perfis sem furos. Os melhores resultados foram obtidos para perfis com furo enrijecido com diâmetro igual a 40%  $b_w$  e com comprimento do enrijecedor igual a 10%  $b_w$ , indicando a influência destas dimensões no comportamento do pilar.

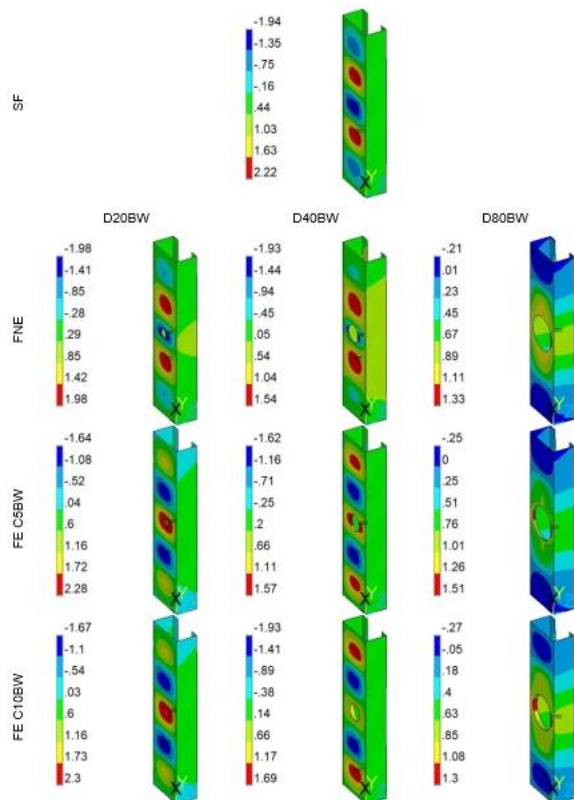
Nos perfis com furos enrijecidos (FE) de diâmetro igual a 80%  $b_w$  não foram observadas mudanças significativas em relação aos perfis com furos não enrijecidos indicando que a redução da área da seção transversal é tão significativa que ocorre a inibição da flambagem local, ocorrendo o escoamento da seção líquida em todos os perfis com perfurações. A Figura 9 apresenta os deslocamentos nas almas dos perfis analisados.

**Tabela 7** - Relação entre a resistência dos perfis com furos (enrijecido e não enrijecido) e a resistência dos perfis sem furos (%).

Seção	Espessura da chapa t (mm)				
	1,2	1,4	1,6	1,8	2
FNE D20BW	100	98	97	97	97
FNE D40BW	98	95	93	92	92
FNE D80BW	89	83	80	78	77
FE D20BW C5BW	100	101	100	100	100
FE D40BW C5BW	102	102	102	100	98
FE D80BW C5BW	89	84	81	80	79
FE D20BW C10BW	100	101	101	100	100
FE D40BW C10BW	102	102	102	102	102
FE D80BW C10BW	92	87	84	82	80

## Análise Numérica de Perfis Formados a Frio do tipo U Enrijecido com Perfurações Enrijecidas Submetidos à Compressão

**Figura 9** - Componente Z do deslocamento da seção Ue 100×50×20×1,6 Aço CF-30 (mm).



### 3.2 Flambagem Distorcional

A Tabela 8 apresenta os valores característicos da força axial de compressão resistente, associados à flambagem distorcional, em função da configuração da perfuração e da espessura da chapa para a seção Ue 50×45×10 com o aço CF-30.

**Tabela 8** - Resistência à compressão associada à flambagem distorcional (kN).

Seção	Espessura da chapa t (mm)				
	1,2	1,4	1,6	1,8	2
SF	46,15	57,99	67,11	76,39	88,40
FNE D20BW	44,05	54,88	62,83	76,45	81,77
FNE D40BW	42,77	51,50	58,22	67,69	81,27
FNE D80BW	34,15	41,18	55,05	62,72	70,29
FE D20BW C5BW	47,75	54,50	63,24	78,16	87,46
FE D40BW C5BW	41,19	51,73	63,58	74,29	83,49
FE D80BW C5BW	34,20	43,35	50,46	63,07	65,29
FE D20BW C10BW	45,06	58,04	63,45	78,42	84,16
FE D40BW C10BW	42,46	55,59	61,57	69,84	84,24
FE D80BW C10BW	35,19	42,84	51,72	58,85	66,87

A partir dos dados apresentados na Tabela 8 é possível verificar que quanto maior a espessura da chapa, maior é a resistência do perfil para uma mesma configuração de perfuração. Para os perfis com furo não enrijecido (FNE) quanto maior o diâmetro do furo, menor é a resistência do perfil para uma mesma espessura de chapa. Ao avaliar os perfis com furo enrijecido (FE) com comprimento do enrijecedor da borda do furo igual a 5%  $b_w$  e 10%  $b_w$ , pode-se verificar, que em alguns casos, houve um pequeno aumento na capacidade resistente em comparação com os perfis com furo não enrijecido (FNE), porém, em geral não alcançou os patamares dos perfis sem furo (SF). Os perfis com furo enrijecido e não enrijecido com diâmetro igual a 80%  $b_w$  apresentaram diminuição da capacidade resistente em comparação aos perfis sem furo.

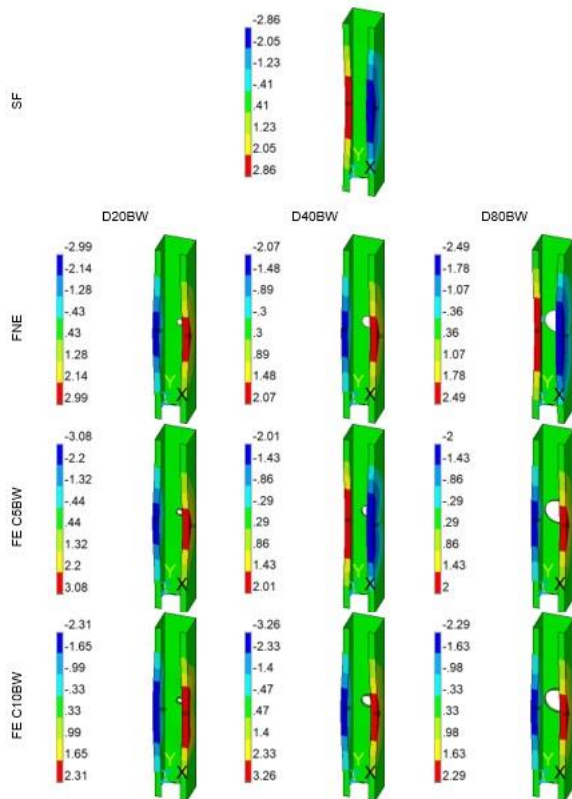
A Tabela 9 apresenta a relação entre o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem distorcional para os perfis com furos enrijecidos ( $N_{c,Rdist-FE}$ ) ou não enrijecidos ( $N_{c,Rdist-FNE}$ ), e o valor característico da força axial de compressão resistente, associado à flambagem distorcional para os perfis sem furos ( $N_{c,Rdist-SF}$ ), sendo:  $N_{c,Rdist-FE} / N_{c,Rdist-SF}$  ou  $N_{c,Rdist-FNE} / N_{c,Rdist-SF}$ , para a seção Ue 50×45×10 com o aço CF-30. A Figura 10 apresenta os deslocamentos no modo distorcional.

**Tabela 9** - Relação entre a resistência dos perfis com furos (enrijecido e não enrijecido) e a resistência dos perfis sem furos (%).

Seção	Espessura da chapa t (mm)				
	1,2	1,4	1,6	1,8	2
FNE D20BW	95	95	94	100	92
FNE D40BW	93	89	87	89	92
FNE D80BW	74	71	82	82	80
FE D20BW C5BW	103	94	94	102	99
FE D40BW C5BW	89	89	95	97	94
FE D80BW C5BW	74	75	75	83	74
FE D20BW C10BW	98	100	95	103	95
FE D40BW C10BW	92	96	92	91	95
FE D80BW C10BW	76	74	77	77	76



**Figura 10** - Componente X do deslocamento seção Ue 50×45×10×1,6 Aço CF-30 (mm).



A partir da Tabela 9 é possível verificar que, em geral, no âmbito da flambagem distorcional a relação  $N_{c,Rdist-FNE} / N_{c,Rdist-SF}$  e a relação  $N_{c,Rdist-FE} / N_{c,Rdist-SF}$  foram menores do que 100%. Isto indica que a capacidade resistente diminuiu ao inserir uma perfuração na alma do perfil, independentemente da espessura e da configuração de perfuração, sugerindo que o enrijecimento da alma proporcionado pelos enrijecedores nas bordas dos furos é insuficiente para inibir o desenvolvimento do modo distorcional.

Ressalta-se que, também nos perfis sujeitos à flambagem distorcional, os perfis com furos de diâmetro 80%  $b_w$  foram afetados pelo escoamento da seção líquida, o que reduziu sobremaneira a sua resistência.

## 4 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a influência da introdução de enrijecedores na borda das perfurações existentes na alma de Perfis Formados a Frio do tipo U enrijecido. Foram avaliados perfis sem furo (SF), perfis com um furo não enrijecido (FNE) e perfis com um furo

enrijecido (FE). Foram adotados três diâmetros para o furo e adotados dois comprimentos do enrijecedor da borda do furo.

Foi perceptível que, para as condições de geometria estudadas, o modo de flambagem local apresentou maior recuperação de capacidade resistente do que o modo de flambagem distorcional quando se introduzem os enrijecedores de borda nas perfurações. Isto acontece porque estes enrijecedores atuam principalmente na alma da seção, impedindo o desenvolvimento do modo local. O aumento do comprimento do enrijecedor se mostrou eficiente no incremento da capacidade resistente dos pilares.

As colunas com perfurações de diâmetro igual a 80% da largura da alma ( $b_w$ ) apresentaram as menores capacidades resistentes à compressão, mesmo ao inserir o enrijecedor na borda da perfuração. Isto ocorre devido à grande magnitude da perfuração, que leva a grande redução da área da seção transversal, o que inibe o desenvolvimento dos modos de flambagem devido ao escoamento da seção líquida.

Para as seções sujeitas à flambagem distorcional, a introdução dos enrijecedores nas bordas dos furos mostrou-se pouco eficiente. Nas seções sujeitas à flambagem local, com exceção daquelas em que o diâmetro é 80%  $b_w$ , a inserção de enrijecedores leva ao aumento da capacidade resistente do pilar.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Ouro Preto e à Universidade Federal de Ouro Preto e pelo apoio a esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- [1] CAI, J.; MOEN, C. D. Elastic buckling analysis of thin-walled structural members with rectangular holes using generalized beam theory. **Thin-Walled Structures**, v. 107, p. 274-286, 2016.
- [2] YU, C.; Cold-formed steel flexural member with edge stiffened holes: behavior, optimization, and design. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 71, p. 210-218, 2012.
- [3] MOEN, C. D.; SCHAFFER, B. W. Direct strength method for design of cold-formed steel columns with holes. **Journal of Structural Engineering**, v. 137, ed. 5, p.

- 559-570, 2011. DOI:  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000310](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000310).
- [4] SALES, A. E. C. A. **Análise da aplicação do método da resistência direta a perfis formados a frio com perfurações submetidos à compressão**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- [5] SOUZA, F. T. de; SANTOS, E. T. dos; SARMANHO, A. M. C. Análise numérica da influência das dimensões de perfurações em perfis formados a frio do tipo rack submetidos à compressão. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, Paranaguá, PR, v. 5, n. 5, p. 1-266, 2020.
- [6] JARDIM JR., F; HELENO, R. P., SARMANHO, A. M. C.; SOUZA, F. T. Estudo da viabilidade do Método da Resistência Direta em perfis U enrijecidos formados a frio com perfurações. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 1, p. 1-15, 2021.
- [7] PINTO, R. A. R., SARMANHO, A. M. C.; SOUZA, F. T. Análise numérica das dimensões e posição das perfurações na resistência à instabilidade distorcional de perfis formados a frio do tipo rack comprimidos. **Revista da Estrutura de Aço**, v. 10, n. 3, p. 333-350, 2021.
- [8] OLIVEIRA, L. C. P., SARMANHO, A. M. C.; SOUZA, F. T. Análise da influência das dimensões das perfurações em pilares compostos por perfis em aço formados a frio do tipo U enrijecido. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 7, n. 1, p. 30-37, 2022.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14762**: dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- [10] AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **AISI S100-16**: north american specification for the design of cold-formed steel structural members: AISI, 2016.
- [11] HOWICK, 2020 Disponível em:  
<https://www.howickltd.com/>. Acesso em: 2 fev. 2021.
- [12] GREY, C.N.; MOEN, C.D. Elastic buckling simplified methods for cold-formed columns and beams with edge-stiffened holes. **Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council**, Pittsburgh, Pennsylvania, p. 1-12. 2011.
- [13] CHEN, B.; ROY, K.; UZZAMAN, A.; RAFTERY, G.; NASH, D., CLIFTON, G. C., POULADI, P.; LIM, J. B. P. Effects of edge-stiffened web openings on the behaviour of cold formed steel channel sections under compression. **Thin-Walled Structures**, v. 144, p. 1-21, 2019.
- [14] CHEN, B.; ROY, K.; UZZAMAN, A.; RAFTERY, G.; LIM, J. B. P. Parametric study and simplified design equations for cold-formed steel channels with edge-stiffened holes under axial compression. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 172, p. 1-27, 2020a. DOI:  
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106161>.
- [15] CHEN, B.; ROY, K.; UZZAMAN, A.; RAFTERY, G.; LIM, J. B. P. Axial strength of back-to-back cold-formed steel channels with edge-stiffened holes, un-stiffened holes and plain webs. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 174, p. 1-22, 2020b. DOI:  
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106313>.
- [16] ANSYS® Structural Analysis, release 15.0, Help System. Mechanical APDL Structural Analysis Guide. ANSYS, Inc., Canonsburg, PA. 522 p.,2013.
- [17] BEBIANO, R., SILVESTRE, N., CAMOTIM, D. GBTUL - A code for the buckling analysis of cold-formed steel members. In: **INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES**, 19., 2008, St. Louis (MO). Proceedings. St. Louis (MO): p. 61-79, Oct. 14 and 15 2008.
- [18] SOUZA, F. T. de. **Análise teórico-experimental da estabilidade de colunas perfuradas em perfis de aço formados a frio de seções tipo rack**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.
- [19] FARIA, V. O. **Análise de estabilidade de perfis formados a frio com perfurações**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.