

ESTUDO DA VIABILIDADE DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA EM PERFIS U ENRIJECIDOS FORMADO A FRIO COM PERFURAÇÕES

Study of the viability of the Direct Strength Method in cold formed steel lipped channel sections with perforations

Fausto Jardim Júnior¹, Raphael Pedrosa Heleno², Arlene Maria Cunha Sarmanho³, Flávio Teixeira de Souza⁴



PALAVRAS CHAVE:

Estrutura Metálica;
Perfil formado a frio;
Flambagem distorcional;
Método da Resistência Direta;
Sistemas de armazenagem industrial;

KEYWORDS:

Steel structures;
Cold-formed steel sections;
Distorcional buckling;
Direct Strength Method;
Steel storage systems.

RESUMO: Os perfis formados a frio são largamente utilizados na construção civil devido à sua versatilidade, leveza e resistência. Muitas vezes, para atender à passagem de dutos e soluções estruturais como as ligações dos sistemas de armazenagem industrial, os perfis formados a frio são perfurados. As literaturas normativas atuais não consideram a influência das perfurações na capacidade resistente e no comportamento de perfis formados a frio com perfurações. Este trabalho avalia extensões do Método da Resistência Direta, para a determinação da força axial resistente de perfis formados a frio de seção U enrijecido, com furos, sob compressão centrada, no âmbito da flambagem distorcional. Tais avaliações foram feitas utilizando o método dos elementos finitos. Os resultados indicaram a viabilidade da adaptação do Método de Resistência Direta para considerar a presença de furos no dimensionamento de perfis formados a frio.

ABSTRACT: *The cold-formed steel profiles are widely used in the civil construction due to its versatility, lightness and strength. Often, to accommodate the passage of ducts and structural solutions such as the connections of Industrial Storage Systems, the cold-formed steel profiles are perforated. The current literature normative does not consider the influence of perforations on the strength capacity and behavior of cold-formed steel profiles with perforations. This research work evaluates extensions of the Direct Strength Method for the determination of the axial strength of cold-formed steel lipped channel sections, with holes, under centered compression, in the scope of distorcional buckling. These evaluations were done using the finite element method. The results indicated the feasibility of the adaptation of the Direct Strength Method to consider the presence of holes in the design procedure of cold-formed steel profiles.*

* Contato com os autores:

Publicado em 01 de dezembro de 2021.

¹ e-mail: fausto.jardim.jr@gmail.com (F. Jardim Júnior)

Engenheiro Civil, Msc., Professor, Faculdade Santa Rita

² e-mail: rph22292@gmail.com (R. P. Heleno)

Engenheiro Mecânico, Mestrando, Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais

³ e-mail: arlene.sarmanho@gmail.com (A. M. C. Sarmanho)

Engenheira Civil, D.Sc., Professora, Universidade Federal de Ouro Preto

⁴ e-mail: flavio.souza@ifmg.edu.br (F. T. Souza)

Engenheiro Civil, D.Sc., Professor, Instituto Federal de Minas Gerais Campus Ouro Preto

1. INTRODUÇÃO

Alguns sistemas estruturais, como vigas e colunas de aço formado a frio, são fabricados com perfurações. As perfurações são adotadas, por exemplo, para atender à passagem de dutos de instalações prediais. Outra finalidade das perfurações é atender a soluções estruturais como o encaixe das ligações dos sistemas de armazenamento industrial (OLIVEIRA, 2000; SOUZA, 2013), conforme mostrado na Figura 1.

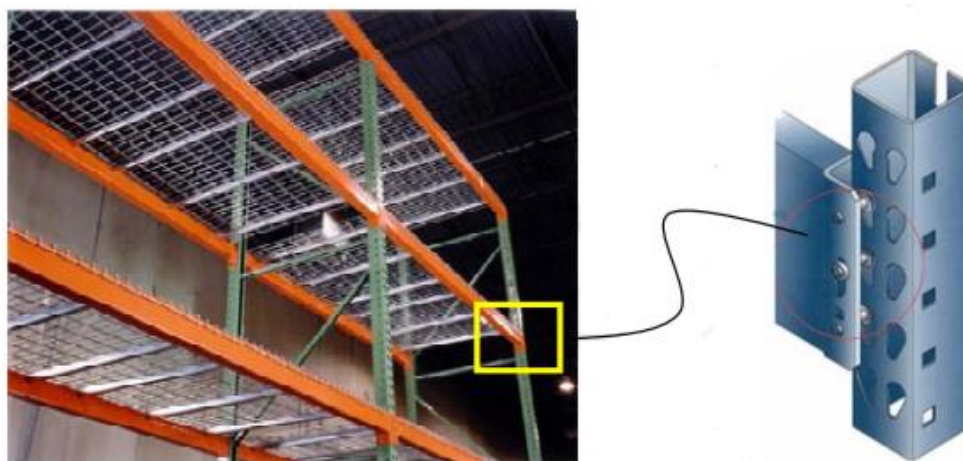


FIGURA 0: Perfurações em colunas de armazenamento em sistemas estrutural porta-pallets.

FONTE: Moen e Schafer (2009).

Diante do aumento da utilização dos perfis formados a frio, tornam-se necessários estudos e pesquisas na área, de forma a consolidar uma base para dimensionamento de elementos formados a frio, contribuindo para estabelecer soluções técnicas e econômicas.

As literaturas normativas atuais não consideram a influência das perfurações na capacidade resistente de perfis formados a frio, e a pesquisa sobre o tema é ainda incipiente. Ao consideramos que os furos podem influenciar a capacidade resistente dos perfis, o dimensionamento seguindo premissas normativas existentes é inviável, demandando, muitas vezes, testes experimentais que oneram o projeto. Desta forma, uma solução de dimensionamento prático e econômico pode ser de grande relevância, principalmente em situações em que o uso de perfis formados a frio com perfurações é frequente, como em sistemas de armazenamento.

Mesmo incipiente, alguns trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de avaliar a influência das perfurações na capacidade resistente e no comportamento de perfis formados a frio com perfurações. Dentre estes pode-se citar Yao e Rasmussen (2010), Silva (2011), Souza (2005, 2013), Faria (2016), Neiva (2017) e Neiva et al. (2018). Destacam-se ainda Moen e Schaffer (2009), e Sales (2017) e que desenvolveram estudos visando a extensão do Método da Resistência Direta para o dimensionamento de perfis formados a frio com perfurações.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a adaptação do Método de Resistência Direta para a determinação da força axial resistente de perfis formados a frio de seção U enrijecido, com furos, sob compressão centrada.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- I. Avaliar a influência das perfurações na carga última de colunas no âmbito da flambagem distorcional;
- II. Avaliar as opções de extensão do Método da Resistência Direta propostas por Sales (2017) para previsão de cargas últimas;
- III. Propor uma extensão do Método da Resistência Direta com melhor correlação entre resultados teóricos e numéricos.

3. PROPOSTA DE EXTENSÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA

O Método da Resistência Direta, apresentado em várias literaturas normativas, inclusive na NBR 14762 (ABNT, 2010), possibilita obtenção direta da resistência de barras submetidas à compressão centrada e à flexão simples. Contudo, o cálculo da capacidade resistente do perfil de aço formando a frio, demanda a análise elástica da seção, que é feita por meio de *softwares* específicos. Neste trabalho optou-se por utilizar o *software* livre GBTul (BEBIANO *et al.*, 2008), fundamentado na Teoria Generalizada de Vigas (GBT).

O Método da Resistência Direta permite a análise dos modos de flambagem isolados e em interação, contudo esse trabalho considera o modo distorcional isolado para avaliação da resistência de barras à compressão centrada sem perfurações.

Moen e Schaffer (2009) realizaram um amplo estudo, patrocinado pelo *American Iron and Steel Institute*, para avaliar a influência de furos no dimensionamento de perfis formados a frio, submetidos à compressão e à flexão, no âmbito dos três modos de colapso, flambagem local, distorcional e global. Os autores fizeram a análise de estabilidade elástica pelo método das faixas finitas no *software* CUFSM (SCHAFER E ÁDÀNY, 2006) e as análises não lineares pelo *software* ABAQUS.

Sales (2017) propôs uma alternativa para os métodos desenvolvidos por Moen e Schaffer (2009) para a extensão do Método da Resistência Direta, com o objetivo de determinar a força axial resistente de perfis formado a frio considerando a presença de furos. O método alternativo proposto por Sales (2017) obteve bons resultados quando comparado aos métodos de Moen para colunas de seção do tipo *Rack*. Esse método consistiu propor uma espessura fictícia da alma (t_{fic}), para obtenção da força axial de flambagem elástica, considerando que a redução da espessura da alma da seção transversal deve seguir a proporção entre sua área líquida ($A_{w,net}$) e sua área bruta ($A_{w,g}$), conforme mostra a Equação 1. Nas análises de Sales (2017) esta relação foi igual a 0,8.

$$t_{fic} = \frac{A_{w,net}}{A_{w,g}} t_w \quad \text{Eq. [1]}$$

A Figura 2 apresenta a disposição dos furos na alma dos modelos estudados e a espessura fictícias propostas por Sales para a determinação da força de flambagem elástica.

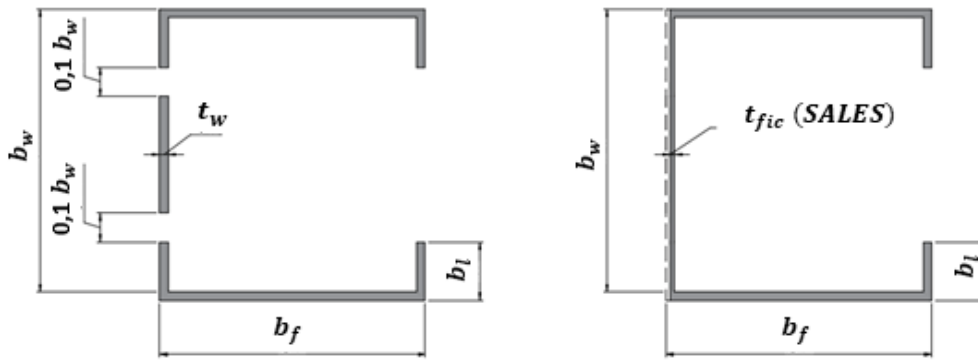


FIGURA 2: Disposição dos furos na alma dos modelos estudados.

FONTE: Autoria Própria.

Na Figura 3 é apresentada a tela do software GBtul que possibilita a criação de variadas seções transversais e aplicação de diferentes espessuras nas paredes da seção. Isso, viabilizou a análise da carga crítica de flambagem de seções com diferentes espessuras fictícias para a alma propostas por Sales.

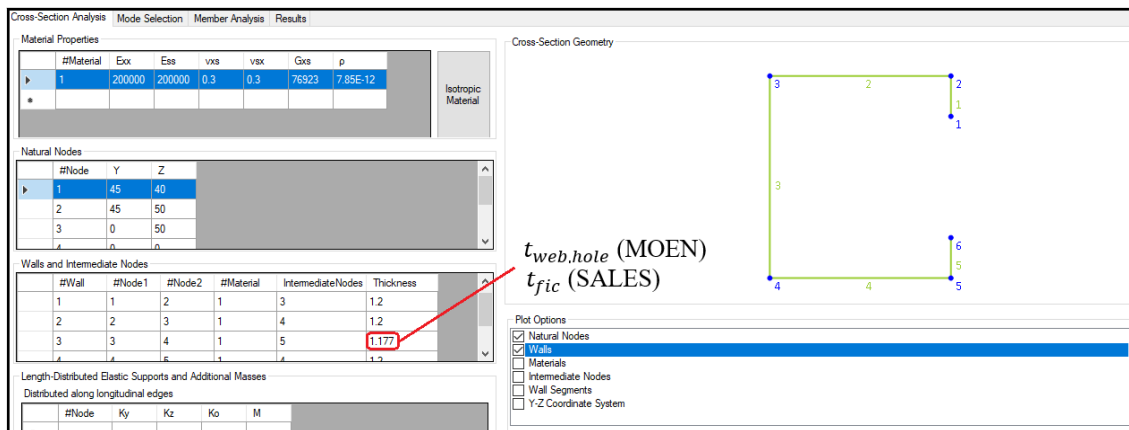


FIGURA 3: Espessuras fictícias propostas

FONTE: GBtul – Bebiano et al. (2008).

Assim como Moen e Schaffer (2009), Sales (2017) incluiu os furos na análise da carga crítica de flambagem, P_{crd} , e usa a tensão de escoamento da seção líquida, P_{ynet} . A única mudança com relação à equação do Método da Resistência Direta, é a substituição da carga de escoamento da seção bruta P_y , pela P_{ynet} , que por sua vez é determinada pela multiplicação da área líquida, A_{net} , pela tensão de escoamento do aço, f_y . Com a essa alteração, têm-se as Equações 2 e 3 para força axial resistente associada ao modo distorcional:

$$P_{nd} = P_{ynet}, \text{ para } \lambda_{dnet} \leq 0,561 \quad \text{Eq. [2]}$$

$$P_{nd} = \left(1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_{ynet}} \right)^{0,6} \right) \left(\frac{P_{crd}}{P_{ynet}} \right)^{0,6} P_{ynet}, \text{ para } \lambda_{dnet} > 0,561 \quad \text{Eq. [3]}$$

Em que:

$$\lambda_{dnet} = \sqrt{P_{ynet}/P_{crd}};$$

$$P_{ynet} = A_{net}f_y;$$

A_{net} é a área líquida da seção transversal da barra;

f_y é a tensão de escoamento do material;

P_{crd} é a força axial de flambagem elástica associada ao modo distorcional (N_{dist} , pela NBR 14762, ABNT 2010), determinada conforme a seção anterior, onde a espessura da alma da seção sem furos t_w é modificada por t_{fic} , podendo ser usada em análise numérica simplificada, através *software* GBTul.

λ_{dnet} é o índice de esbelteza reduzido associado à flambagem distorcional;

P_{nd} é a força axial resistente a compressão da seção com furos associada ao modo distorcional ($N_{c,Rdist}$, pela NBR 14762, ABNT 2010).

4. METODOLOGIA

A primeira etapa do trabalho consistiu na análise linear de colunas sem perfurações via Teoria Generalizada de Vigas (GBT) através do programa GBTul (Bebiano et al., 2008), a fim de obter as forças axiais de flambagem distorcional elástica (N_{dist}) de colunas sem furos. Posteriormente essas cargas foram utilizadas nas rotinas de cálculo do Método da Resistência Direta para obtenção das forças axiais de compressão resistentes ($N_{c,Rk}$) das colunas sem furos. No final desta etapa, os valores das forças axiais de compressão resistentes teóricas foram comparados com os valores numéricos, obtidos pela análise não-linear de modelos numéricos desenvolvidos em elementos finitos, via *software* ANSYS (ANSYS, 2013).

Uma vez obtido um modelo numérico com boa correlação entre os resultados numéricos e teóricos, foram introduzidas as perfurações e realizadas novas análises não-lineares via elementos finitos para obter, desta vez, as forças axiais de compressão resistentes dos perfis com furos. Estes valores foram comparados com os obtidos pelas recomendações de extensão do Método da Resistência Direta apresentadas por Sales (2017).

Ainda é proposto no trabalho, um método alternativo para o cálculo das forças axiais de compressão resistentes e, finalmente, analisa-se a viabilidade de todos os métodos para a determinação da resistência de colunas com furos.

5. ESTUDOS NUMÉRICOS

Os métodos numéricos viabilizam a análise estrutural, em casos onde soluções analíticas são inviáveis. Nesse trabalho o estudo numérico foi realizado por meio da Teoria Generalizada de Vigas (GBT), através do *software* GBTul (BEBIANO et al., 2008) e o Método dos Elementos Finitos (MEF), através do *software* ANSYS (2013). O GBTul foi utilizado para a obtenção das cargas críticas de flambagem utilizadas no Método de Resistência Direta e suas adaptações, já o Método dos Elementos Finitos foi utilizado para as análises linear e não-linear dos modelos propostos

5.1 GEOMETRIA DOS MODELOS

Nesse estudo foram analisados modelos de 20 seções transversais consideradas do perfil U enrijecido sem furos e 20 com furos, totalizando 40 modelos.

As dimensões e disposições dos furos nos modelos com perfurações estão expostas na Figura 4. Foram adotados furos com larguras iguais a 10% de b_w , comprimentos iguais a 40% de b_w , posicionados a uma distância da aresta alma/flange igual a 20% de b_w e espaçados entre eles a uma distância de 40% de b_w , seguindo estudos anteriores de Souza (2013) e Sales (2017).

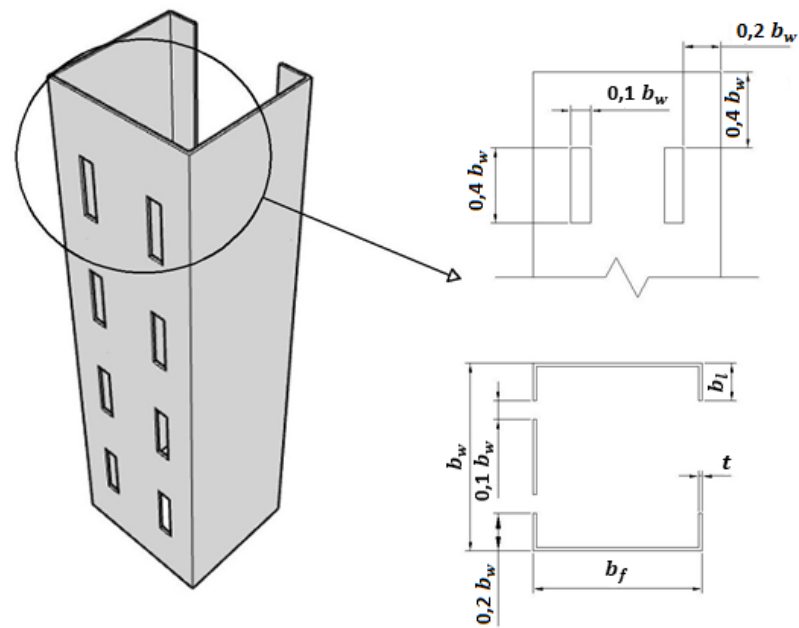


FIGURA 4: Dimensões e disposições dos furos dos perfis com perfurações estudados

FONTE: Autoria Própria.

As dimensões adotadas nas 20 seções transversais estão apresentadas na Tabela 1. Foram utilizados perfis com relação b_l/b_w iguais a 0,9 e 1, relação b_w/b_l igual a 5 e a relação b_w/t foi variada, adotando espessuras (t) que levassem a seções cuja carga crítica de flambagem distorcional fosse menor que a local. Os comprimentos críticos associados à flambagem distorcional foram obtidos pela análise de autovalor no *software*.

TABELA 1: Dimensões das 20 seções transversais estudadas.

Seção Estudada	Dimensões da Seção Transversal					
	b_w	b_f	b_l	t	$L_{dist,SF}$	$L_{nl,adotado}$
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
UE 50x45x10x1,2	50	45	10	1,2	350	400
UE 50x45x10x1,4	50	45	10	1,4	300	400
UE 50x45x10x1,6	50	45	10	1,6	300	400
UE 50x45x10x1,8	50	45	10	1,8	280	400
UE 50x45x10x2,0	50	45	10	2,0	260	400
UE 75x65x15x1,6	75	65	15	1,6	550	720
UE 75x65x15x1,8	75	65	15	1,8	500	720
UE 75x65x15x2,0	75	65	15	2,0	450	720
UE 75x65x15x2,2	75	65	15	2,2	450	720
UE 75x65x15x2,4	75	65	15	2,4	450	720
UE 100x100x20x1,6	100	100	20	1,6	900	1200
UE 100x100x20x1,8	100	100	20	1,8	840	1200
UE 100x100x20x2,0	100	100	20	2,0	800	1200
UE 100x100x20x2,2	100	100	20	2,2	750	1200
UE 100x100x20x2,4	100	100	20	2,4	730	1200
UE 125X125X25X2,0	125	125	25	2,0	1100	1500
UE 125X125X25X2,2	125	125	25	2,2	1050	1500
UE 125X125X25X2,4	125	125	25	2,4	1000	1500
UE 125X125X25X2,6	125	125	25	2,6	1000	1500
UE 125X125X25X2,8	125	125	25	2,8	950	1500

FONTE: Autoria Própria.

5.2 MODELOS NUMÉRIOS DE ELEMENTOS FINITOS

5.2.1 Tipo de elemento

Para a criação das paredes dos modelos do perfil U enrijecido, foi utilizado o elemento do ANSYS SHELL181. Em estudos realizados por Souza (2013) e Sales (2017) com a utilização desse elemento em seções “rack”, foram observados bons resultados em relação a resultados teóricos e experimentais. O elemento SHELL181 é um elemento de casca indicado para análises elastoplásticas, com quatro nós e seis graus de liberdade em cada um dos nós, sendo a translação e rotação nos eixos X, Y e Z. Este elemento está apresentado da Figura 5.

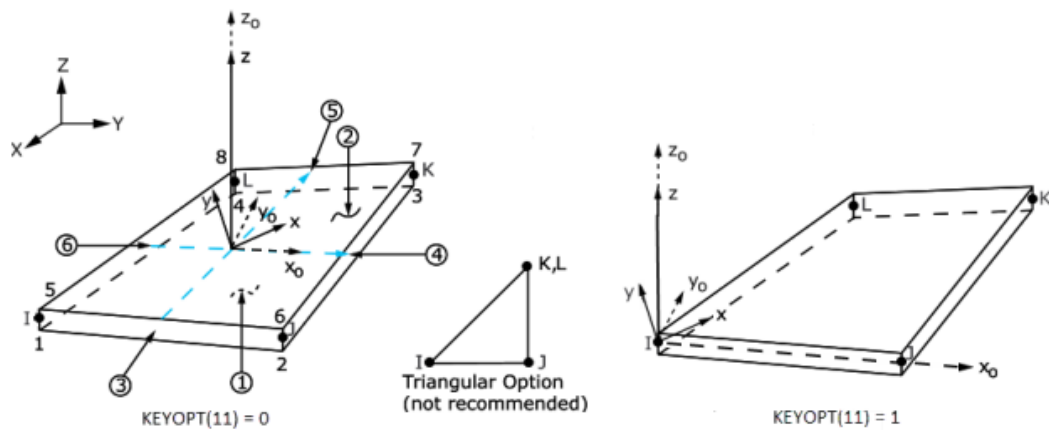


FIGURA 5: Elemento de casca SHELL181.

FONTE: ANSYS (2013).

5.2.2 Refinamento da malha

Um parâmetro importante na análise numérica via elementos finitos é o estudo da sensibilidade da malha utilizada para a discretização do modelo, buscando precisão aliada a baixo custo computacional.

Souza (2013) realizou um estudo de refinamento relacionando o tamanho dos elementos à largura da alma (b_w), tendo em vista ainda a acomodação das perfurações nos modelos com furos. O elemento com lados iguais 10% da largura da alma apresentou desempenho satisfatório, sendo adotado também neste trabalho. A Figura 6 apresenta a distribuição da malha de elementos finitos.

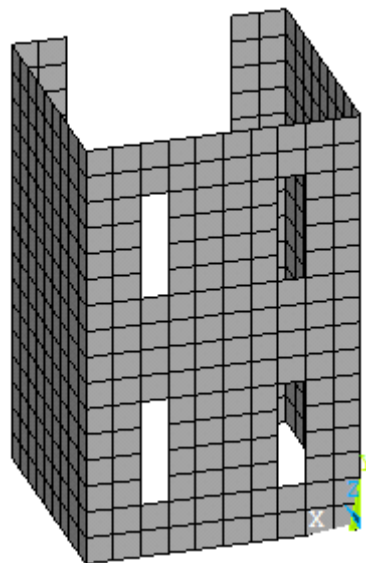


FIGURA 6: Distribuição da malha de elementos finitos.

FONTE: ANSYS (2013).

5.2.3 Condições de contorno e carregamento

As condições de contorno foram adotadas de forma a simular extremidades rotuladas. Para essa condição, todos os nós das extremidades foram restringidos quanto aos deslocamentos no plano ortogonal ao eixo da coluna. A fim de simular o vínculo de “garfo” adotado pelo *software* GBtul, todos os nós das extremidades foram restringidos quanto à rotação em relação ao eixo longitudinal. Finalmente, para impedir o deslocamento de corpo rígido na direção longitudinal da coluna, um nó à meia altura nesta direção teve sua translação restringida.

A carga foi aplicada de forma distribuída ao longo das arestas das extremidades da coluna. Visando melhor distribuição de carga ao longo do eixo longitudinal, as cargas aplicadas nos nós da ponta dos

enrijecedores tiveram metade do valor aplicado nos demais nós, considerando a menor área de influência dos elementos dessa região do modelo. A Figura 7 apresenta as restrições e carregamentos adotados para o modelo.

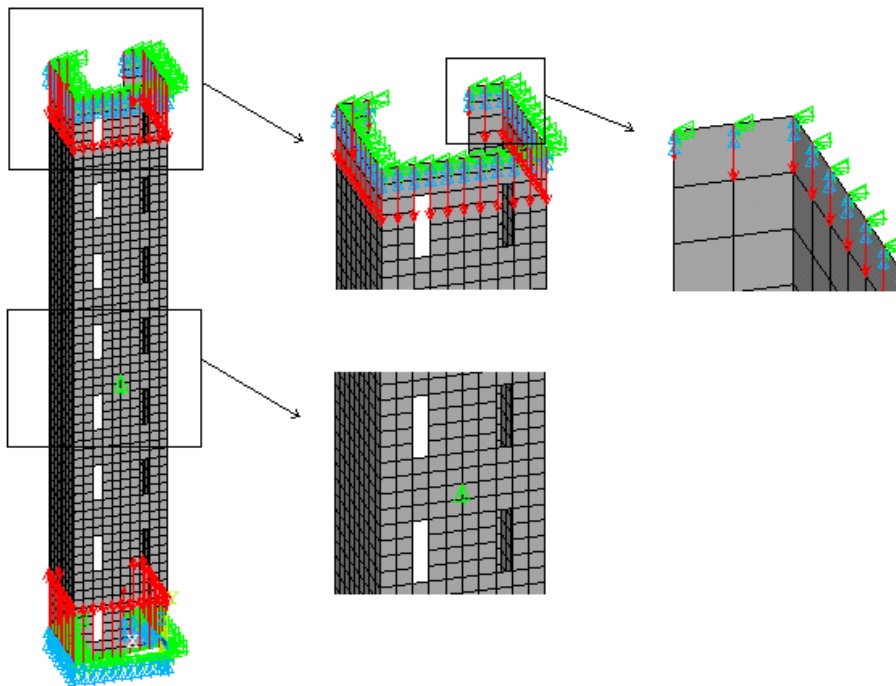


FIGURA 7: Restrições e carregamentos para o modelo numérico.

FONTE: ANSYS (2013).

5.2.4 Propriedades mecânicas dos materiais

Foram utilizados diagramas tensão x deformação multilíneares para os aços considerados nesse trabalho. Com base em estudos que calibraram resultados numéricos com experimentais (FARIA, 2016), foi adotado o modelo proposto por Salmon e Johnson (1990), e apresentado na Figura 8, para aço com tensão de escoamento (f_y) igual a 300 MPa e tensão última (f_u) igual a 400 MPa.

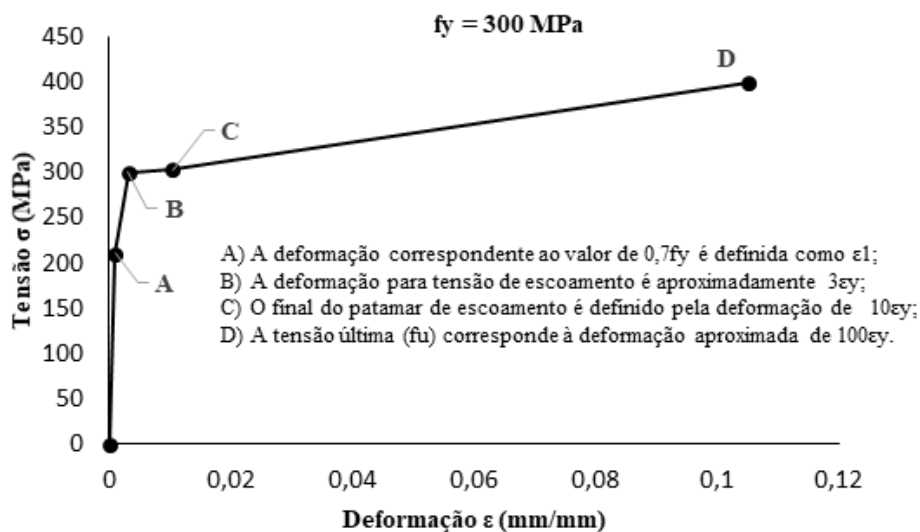


FIGURA 8: Diagrama tensão x deformação do aço $f_y = 400$ MPa.

FONTE: Autoria Própria.

5.3 ANÁLISE LINEAR VIA TEORIA GENERALIZADA DE VIGAS ATRAVÉS DO SOFTWARE GBTUL

A análise de estabilidade das seções, necessária para a utilização do Método da Resistência Direta, foi feita neste trabalho através do *software* GBTul (BEBIANO et al., 2008). O modelo gerado é apresentado na Figura 9. A Figura 9a mostra a fase de criação da seção através das posições nodais. Na Figura 9b, são apresentadas as condições de vinculação do modelo, onde são consideradas as extremidades simplesmente apoiadas com vínculo de “garfo”, quanto as condições do carregamento, que é unitário e aplicado no centro de gravidade da seção.

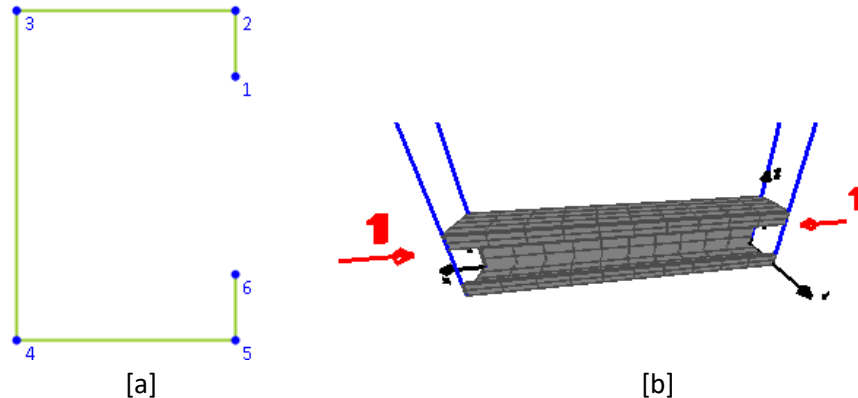


FIGURA 9: Modelo criado através do programa GBTul: [a] seção transversal; [b] isometria demonstrando as vinculações a condição de carregamento.

FONTE: Bebiano et al. (2008).

A validação da análise numérica é indicada pela boa correlação entre os resultados da análise de flambagem elástica pelo método dos elementos finitos e, também, pela Teoria Generalizada de Vigas, conforme apresentado na Figura 10 para o perfil UE 50x45x10x1,6. Foram analisadas as cargas críticas em função do comprimento da seção, que foi variado, de 100 a 1000 mm, e observou-se boa correlação entre os resultados.

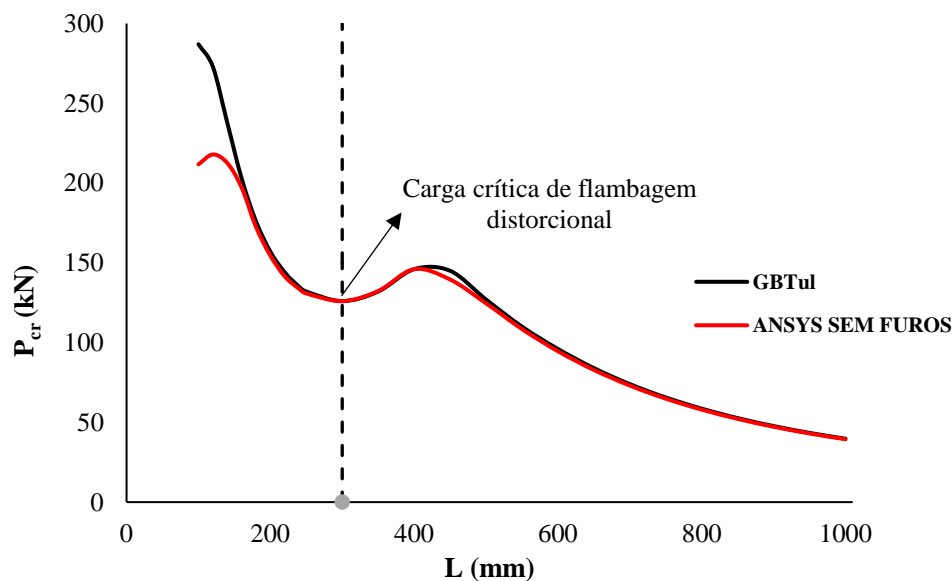


FIGURA 10: Comparação entre os resultados do ANSYS e GBTUL da carga crítica da seção UE50x45x10x1,6.

FONTE: Autoria Própria.

A Figura 11 apresenta os modos de flambagem e respectivas cargas críticas de flambagem para o perfil UE50x45x10x1,6 considerando um comprimento de 300 mm. Mais uma vez, observa-se boa correlação entre os resultados.

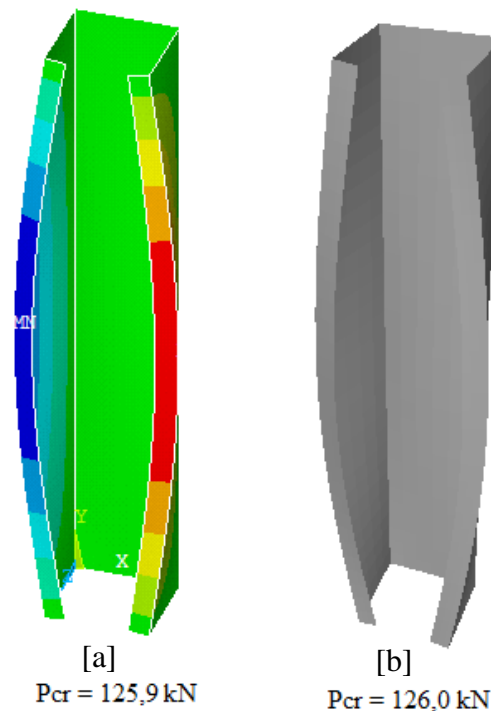


FIGURA 11: Modo de flambagem e carga crítica para as simulações: [a] ANSYS sem furos e [b] GBTul.

FONTE [a]: ANSYS (2013).

FONTE [b]: Bebiano et al. (2008).

6. RESULTADOS

6.1 MÉTODO DE SALES (2017) PARA PERFIL U ENRIJECIDO

Conforme já introduzido, ao estudar as opções de extensões do Método de Resistência Direta para perfis *rack* com perfurações, Sales (2017), propôs um método alternativo aos métodos de propostas por Moen e Schafer (2009). Este trabalho, no entanto, aplica o método de Sales (2017) em perfil U enrijecidos. Sales (2017) propõe que o cálculo da força axial de flambagem elástica, P_{crd} (N_{dist} , pela NBR 14762, ABNT, 2010), a ser utilizada no cálculo da força axial resistente do perfil formado a frio com perfuração, dever ser calculada considerando a espessura fictícia (t_{fic}), Equação 1, cuja redução é proporcional à área remanescente da alma após a subtração dos furos.

A Figura 12 apresenta a comparação entre os resultados obtidos pelo método proposto por Sales (2017), com os resultados numéricos frutos da análise não linear de perfis U enrijecido com perfurações. Nos modelos foram consideradas 4 seções U enrijecido, cada uma delas com 5 espessuras diferentes conforme apresentado na Tabela 1. Foi considerado o aço com tensão de escoamento (f_y), 300 MPa e tensão de ruptura (f_u), 400 MPa, e módulo de elasticidade (E) igual a 200000 MPa.

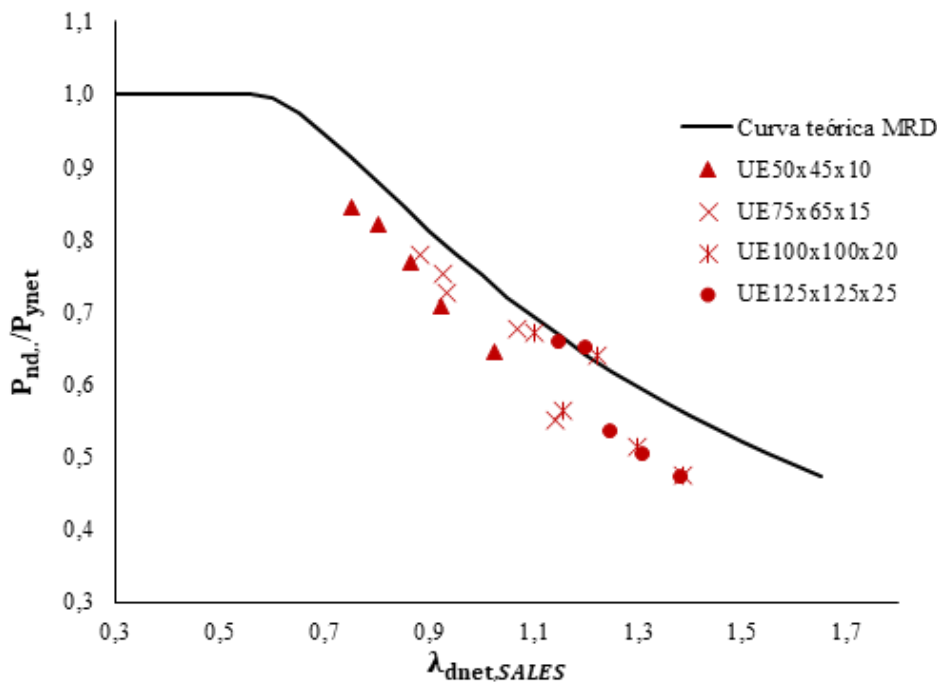


FIGURA 12: Comparação entre resistência entre método SALES e análises numéricas.

FONTE: Autoria Própria.

6.2 MÉTODO ALTERNATIVO

Ainda neste estudo é apresentado um método alternativo, contudo, a análise de flambagem elástica realizada no *software* GBTul utiliza a espessura real da seção bruta (t_w). De forma intuitiva este método relaciona a perda da resistência da seção com furos com a relação entre a área líquida ($A_{w,net}$) e sua área bruta ($A_{w,g}$) da alma da seção.

Adotando o coeficiente (α) como sendo a relação entre essas áreas, temos a Equação 4:

$$\alpha = \frac{A_{w,net}}{A_{w,g}} \quad \text{Eq. [4]}$$

Com isso temos as Equações 5 e 6 de resistência:

$$N_{c,Rdist} = \alpha A f_y, \quad \text{para} \quad \lambda_{dist} \leq 0,561 \quad \text{Eq. [5]}$$

$$N_{c,Rdist} = \alpha \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}} \right) \frac{A f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}}, \quad \text{para} \quad \lambda_{dist} > 0,561 \quad \text{Eq. [6]}$$

Em que:

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

A é a área bruta da seção transversal da barra;

f_y é a tensão de escoamento do aço;

N_{dist} é a força axial de flambagem distorcional elástica em que nesse trabalho será determinada pela análise de estabilidade elásticas pelo *software* GBTul (Bebiano et al., 2008).

A Figura 13 apresenta a curva de resistência das colunas de seção U enrijecido submetidas à compressão, com furos, obtida através do método Alternativo. Devido ao padrão das seções transversais adotadas nesse trabalho, a relação $A_{w,net}/A_{w,g}$ para todos os modelos, é igual a 0,80. A Figura 13 apresenta a curva de resistência para $\alpha = 0,94$. Nos modelos foram consideradas 4 seções U enrijecido, cada uma delas

com 5 espessuras diferentes conforme apresentado na Tabela 1. Foram considerados aço com tensões de escoamento (f_y), 300 MPa e tensão de ruptura (f_u), 400 MPa.

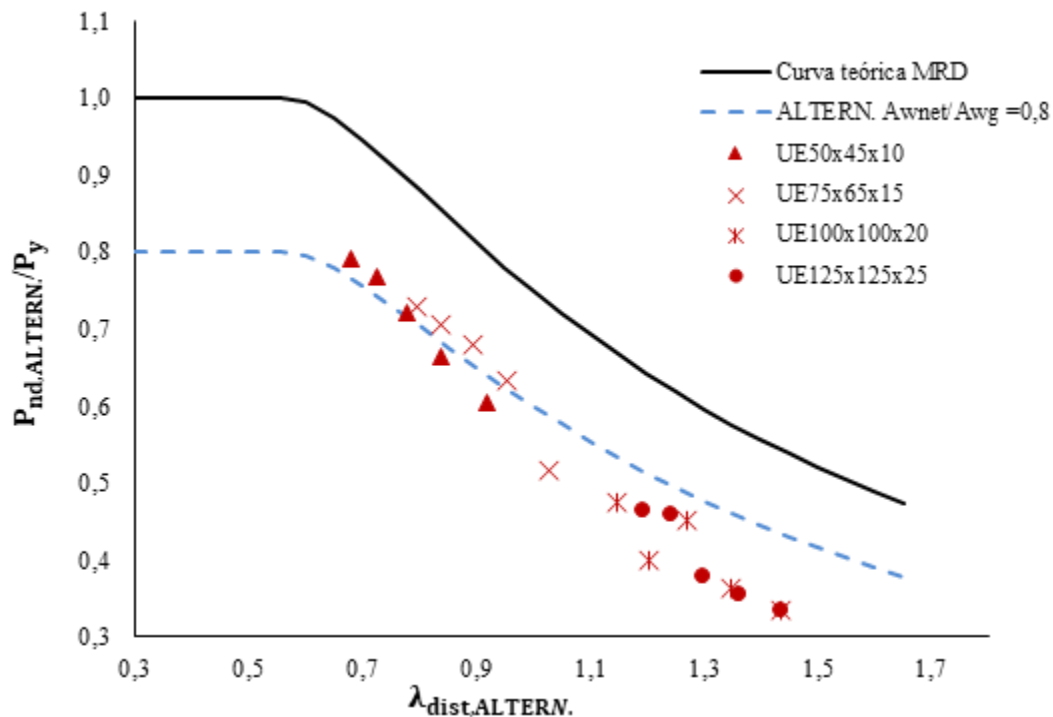


FIGURA 13: Comparação entre resistência entre método ALTERNATIVO e análises numéricas.

FONTE: Autoria Própria.

A Figura 14 mostra a comparação entre as médias e os desvios padrões obtidos para a dispersão percentual entre os resultados da força axial resistente à compressão determinada pelas extensões do Método da Resistência Direta, e os resultados numéricos, aqui tomados como referências.

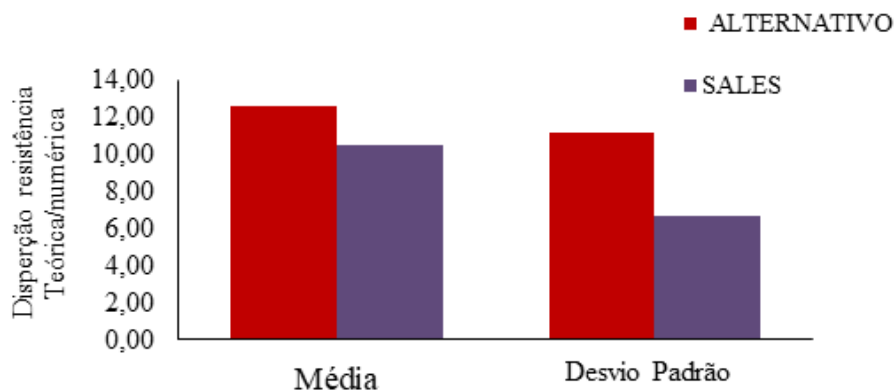


FIGURA 14: Comparação da dispersão entre os resultados da força axial resistente a compressão proposta pelos métodos teórico e numéricos.

FONTE: Autoria Própria.

O método de Sales (2017), apresentou boa correlação com os resultados numéricos. Em média, os resultados do método SALES tiveram uma dispersão entre seus valores de 10,50%, e um desvio padrão de 6,69%. Ressalta-se que, para esse método, a maior parte dos valores das análises numéricas foi menor que os valores teóricos, ficando em sua maioria, a favor da segurança.

Observa-se que o método alternativo, proposto nesse trabalho, apresentou resultados mais próximos entre a força axial resistente de compressão teórica e a obtida pela análise numérica via ANSYS,

indicando assim, como em Sales (2017), a viabilidade do método. Em média, os resultados tiveram uma dispersão entre seus valores de 12,58%, e um desvio padrão da dispersão de seus resultados de 11,59%.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As perfurações são utilizadas para passagem de dutos e para atender a soluções estruturais como as ligações dos sistemas de armazenagem industrial. Nesse contexto, tornam-se de suma importância estudos e pesquisas que visam consolidar uma base tecnológica para o dimensionamento de perfis formados a frio com perfurações. Esse trabalho teve como objetivo a avaliação de extensões do Método de Resistência Direta para a determinação da resistência de perfis U enrijecidos formados a frio, sob compressão centrada, com furos.

As análises numéricas não lineares de perfis U enrijecido com e sem furos foram realizadas utilizando o Método dos Elementos Finitos, via ANSYS. Foram criados modelos utilizando a linguagem de programação APDL (*Parametric Design Language - ANSYS*), automatizando a criação e variação dos parâmetros dos modelos numéricos. Utilizou-se ainda a análise numérica fundamentada na Teoria Generalizada de Viga, via GBTul, para determinação da força axial de flambagem elástica, empregada no cálculo da resistência axial das colunas pelo Método de Resistência Direta e suas extensões avaliadas neste trabalho. Embora a análise de estabilidade elástica seja, em termos práticos, pouco utilizada, os *softwares* de fácil manuseio, tal como o GBTul, tornam essa análise viável.

A análise dos métodos estudados indicou a viabilidade da extensão do Método de Resistência Direta para o dimensionamento de perfis formados a frio com perfurações. Observou-se que a inserção das perfurações nos pilares leva a uma redução média de 20% na força axial resistente da seção, se os pilares sem perfurações forem usados como referência. A extensão do Método da Resistência Direta proposta por Sales (2017) leva a resultados satisfatórios, com dispersão entre seus resultados e os valores numéricos, tomados como referência, de 10,50%. A modificação deste método proposta neste trabalho, chamada Método Alternativo, manteve a eficiência, com dispersão de 12,58%, mostrando-se também promissora.

8. AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica, Mestrado Profissional em Construções Metálicas, MECOM, da Universidade Federal de Ouro Preto.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS® Structural Analysis, release 15.0, Help System. **Mechanical APDL Structural Analysis Guide**. ANSYS, Inc., Canonsburg, PA. 522 p., 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 14762**: Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio. Rio de Janeiro. 2010.

BEBIANO R., PINA P., SILVESTRE N., CAMOTIM D. **GBTUL – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members**, DECivil/IST, Technical University of Lisbon. Disponível em: <<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>>, 2008.

FARIA, V. O. **Análise de estabilidade de perfis formados a frio com perfurações**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

MOEN, C. D., SCHAFER, B. W. **DirectStrength Design of Cold-Formed Steel members with perforations**: Research Report RP 09-1. Washington: American Iron and Steel Institute – Committee on Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 540 p., 2009.

NEIVA, L. H. A., **Análise da influência da variação de perfurações no comportamento e capacidade de carga de perfis formados a frio de seção tipo rack**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Pret, Ouro Preto, 2017.

NEIVA, L. H. A., SALES, A. E. C. A., ELIAS, G. C., SARMANHO, A. M. C., SOUZA, F. T. Análise do modo distorcional de elementos perfurados segundo Método da Resistência Direta. **Revista da estrutura de aço – CBCA**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 15-36, abr. 2018.

OLIVEIRA, A. M. **Análise Teórico-Experimental de Sistemas Estruturais de Armazenamento (Rack's)**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2000.

SALES, A. E. C. A. **Análise da aplicação do método da resistência direta a perfis formados a frio com perfurações submetidos à compressão**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

SALMON E JOHNSON. **STEEL STRUCTURES: Design and Behavior. Emphasizing Load and Resistance Factor Design**, Third Edition, p.45-46, 1990.

SCHAFER, B. W., ÁDÀNY, S. Buckling analysis of cold formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. **Eighteenth International Specialty Conference on Cold Formed Steel Structures**. Orlando, USA, v.1, n. 1, p.38-54, 2006.

SILVA, G. G. DA. **Análise teórico-experimental de colunas curtas perfuradas**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

SOUZA, F. T. **Análise teórico-experimental da estabilidade de colunas perfuradas em perfis de aço formados a frio de seções tipo rack**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 209 p, 2013.

SOUZA, F. T. **Análise teórico-experimental de sistemas aporticados com elementos perfurados em perfis formados a frio - Racks**. Dissertação de Mestrado – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 104 f., 2005.

YAO, Z., RASMUSSEN, K. J. R. **Material and Geometric Non-Linear Isoparametric Spline Finite Strip Analysis of Perforated Thin-Walled Steel Structures**. Relatório de pesquisa R910. Escola de Engenharia Civil. Universidade de Sydney. Sydney, 2010.