



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil

Juliane Aparecida Braz Starlino

ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS EM PERFIL FORMADO A FRIO PERFURADAS

Ouro Preto

2019

Análise e dimensionamento de estruturas em perfil formado a frio perfuradas

Juliane Aparecida Braz Starlino

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida em 13 de dezembro de 2019 como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheira Civil.

Área de concentração: Estruturas Metálicas

Orientadora: Prof. D.Sc. Arlene Maria Cunha Sarmanho - UFOP

Orientador: M.Sc. Luiz Henrique de Almeida Neiva - UFOP

Ouro Preto

2019

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S795a Starlino, Juliane Aparecida Braz .

Análise e dimensionamento de estruturas em perfil formado a frio perfuradas.
[manuscrito] / Juliane Aparecida Braz Starlino. - 2019.
42 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadores: Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho, Prof. Me. Luiz Henrique de Almeida Neiva.

Coorientador:

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.

1. Estruturas metálicas. 2. Perfis formados a frio. 3. Racks. 4. Dimensionamento. 5. Perfis perfurados. I. Neiva, Luiz Henrique de Almeida. II. Sarmanho, Arlene Maria Cunha. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB:1716

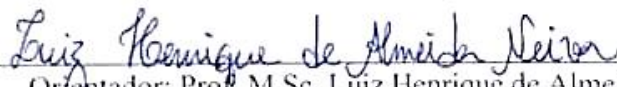
Análise e dimensionamento de estruturas em perfil formado a frio perfuradas

Juliane Aparecida Braz Starlino

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida em 13 de dezembro de 2019 como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil. Banca examinadora:



Orientador: Prof. D.Sc. Arlene Maria Cunha Sarmanho - UFOP



Orientador: Prof. M.Sc. Luiz Henrique de Almeida Neiva -UFOP



Membro: Prof. D. Sc. Flávio Teixeira de Souza - IFMG



Membro: Prof. D. Sc. Vinicius Nicchio Alves - UFOP

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida.

Aos meus pais, Eni e Geraldo, por todo apoio e incentivo durante todos os anos da minha vida.

A minha irmã, Joyce, por estar sempre ao meu lado.

Aos meus orientadores, Arlene e Luiz, por toda dedicação, carinho, paciência e suporte em momentos difíceis.

A todos os amigos do Labest, JB, Ellen, Nadele, Daniel, Ana Flávia, Vinícius, Gilney, Débora, Esther, Letícia, Roquete, Luiza, Mateus, Messias, Ludmilla, Marina, Vivi, Wendell, Vitor, Ana Beatriz, Flávio, Escanio e Gabriel por toda ajuda e amizade.

Aos amigos que a UFOP me deu e àqueles que sempre estiveram comigo, por tornarem a caminhada mais tranquila.

A Fundação Gorceix e ao CNPq, por todo auxílio.

RESUMO

O uso de estruturas metálicas está cada vez mais presente no dia a dia da construção. O aço apresenta diversas vantagens quando comparado a outros materiais, como leveza e rapidez de montagem. Além disso, pode ser utilizado em várias aplicações, como em sistemas de armazenagem industrial. Esses sistemas são compostos de estruturas em perfis formados a frio perfuradas que apresentam elevada esbelteza, sendo altamente suscetíveis a fenômenos de instabilidade. No Brasil, o dimensionamento desses perfis é feito por meio das prescrições da norma NBR 15524 - Sistemas de armazenagem Parte 2: Diretrizes para o uso e estruturas tipo porta-paletes seletivos (2007). Diferentemente de outras normas de dimensionamento de estruturas metálicas brasileiras (NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010) que têm como base normas americanas, a NBR 15524:2007 se baseia em uma norma inglesa, motivo pelo qual as formulações propostas são diferentes, o que torna a sua utilização pouco prática para projetistas brasileiros acostumados com as formulações americanas. Dessa forma, no presente trabalho é avaliada a possibilidade de utilização da formulação americana juntamente à NBR 15524:2007. Para tanto, foram realizadas análises numéricas por meio do Método dos Elementos Finitos, via software ANSYS, para determinação das áreas efetivas utilizadas no dimensionamento segundo a NBR 15524:2010. Posteriormente, foi realizado um estudo teórico do dimensionamento das colunas seguindo a NBR 14762:2010 utilizando-se a área efetiva, a área bruta e a área mínima líquida. Por fim, os resultados foram comparados, verificando-se que foi possível inserir a formulação da NBR 14762:2010 na NBR 15524:2007 para o dimensionamento de colunas com a tipologia estudada.

Palavras-chaves: Estruturas metálicas, Perfis formados a frio, Racks, Dimensionamento, Perfis perfurados.

ABSTRACT

The use of steel structures is increasing in the daily construction. Steel presents many advantages when compared to other materials, as lightness and fast installation. Furthermore, it can be used in different applications, such as Industrial Storage Systems. These systems are composed of cold-formed uprights with perforations and with high slenderness, being highly susceptible to instability phenomena. In Brazil, the design of uprights is regulated by the NBR 15524 standard – Storage Systems, Part 2: Selective pallets racks (2007). Unlike other Brazilian standards used in the design of steel structures (NBR 8800:2008 and NBR 14762:2010) that are based in Americans standards, NBR 15524:2007 is based in a British standard. For this reason, the equations are different, which makes its use impractical for Brazilian designers that are used to the American formulas. Therefore, in this work the possibility of using the American formulae in NBR 15524:2007 is analyzed. Hence, numerical analyzes were done using the Finite Elements Method, via software ANSYS, to determine the effective areas used in the design, according to NBR 15524:2007. Then, a theoretical study of columns design was performed according to the NBR 14762 recommendations, using the effective area, the gross area and the net area. Ultimately, the results were compared, attesting that it was possible to insert the formulations of NBR 14762:2010 in NBR 15524:2007 for column design.

Keywords: Steel structures, cold-formed profiles, racks, design, perforated profiles.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO.....	V
ABSTRACT	VI
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Perfis formados a frio.....	1
1.2 Sistemas de armazenagem industrial	2
1.3 Flambagem local, distorcional e global	5
1.4 Normas de dimensionamento.....	6
1.5 Objetivo.....	6
1.5.1 Objetivos Específicos.....	7
1.6 Revisão Bibliográfica.....	7
1.7 Metodologia	10
2 ANÁLISE NUMÉRICA	11
2.1 Escolha da geometria	12
2.2 Modelo numérico	13
2.2.1 Elementos	13
2.2.2 Condições de contorno.....	14
2.2.3 Propriedade dos materiais	15
2.3 Análise linear	15
2.4 Análise não-linear	18
3 ANÁLISE TEÓRICA	21

3.1	Determinação da área efetiva pela NBR 15524:2007	21
3.2	Dimensionamento utilizando a NBR 14762:2010	29
3.2.1	Área efetiva.....	31
3.2.2	Área bruta	32
3.2.3	Área mínima líquida.....	32
4	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	33
5	CONCLUSÕES	39
6	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

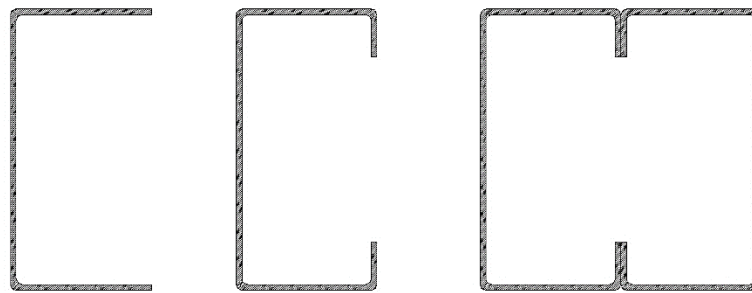
Atualmente a construção civil conta com grande participação do aço nas estruturas. Desde o início de sua utilização na construção da ponte *Ironbridge* em 1779, na Inglaterra (Neta e Neto, 2017), o uso de perfis metálicos possibilitou a introdução de novos modelos de construção, permitindo a execução de estruturas com aspecto mais moderno, de forma prática e rápida. Além da questão estética, o aço apresenta outras vantagens, tais como facilidade de execução e montagem, maior controle de qualidade e maior velocidade nas obras (Carvalho et al, 2014).

Estruturalmente são empregados três tipos de perfis metálicos: os laminados, os soldados e os formados a frio (Carvalho et al, 2014). Estes últimos são descritos no item 1.1.

1.1 Perfis formados a frio

Perfis formados a frio são perfis obtidos a partir do dobramento a temperatura ambiente de chapas metálicas com espessura reduzida. Os perfis formados a frio são fabricados em dois processos: por prensas dobradeiras, no qual ocorrem sucessivos reposicionamentos das chapas para dobramento até a obtenção do formato desejado; e em perfiladeiras, em que a chapa passa continuamente por cilindros até a obtenção da geometria desejada para a seção transversal final (Carvalho et al, 2014).

As chapas metálicas quando dobradas sofrem aumento de resistência ao escoamento e à ruptura e redução da ductilidade (Silva e Silva, 2008), permitindo a criação de perfis leves e resistentes. Devido à facilidade de montagem, esses perfis são encontrados em diversas seções, sendo as do tipo U simples, U enrijecido e caixa as mais utilizadas, apresentadas na Figura 1.



(a) (b) (c)
Figura 1 - Seções de perfis formados a frio. (a) U simples, (b) U enrijecido e (c) caixa.

Em função de sua variedade de seções, os perfis formados a frio podem ser empregados em diversos setores da construção metálica, tais como indústria automobilística, construção civil e armazenagem industrial (Carvalho et al., 2014). Esta última aplicação é foco do presente trabalho e será apresentada a seguir.

1.2 Sistemas de armazenagem industrial

Sistemas de armazenagem industrial são estruturas destinadas à estocagem de produtos manufaturados. No início de sua utilização, as colunas destes sistemas eram compostas por perfis do tipo cantoneira, que apresentavam baixa resistência à torção e necessitavam, portanto, de uma grande quantidade de contraventamentos (Godley, 1991). Ao longo do tempo esse tipo de seção foi substituído pelas seções em perfil formado a frio apresentadas anteriormente, por proporcionarem maior rigidez a estrutura e melhor eficiência das ligações (Souza, 2005).

A seção *rack* (Figura 2) é comumente utilizada nas colunas de sistemas de armazenagem industrial por apresentar componentes que facilitam a montagem da estrutura como, por exemplo, os flanges de ligação que permitem a conexão de contraventamentos e a alma que permite a conexão das vigas. A seção *rack* pode possuir enrijecedores, como apresentado na Figura 2, a fim de evitar fenômenos de instabilidade.

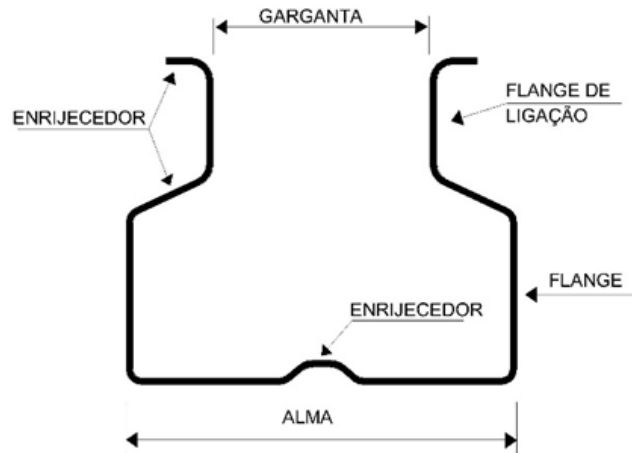


Figura 2 – Componentes da seção tipo rack. FONTE: Starlino (2019)

Existem vários tipos de sistemas de armazenagem industrial, definidos a fim de facilitar a utilização dos mesmos, sendo os dois principais os sistemas *porta-pallets* e *drive-in*. O sistema tipo *porta-pallets* (Figura 3) apresenta corredores para o acesso da empilhadeira e longarinas transversais (vigas), que garantem o travamento longitudinal do sistema e maior estabilidade (Neiva, 2017).

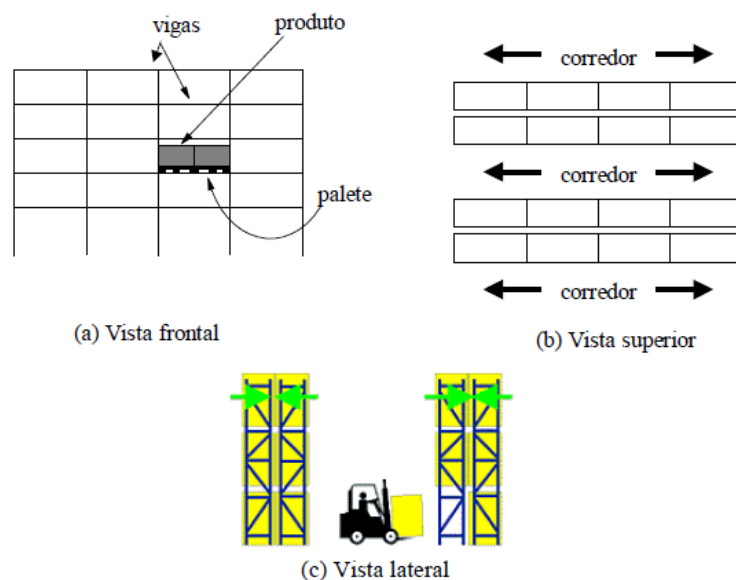


Figura 3 - Sistema porta-pallets. Fonte: Campos (2003)

Já no sistema *drive-in* (Figura 4) as empilhadeiras podem transitar ao longo do sistema, permitindo maior aproveitamento da área de estocagem (Campos, 2003). Esse tipo de sistema não conta com longarinas transversais, sendo mais instável que o sistema *porta-pallets*. A estabilidade desse sistema é garantida pela presença de contraventamentos no fundo e na parte superior do sistema.

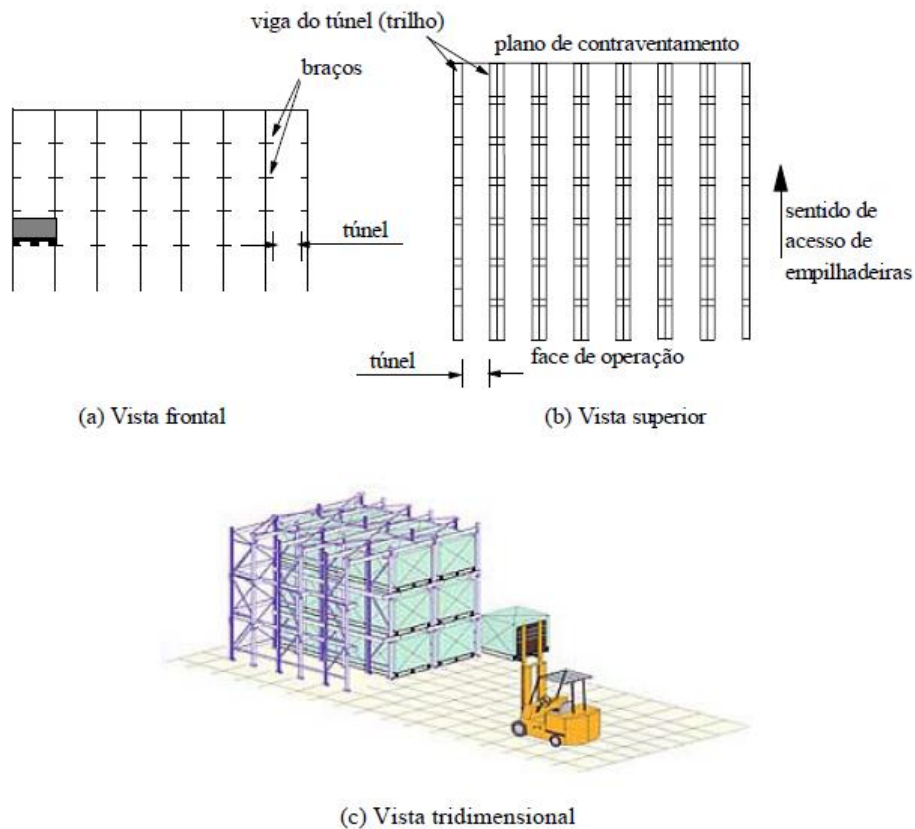


Figura 4 - Sistema *drive-in*. Fonte: Campos (2003)

As colunas dos sistemas de armazenagem industrial podem chegar a até 30m de altura, tendo por consequência uma elevada esbelteza global. Além disso, as colunas possuem perfurações ao longo de seu comprimento a fim de facilitar a ligação de elementos como longarinas e contraventamentos. A esbelteza global, juntamente às perfurações e à esbelteza local causada pela espessura reduzida, faz com que as colunas fiquem sujeitas a fenômenos de instabilidade, apresentados no item seguinte.

1.3 Flambagem local, distorcional e global

O fenômeno de flambagem que ocorre em barras esbeltas pode ser dividido em três categorias: flambagem local, flambagem distorcional e flambagem global. A flambagem local é um fenômeno de perda de instabilidade caracterizado pela formação de ondulações nas paredes componentes dos perfis sem a movimentação dos vértices da seção, como apresentado na Figura 5.

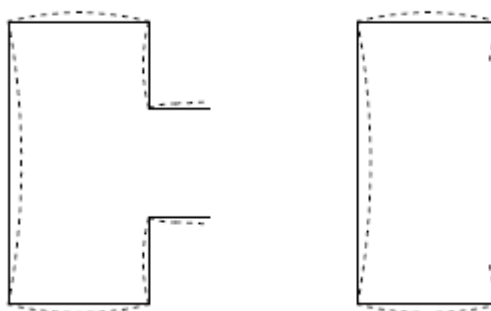


Figura 5 - Flambagem local em seções tipo rack e U enrijecido, respectivamente. Fonte: Faria (2016)

A flambagem distorcional ocorre quando a seção transversal se altera tendo a movimentação de pelo menos um dos vértices (Figura 6). Esse fenômeno ocorre apenas em perfis enrijecidos e se torna mais evidente em peças com aços de alta resistência e elevada relação largura da mesa-largura da alma (Silva e Silva, 2008).



Figura 6 - Flambagem distorcional em seção U enrijecido. Fonte: Silva e Silva (2008)

Na flambagem global, que no caso de elementos comprimidos pode ocorrer por flexão, torção ou flexo-torção, a coluna perde estabilidade com deslocamento ao longo de seu

comprimento. Os modos de flambagem citados (local, distorcional e global) podem ocorrer de forma isolada ou simultânea (acoplamento dos modos).

1.4 Normas de dimensionamento

Atualmente no Brasil, existem duas normas que tratam do dimensionamento de colunas em perfil formado a frio: a NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio; e a NBR 15524:2007 - Sistemas de armazenagem Parte 2: Diretrizes para o uso e estruturas tipo porta-paletes seletivos. A primeira é a norma que com base no método dos estados-limites, estabelece os requisitos básicos que devem ser obedecidos no dimensionamento, à temperatura ambiente, de perfis formados a frio. Essa norma não considera a influência das perfurações na resistência das colunas.

Já a NBR 15524:2007 Parte-2 é a norma que rege o dimensionamento, montagem e utilização de sistemas de armazenamento tipo porta-paletes. Esta norma surgiu como uma tradução da norma britânica BS EN 15512 – *Steel static storage systems. Adjustable pallet racking systems. Principles for structural design*. A NBR 15524:2007 permite a utilização de três métodos para o dimensionamento de elementos comprimidos: determinação das cargas através de ensaios experimentais; utilização de análise teórica por meio de elementos finitos com a análise das flambagens local, distorcional e global; e o dimensionamento utilizando a área efetiva.

No presente trabalho é feita a análise teórica com elementos finitos por meio de análise computacional para a determinação da área efetiva, utilizando o software Ansys, juntamente com a formulação proposta para o dimensionamento das colunas comprimidas.

1.5 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo analisar numérica e teoricamente colunas em perfil formado a frio perfuradas utilizadas em sistemas de armazenagem industrial, submetidas à compressão centrada.

1.5.1 Objetivos Específicos

Diferente das normas brasileiras de dimensionamento de estruturas metálicas NBR 8800:2008 e NBR 14762:2010, que se baseiam em normas americanas, a norma NBR 15524:2007, tem como base a norma inglesa BS EN 15512:2009. Dessa forma, a formulação proposta por essa norma para a obtenção da resistência a compressão centrada é diferente da proposta pelas outras duas, o que pode tornar o dimensionamento pouco prático para projetistas brasileiros já acostumados com as formulações da escola americana.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo verificar se a formulação apresentada pela NBR 14762:2010 pode também ser aplicada para a análise de elementos comprimidos pela NBR 15524:2007.

1.6 Revisão Bibliográfica

Com o crescente uso de sistemas de armazenagem industrial no cenário mundial, se faz necessária a realização de estudos do comportamento e estabilidade de seus componentes. A seguir são apresentados alguns desses estudos, que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Sarmanho (1991) estudou o comportamento pós-crítico das paredes esbeltas de perfis metálicos com chapa dobrada através de análises experimentais e teóricas. Nas análises experimentais realizou ensaios em colunas curtas com seção tipo C, a fim de evitar a influência do fenômeno de flambagem global e garantir a presença da flambagem local. A partir dos resultados experimentais, propôs uma nova formulação para representação do comportamento dos perfis analisados, que se mostrou mais adequada que as formulações de norma.

Campos (2003) realizou um estudo do sistema de armazenagem industrial do tipo drive-in. Para o estudo foram feitas as análises teórica, experimental e numérica. As comparações entre os tipos de análises da estrutura mostraram que a análise não-linear é mais adequada para o sistema de armazenagem industrial devido à não linearidade do sistema.

Ribeiro (2006) analisou experimentalmente colunas de seção tipo rack com e sem perfurações visando avaliar a influência das perfurações na capacidade de carga. Comparou os

resultados das análises experimentais com as prescrições do RMI (*Rack Manufacturers Institute*) e Sarawit. Aplicou as recomendações da norma brasileira NBR 14762:2010 para o cálculo da carga nominal axial das colunas, juntamente ao efeito das perfurações na proposição de uma adequação das prescrições do RMI. A formulação proposta apresentou valores satisfatórios e que garantiam maior segurança no dimensionamento das colunas.

Roure et al. (2011) analisaram dois métodos de dimensionamento de colunas curtas do tipo rack, um numérico e outro analítico. Para o método analítico foi utilizada a Norma Europeia e para o método numérico foi feita uma análise utilizando elementos finitos. Os resultados obtidos nos dois métodos foram comparados com resultados experimentais. Concluíram que ambos os métodos apresentam resultados satisfatórios no dimensionamento das colunas.

Souza (2013) estudou experimental e numericamente a influência das perfurações em colunas em perfil formado a frio na ocorrência dos modos local, distorcional e global de flambagem. Utilizou para tanto a Teoria Generalizada de Vigas (GBT) e o Método dos Elementos Finitos. Foram adotadas colunas submetidas a carregamento centrado e com extremidades rotuladas. A comparação entre os resultados numéricos e experimentais permitiu concluir que o modelo numérico pode ser validado via Método dos Elementos Finitos.

Em um estudo feito por Pastor et al. (2014) foi analisada a influência da magnitude das imperfeições na análise não linear de colunas em perfis formados a frio com seção tipo rack. Realizaram análises numéricas com a introdução de imperfeições iniciais a fim de definir as magnitudes mais adequadas. Utilizaram colunas perfuradas e não perfuradas de diversos tamanhos para reproduzir os modos local, distorcional e global de flambagem. Concluíram que a carga última é influenciada pela amplitude da imperfeição, principalmente para o caso da flambagem distorcional.

Faria (2016) avaliou a influência dos modos de flambagem local e distorcional na capacidade resistentes de perfis formados a frio. Para tanto, desenvolveu um modelo numérico via software ANSYS e calibrou o mesmo utilizando o software GBTul. Realizou também ensaios experimentais em colunas perfuradas. Os resultados do modelo numérico

apresentaram boa correlação com os resultados experimentais, evidenciando a viabilidade de sua utilização.

Neiva (2017) analisou a influência de perfurações na capacidade de carga de perfis formados a frio submetidos a carregamentos centrado e excêntrico. Foi desenvolvido e calibrado um modelo numérico utilizando o método dos elementos finitos, via ANSYS. Foi feita a análise linear e não-linear para a obtenção de cargas críticas e últimas respectivamente. Realizou também a análise teórica segundo formulação da NBR 14762:2010. Ao fim foi feita a comparação entre os resultados e proposta nova formulação para o cálculo das forças axiais resistentes de compressão.

Elias (2018) realizou um estudo sobre a influência de contraventamentos na capacidade resistente de painéis contraventados. Foram feitos ensaios experimentais e teóricos dos painéis para a determinação da capacidade resistente encontrados para colunas isoladas. Observou-se que o modo distorcional reduz os valores das cargas últimas, sendo mais significativo no comprimento destravado que na coluna isolada. Os valores encontrados na análise teórica se mostraram menores que os valores encontrados experimentalmente.

Starlino (2018) estudou numericamente colunas isoladas com seção tipo rack submetidas a carregamento excêntrico. Para a análise, foi desenvolvido um modelo numérico via software ANSYS. Foi aplicado primeiramente o carregamento centrado e posteriormente um carregamento excêntrico simulando de forma mais aproximada o carregamento real que ocorre em colunas de sistemas de armazenagem industrial. Observou que o carregamento excêntrico reduz a capacidade resistente das colunas. Observou também que o modo de falha predominante para colunas de até 400mm é o local, para colunas de 500mm a 1500 mm é o distorcional e para colunas de comprimento superior a 1500mm, o modo predominante é o global.

Starlino (2019) analisou numericamente painéis contraventados compostos por colunas em perfil formado a frio tipo rack, com perfurações e enrijecedores de alma e no flange de ligação. Analisou dois tipos de contraventamento (K com diagonais regulares e X) e dois comprimentos (1400 mm e 2000 mm) via ANSYS. Observou que a carga crítica encontrada para os painéis com contraventamento tipo X foram maiores que para os contraventamentos dispostos em K. Comparou os resultados numéricos dos painéis K com resultados

experimentais e verificou que o comportamento em ambos os casos foi semelhante, apresentando uma configuração deformada semelhante e mesmo modo de flambagem predominante (distorcional).

1.7 Metodologia

No início do desenvolvimento do trabalho foi realizado o aprimoramento do estudo do software ANSYS utilizado na análise numérica das colunas. Foi feito também o estudo das normas utilizadas (NBR 14762:2010 e NBR 15524:2007).

Foi desenvolvido um modelo numérico utilizando a linguagem APDL do ANSYS para a análise das colunas. Foram analisados dois comprimentos de colunas, seguindo as indicações da NBR 15524:2007: para a análise de colunas curtas, foi utilizado o comprimento de 300 mm e para a análise da influência da flambagem distorcional, foi utilizado o comprimento de 1000 mm. Além disso, foram feitas variações da largura da alma das seções (80 mm, 90 mm e 100 mm) e espessura da chapa (2,00 mm, 2,25 mm e 2,65 mm), totalizando 16 modelos.

A análise numérica foi dividida em duas partes: análise linear e análise não-linear. A primeira tem como objetivo a obtenção das cargas críticas e dos modos de flambagem das colunas. A segunda considera as não-linearidades geométrica e física da coluna para a obtenção das cargas últimas. Nessa etapa, os resultados obtidos para o primeiro modo de flambagem pela análise linear são utilizados para a introdução das imperfeições geométricas.

Em seguida, foi realizada a análise teórica utilizando as normas em estudo. Primeiramente, seguindo a formulação da NBR 15524:2007, foi determinada a área efetiva considerando a influência das perfurações, da flambagem local e do trabalho a frio, utilizando os resultados numéricos obtidos para as colunas curtas. Com esse valor de área efetiva e os resultados da análise das colunas de 1000 mm, foi verificada a necessidade de uma nova atualização da área efetiva da seção, dessa vez considerando a influência da flambagem distorcional. Com o valor da área efetiva final foram calculadas as resistências de colunas com comprimento variando entre 200 mm e 8000 mm.

Foi calculado também a capacidade resistente das colunas aplicando na formulação da NBR 14762:2010 a área efetiva, a área bruta da seção e a área mínima líquida. Para esses

casos também foram tomados comprimentos entre 200 mm e 8000 mm. Ao final, os resultados são apresentados, comparando os quatro casos analisados.

2 ANÁLISE NUMÉRICA

Para a análise numérica foi utilizado o Método dos Elementos Finitos. Este método se caracteriza por dividir uma estrutura contínua em elementos menores, gerando uma malha de elementos finitos. Dentre os softwares comerciais que utilizam o Método dos Elementos Finitos está o ANSYS, adotado no presente trabalho.

A análise numérica foi realizada com auxílio da linguagem de programação do ANSYS (APDL – Ansys Parametric Desing Language), que facilita a análise paramétrica das colunas, uma vez que foi necessário realizar variações na geometria. Os modelos analisados sofreram variação na largura da alma (80mm, 90mm e 100mm) e na espessura da seção (2,00mm, 2,25mm e 2,65 mm). Além disso, foram estudados dois comprimentos de coluna, 300 mm e 1000mm a fim simular os ensaios com colunas curtas e ensaios de flambagem distorcional exigidos pela NBR 15524:2007. As variações na geometria são apresentadas na Tabela 1. A análise numérica foi dividida em duas partes: análise linear e análise não-linear, apresentadas mais adiante.

Tabela 1 - Variações na geometria

Largura da alma – b_w (mm)	Espessura - t (mm)
80	2,00
	2,25
	2,65
90	2,00
	2,25
	2,65
100	2,00
	2,25
	2,65

2.1 Escolha da geometria

Para o estudo em questão foi adotada a coluna em perfil formado a frio com seção tipo rack (Figura 2). A coluna possui perfurações inclinadas posicionadas ao longo de seu comprimento que permitem a fixação de elementos nos sistemas de armazenagem industrial. A coluna apresentou variações na geometria, englobando dimensões comerciais. De acordo com essas variações, foi criada uma nomenclatura para facilitar a identificação das colunas, como apresentado na Tabela 2. As dimensões das perfurações foram mantidas constantes.

Tabela 2 - Nomenclatura adotada

Esquema de identificação: C_XX_YYY_ZZZ	
XX	Representa a largura da alma (80 mm, 90 mm ou 100 mm)
YYY	Representa a espessura da seção (2,00 mm, 2,25 mm e 2,65 mm)
ZZZ	Representa o comprimento da coluna (300 mm ou 1000 mm)

Ex.: A coluna C_80_2,00_300 possui largura de alma igual a 80 mm, espessura de 2,00mm e comprimento de 300 mm.

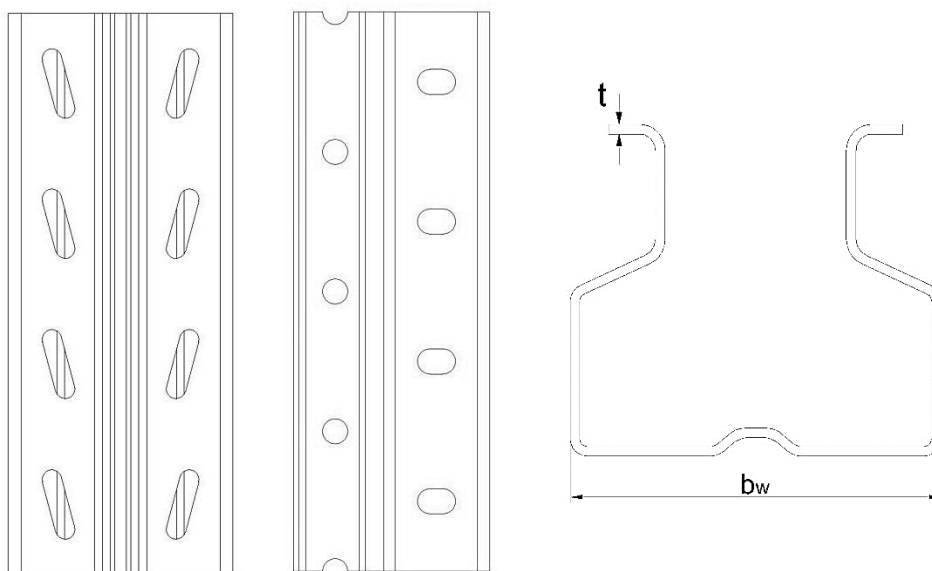


Figura 7 - Geometria utilizada

A determinação da capacidade resistente de elementos comprimidos perfurados segundo a NBR 15524:2007, utiliza resultados advindos de análises de colunas curtas e da influência da flambagem distorcional. Segundo a norma, o comprimento das colunas curtas deve ser maior que 3 vezes a largura do perfil (b_w), deve incluir pelo menos cinco passos de perfurações ($h_{5\text{furos}}$) e não deve exceder 20 vezes o menor raio de giração ($r_{\text{mín}}$). Dessa forma foi definido como padrão um comprimento que atendesse a essas exigências para todas as seções variadas. Foi adotado então o comprimento de 300 mm para as colunas curtas (Tabela 3).

Tabela 3 - Escolha do comprimento das colunas curtas

b_w (mm)	$3b_w$ (mm)	$r_{\text{mín}}$ (mm)	$20r_{\text{mín}}$ (mm)	$h_{5\text{furos}}$ (mm)	h	$\geq \begin{cases} 3b_w \\ h_{5\text{furos}} \end{cases}$ $\leq \{20r_{\text{mín}}\}$
80	240	23,98	479,6	250	250	
90	270	24,05	481,0	250	250	
100	300	25,35	507,0	250	300	
				h_{coluna} (mm)	300	

2.2 Modelo numérico

2.2.1 Elementos

As colunas foram simuladas utilizando o elemento finito de casca SHELL181 (Figura 8). Este elemento possui 4 nós e 6 graus de liberdade em cada nó (3 rotações e 3 translações).

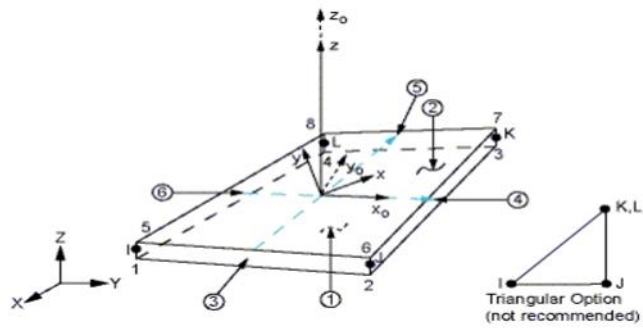


Figura 8 - Elemento SHELL181. Fonte: ANSYS 12.1

2.2.2 Condições de contorno

As condições de contorno foram simuladas de forma a representar uma coluna biapoada com empenamento restringido e sob compressão uniforme. A fim de evitar o empenamento da coluna e garantir o mesmo deslocamento nos nós da extremidade, os mesmos tiveram as translações acopladas segundo um nó mestre, como apresentado na Figura 9.

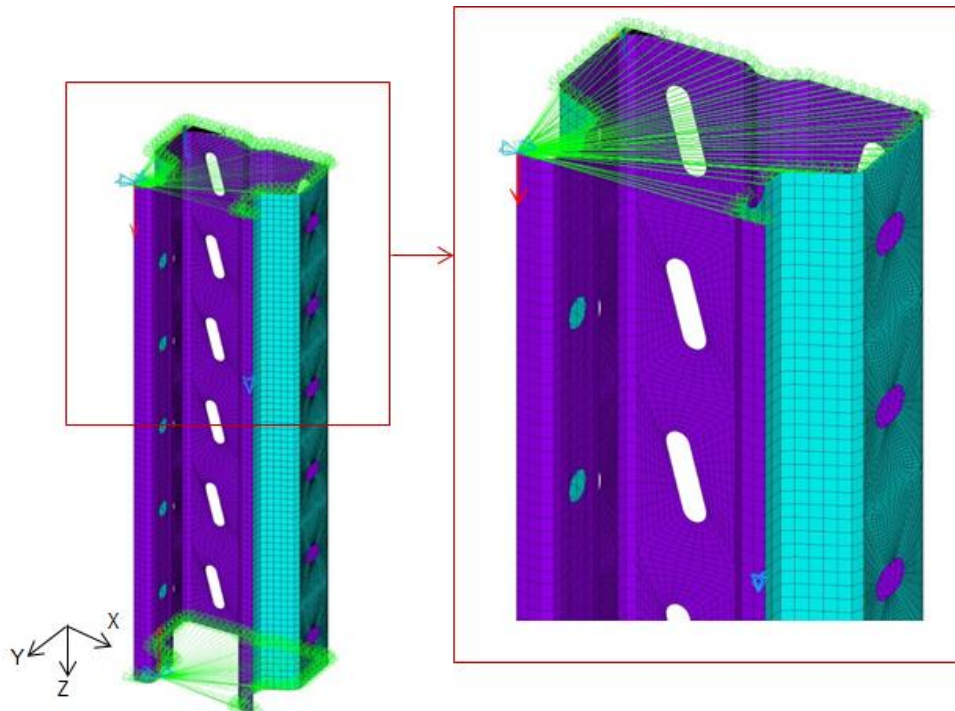


Figura 9 - Condições de contorno utilizadas

O carregamento foi aplicado no nó mestre de cada extremidade, simulando um carregamento distribuído uniformemente. Os nós da extremidade tiveram as translações em X e Y restringidas (no plano perpendicular a aplicação do carregamento). Um nó à meia altura teve seu deslocamento restringido longitudinalmente, para impedir o deslocamento de corpo rígido. Para conciliar custo computacional e padronização foi utilizada malha mapeada em toda coluna. Na região das perfurações da alma, flange e flange de ligação, a fim de melhor avaliar a influência dessas perfurações, foi adotada malha com maior refinamento.

2.2.3 Propriedade dos materiais

Para as colunas foi adotado o aço CF-30, para chapas finas de aço carbono para uso estrutural. Esse tipo de aço possui tensão de escoamento (f_y) igual a 300 MPa e tensão de ruptura (f_u) igual a 490 MPa. Foi admitido módulo de elasticidade igual a 200 GPa, segundo a NBR 14762:2010, módulo transversal de elasticidade igual a 77 GPa e coeficiente de Poisson igual a 0,3. A Tabela 4 apresenta um resumo das propriedades utilizadas.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço

Tensão de escoamento (f_y)	300 MPa
Tensão de ruptura (f_u)	490 MPa
Módulo de elasticidade (E)	200 GPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,3
Módulo transversal de elasticidade (G)	77 GPa

2.3 Análise linear

Na primeira etapa da análise numérica foi realizada a análise linear das colunas, visando obter o carregamento crítico e os modos de flambagem das colunas. As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados obtidos para a primeira carga crítica (P_{cr}) das colunas de 300 mm (colunas curtas) e de 1000 mm, bem como uma representação do modo de flambagem encontrado para as colunas. A figura apresentada na tabela é representativa para todas as seções analisadas, dentro de um mesmo comprimento.

Tabela 5 - Cargas críticas para colunas curtas

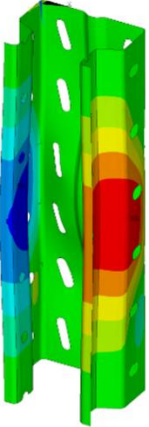
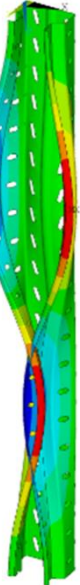
Coluna	P_{cr} (kN)	Modo distorcional
C_80_2,00_300	598,76	
C_80_2,25_300	756,06	
C_90_2,00_300	509,71	
C_90_2,25_300	647,17	
C_90_2,65_300	906,71	
C_100_2,00_300	445,77	
C_100_2,25_300	571,06	
C_100_2,65_300	805,53	

Tabela 6 - Cargas críticas pra colunas de 1000 mm

Coluna	P_{cr} (kN)	Modo distorcional
C_80_2,00_1000	257,29	
C_80_2,25_1000	317,62	
C_90_2,00_1000	259,53	
C_90_2,25_1000	320,29	
C_90_2,65_1000	435,62	
C_100_2,00_1000	235,85	
C_100_2,25_1000	290,17	
C_100_2,65_1000	393,20	

Analisando os resultados encontrados, percebe-se que, mantida uma espessura dentro de um mesmo comprimento de coluna, o valor da carga crítica diminui com o aumento da

largura da alma. Isso indica que a seção está mais suscetível a fenômenos de instabilidade quanto maior a largura da alma, uma vez que ocorre o aumento da esbeltez de placa. Esse comportamento é observado tanto para coluna de 300 mm quanto para a coluna de 1000 mm. Já o aumento da espessura da seção, dentro de uma mesma largura de alma, provoca o aumento no valor da carga crítica, devido à redução da esbeltez de placa.

Percebe-se também a redução da carga crítica para as colunas de 1000 mm em relação às colunas de 300 mm. Tal fato ocorre, pois quanto maior o comprimento de uma coluna, maior é sua esbeltez global e maior é sua sensibilidade aos fenômenos de instabilidade. O modo de falha predominante também se modifica com a variação do comprimento, como ilustrado na Figura 10.

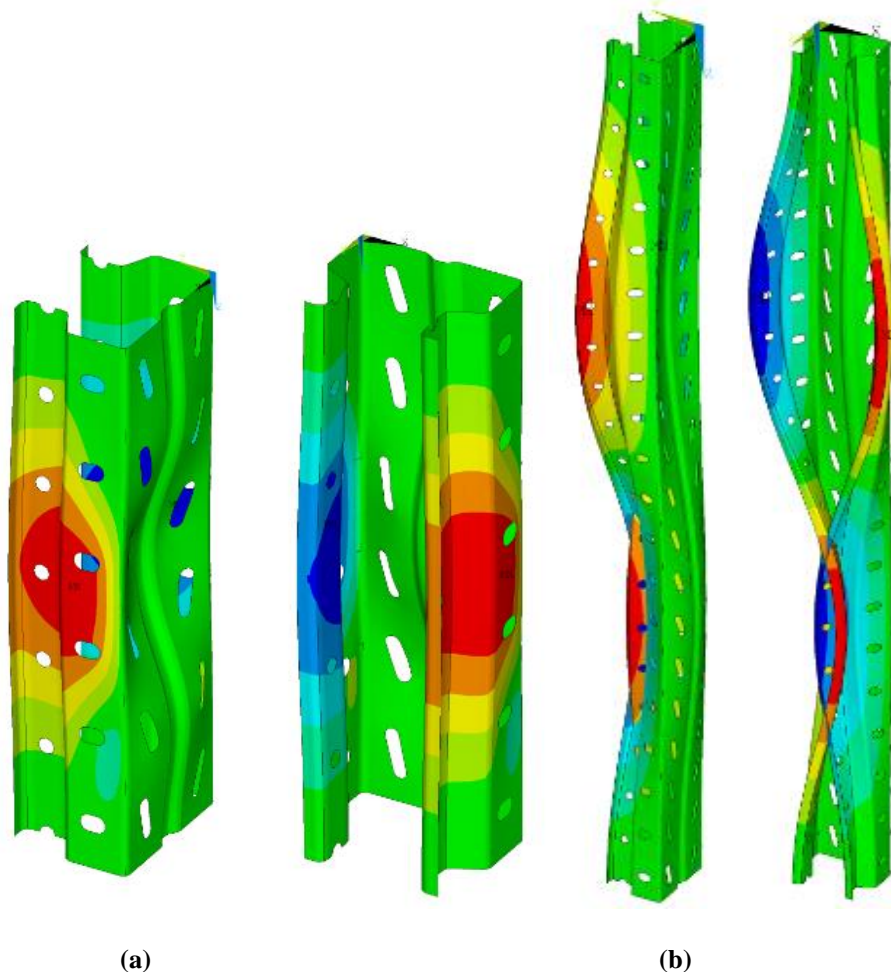


Figura 10 - Modos de flambagem para carga crítica. (a) Coluna C_90_2,25_300 e (b) C_90_2,25_1000

Para a coluna C_90_2,25_300, observa-se a ocorrência do modo distorcional e consequente amassamento na alma. Para a coluna C_90_2,25_1000, o modo de falha predominante é o distorcional, diferindo-se do modo encontrado para coluna de 300 mm pela quantidade de meias-ondas. Os modos de flambagem dentro de um mesmo comprimento foram semelhantes.

2.4 Análise não-linear

A análise não-linear foi realizada para obtenção da carga última resistida pela coluna. Nessa etapa são introduzidas as não-linearidades física e geométrica da coluna (imperfeições geométricas). Para a consideração da não-linearidade física foi adotado um diagrama multilinear de tensão versus deformação (Figura 11) baseado em trabalhos anteriores (Neiva, 2017).

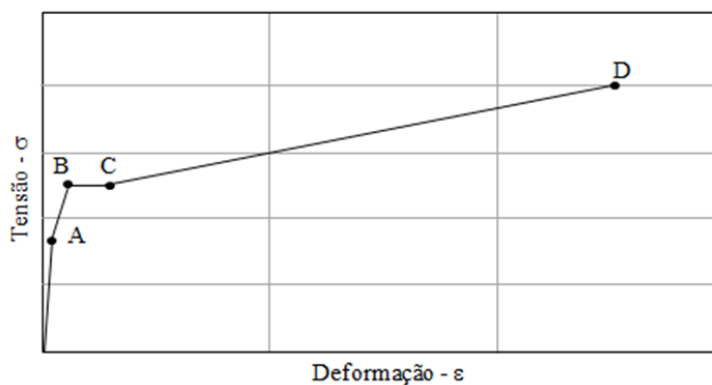


Figura 11 - Diagrama multilinear de tensão versus deformação

No gráfico da Figura 11, o ponto A é referente à tensão igual a $0,70f_y$ (70 % da tensão de escoamento) e deformação ε_1 ; o ponto B corresponde à deformação $3\varepsilon_y$ (três vezes o valor da deformação de escoamento) e tensão igual a tensão de escoamento; o ponto C indica o fim do escoamento e deformação igual a $10\varepsilon_y$; e o ponto D é relativo a f_u (tensão última) e deformação de $100\varepsilon_y$.

Para a atualização da geometria e introdução das imperfeições geométricas, foi aplicado um fator igual a 0,1t (10% da espessura) na configuração deformada da coluna referente ao

primeiro modo de flambagem. Os resultados encontrados para os valores de carga última (P_u) são apresentados nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Carga última para colunas curtas

Coluna	P_u (kN)
C_80_2,00_300	112,35
C_80_2,25_300	127,29
C_90_2,00_300	117,21
C_90_2,25_300	132,83
C_90_2,65_300	158,42
C_100_2,00_300	122,87
C_100_2,25_300	141,40
C_100_2,65_300	168,60

Tabela 8 - Cargas últimas para colunas de 1000 mm

Coluna	P_u (kN)
C_80_2,00_1000	100,98
C_80_2,25_1000	116,50
C_90_2,00_1000	104,53
C_90_2,25_1000	121,55
C_90_2,65_1000	149,37
C_100_2,00_1000	107,81
C_100_2,25_1000	125,09
C_100_2,65_1000	155,08

Percebe-se que, para uma mesma largura, o aumento da espessura implica em um aumento na resistência da coluna, devido à redução da esbeltez local. Comparando os dois comprimentos, há a redução da carga última com o aumento do comprimento. Esses comportamentos são semelhantes ao observados para a carga crítica.

Quanto aos modos de falha presentes nas colunas, para os comprimentos de 300 mm, observa-se influência do modo distorcional e um amassamento a região da alma, seguindo a mesma configuração encontrada na análise linear. O mesmo comportamento foi observado para as colunas com comprimento de 1000 mm. Para as colunas de 1000 mm, também ocorre o modo de flambagem distorcional. As Figuras 12 e 13 ilustram a configuração deformada das colunas C_90_2,00_300 e C_90_2,00_1000.

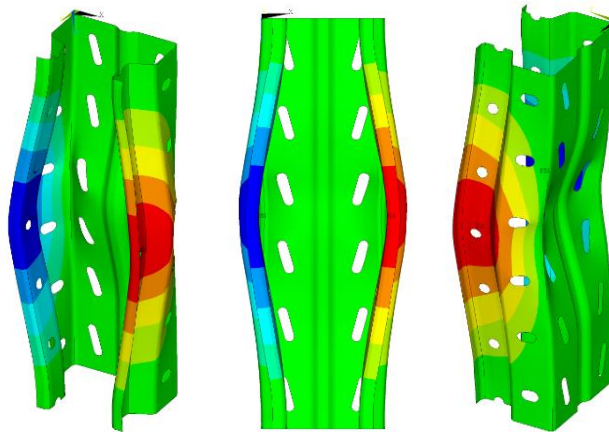


Figura 12- Configuração deformada para coluna C_90_2,00_300

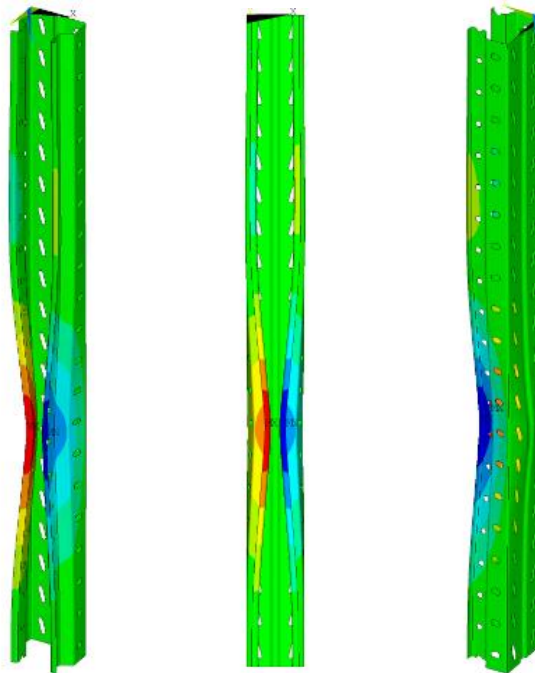


Figura 13 - Configuração deformada para coluna C_90_2,20_1000

3 ANÁLISE TEÓRICA

O dimensionamento das colunas foi dividido nas seguintes etapas: determinação da área efetiva e dimensionamento por meio da NBR 15524:2007; dimensionamento utilizando as prescrições da NBR 14762:2010 e a área efetiva encontrada na NBR 15524:2007; dimensionamento segundo a NBR 14762:2010 utilizando a área bruta (A_g); e dimensionamento utilizando a área mínima líquida ($A_{\text{mín.líq}}$). A seguir são apresentados exemplos dos cálculos realizados em cada uma das etapas citadas. Para os exemplos é utilizada a coluna com largura de alma igual a 80 mm e espessura de 2,25 mm. Foi considerado o eixo y como sendo o eixo de simetria (Figura 14)

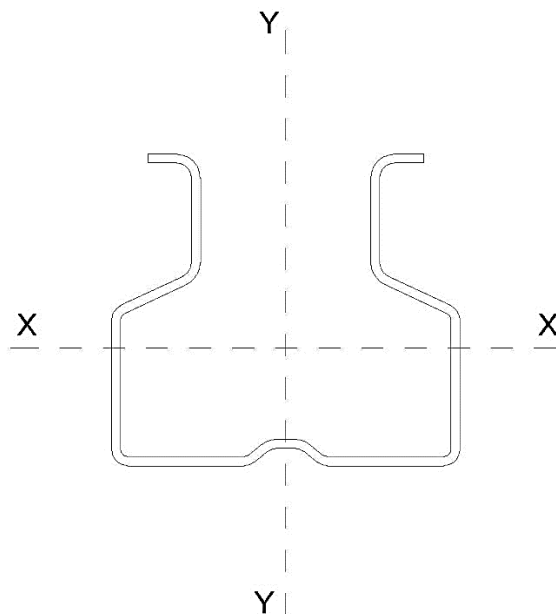


Figura 14 - Eixos de referência da seção transversal

3.1 Determinação da área efetiva pela NBR 15524:2007

Para o dimensionamento de colunas perfuradas comprimidas segundo a NBR 15524:2007, é necessária a determinação da área efetiva da seção transversal considerando a influência da flambagem local, do trabalho a frio, das perfurações e da flambagem distorcional.

Primeiramente, deve-se obter a resistência real através de ensaios experimentais ou análises numéricas de colunas curtas, cujo comprimento deve obedecer às condições

apresentadas no item 2.1. No presente trabalho foi utilizada a análise numérica para a determinação da resistência real.

Então, deve-se obter o fator de forma (Q), que assume que a máxima resistência hipotética seja em função da área mínima líquida. O valor de Q, quando menor que 1,00, representa uma redução na resistência da coluna devido à influência da flambagem local, das perfurações e de imperfeições de fabricação. A Equação 1 define o fator de forma.

$$Q = \frac{R_{co}}{f_y \times A_{mín,liq}} \leq 1,00 \quad (1)$$

Onde:

- Q é o fator de forma;
- R_{co} é a resistência real da coluna curta;
- f_y é a tensão de escoamento;
- $A_{mín,liq}$ é a área mínima líquida da seção transversal.

A NBR 15524:2007 apresenta correções para carga de ruptura da coluna segundo diferenças entre espessura e tensão de escoamento real e nominal das colunas. Porém, como foram realizadas apenas análises numéricas, essas correções não foram necessárias.

Como apresentado na Tabela 7, para a coluna C_80_2,00_300, a carga última encontrada foi igual a 112,35 kN. A área mínima líquida dessa coluna é igual a 4,20 cm². Pela Equação 1, o fator de forma para essa coluna é:

$$Q = \frac{112,35}{30 \times 4,20} = 0,892 \quad (2)$$

Como o valor de Q é menor que 1,00, conclui-se que há influência da flambagem local e das perfurações na capacidade resistente da coluna. A área efetiva da seção transversal é dada pelo produto entre o fator de forma e a área bruta da seção (Equação 3).

$$A_{ef} = Q \times A_g \quad (3)$$

Onde A_g é a área bruta da seção e A_{ef} é a área efetiva. Para a coluna em análise, a área bruta é igual a 5,04 cm². Logo, a área efetiva será:

$$A_{ef} = 0,892 \times 5,04 = 4,49 \text{ cm}^2 \quad (4)$$

Depois de determinada a área efetiva pela influência da flambagem local e das perfurações, é necessário verificar a necessidade de modificação da nova área devido à flambagem distorcional. Para esse caso, obtém-se o valor da força axial resistente real (N_{db}) através da análise de uma coluna com comprimento de aproximadamente 1,00m. Os valores de N_{db} são apresentados na Tabela 8.

Então é calculada a força axial resistente N_b , utilizando a área efetiva, a tensão de escoamento, desconsiderando a flambagem distorcional e levando em conta as flambagens por flexão e flexo-torção. Os valores de N_{db} e N_b são comparados, obtendo-se o parâmetro ε (Equação 5).

$$\varepsilon = \frac{N_{db}}{N_b} \quad (5)$$

Caso ε seja menor que 1,00, a área efetiva deve ser ajustada de forma que N_b e N_{db} sejam iguais. Caso contrário, não é necessário modificar a área efetiva. A seguir são apresentadas as equações necessárias para obtenção da força axial resistente N_b . Exceto pela área efetiva, todas as propriedades da seção são tomadas em relação à seção bruta.

$$N_b = \frac{\chi \times A_{ef} \times f_y}{\gamma_m} \quad (6)$$

Onde

- A_{ef} é a área efetiva obtida pela análise de coluna curta;
- γ_m é o fator de material, igual a 1,0 para cálculo da resistência da seção transversal tanto pra estado-limite último quanto pra estado-limite de serviço;
- χ é o fator de redução relacionado à flambagem global da coluna, dado por:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,00 \quad (7)$$

- Φ é dado por:

$$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (8)$$

- α é o fator de imperfeição igual a 0,34 para perfis tipo *rack*;
- $\bar{\lambda}$ é dado por:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{ef} \times f_y}{N_{cr}}} \quad (9)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_l} \sqrt{\beta_l} \quad (10)$$

- λ é o índice de esbeltez definido como a relação entre o comprimento de flambagem (l) e o raio de giração (r);
- λ_l é definido por:

$$\lambda_l = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (11)$$

- E é o módulo de elasticidade do aço;
- β_l é definido por

$$\beta_l = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (12)$$

- A_g é a área bruta da seção transversal;
- N_{cr} é a força crítica de flambagem.

A Equação 10 é utilizada no cálculo de $\bar{\lambda}$ para a consideração da flambagem por flexão e a Equação 9 é utilizada quando a flambagem se dá por torção ou flexo-torção. Para este caso, a força crítica de flambagem (N_{cr}) é o menor valor entre a carga crítica por torção (Equação 13) e a carga crítica por flexo-torção (Equação 14):

$$N_{crt} = \frac{1}{r_0^2} \left(G \times J + \frac{\pi^2 \times E \times c_w}{L_{et}^2} \right) \quad (13)$$

$$N_{crt} = \frac{N_{cry}}{2\beta} \left[1 + \frac{N_{crt}}{N_{cry}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{crt}}{N_{cry}} \right)^2 + 4 \left(\frac{y_0}{r_0} \right)^2 \frac{N_{crt}}{N_{cry}}} \right] \quad (14)$$

Onde:

- N_{crit} é a força crítica por torção;
- N_{crtf} é a força crítica por flexo-torção;
- $N_{\text{cr,y}}$ é a carga crítica elástica;
- G é o módulo transversal de elasticidade;
- y_0 é a distância do centro de cisalhamento até o centro de gravidade da seção bruta;
- r_0 é o raio de giração polar, dado por:

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + y_0^2} \quad (15)$$

- r_x e r_y são os raios de giração da seção transversal bruta em torno dos eixos principais de inércia;
- J é a constante de St Venant;
- C_w é a constante de empenamento;
- L_{et} é o comprimento efetivo da coluna em relação à torção. Segundo a NBR 15524:2007, na determinação da área efetiva, esse comprimento deve ser igual a metade do comprimento da coluna.
- β é dado por

$$\beta = 1 - \left(\frac{y_0}{r_0}\right)^2 \quad (16)$$

O valor da força axial resistente N_b será o menor valor entre os obtidos para os modos de instabilidade de flexão, torção e flexo-torção.

Analisando então a influência da flambagem por flexão para a coluna C_80_2,00_1000, tem-se das Equações 12 e 11:

$$\beta_l = \frac{4,49}{5,04} = 0,891 \quad (17)$$

$$\lambda_l = \pi \sqrt{\frac{20000}{30}} = 81,12 \quad (18)$$

O índice de esbeltez será, para raio de giração igual a 2,40 cm:

$$\lambda = \frac{100}{2,40} = 41,67 \quad (19)$$

Substituindo os resultados na Equação 10:

$$\bar{\lambda} = \frac{41,67}{81,12} \sqrt{0,891} = 0,486 \quad (20)$$

Da Equação 8 tem-se:

$$\Phi = 0,5[1 + 0,34(0,486 - 0,2) + 0,486^2] = 0,667 \quad (21)$$

O fator de redução quanto à flambagem global por flexão será:

$$\chi = \frac{1}{0,667 + \sqrt{0,667^2 - 0,486^2}} = 0,891 \quad (22)$$

Como o valor de χ foi menor que 1,00, ocorre flambagem por flexão na coluna.

A força axial resistente para flexão será:

$$N_b = \frac{0,891 \times 4,49 \times 30}{1,00} = 120,02 \text{ kN} \quad (23)$$

Analisado agora a influência da flambagem por torção e da flexo-torção, da Equação 13 tem-se que a carga crítica a torção é:

$$N_{crt} = \frac{1}{7,19^2} \left(7700 \times 0,0627 + \frac{\pi^2 \times 20000 \times 651,56}{50^2} \right) = 1004,48 \text{ kN} \quad (24)$$

Para o cálculo da carga crítica por flexo-torção é necessário determinar a carga crítica elástica, dada por:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{L^2} \quad (25)$$

Com I sendo o momento de inércia da seção bruta em y (Figura 14) e L o comprimento de flambagem tomado como o próprio comprimento da coluna. Então, tem-se:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 44,47}{100^2} = 877,80 \text{ kN} \quad (26)$$

O valor de β_1 é:

$$\beta = 1 - \left(\frac{6,09}{7,19}\right)^2 = 0,283 \quad (27)$$

Substituindo os valores encontrados na Equação 14, tem-se que a carga crítica por flexo-torção é:

$$N_{crft} = \frac{877,80}{2 \times 0,283} \left[1 + \frac{1004,48}{877,80} - \sqrt{\left(1 - \frac{1004,48}{877,80}\right)^2 + 4 \left(\frac{6,09}{7,19}\right)^2 \frac{1004,48}{877,80}} \right] = 506,27 \text{ kN} \quad (28)$$

Comparando os resultados das Equações 24 e 28, o valor de N_{cr} será 506,52 kN. Então, pela Equação 9:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{4,49 \times 30}{506,27}} = 0,516 \quad (29)$$

$$\Phi = 0,5[1 + 0,34(0,516 - 0,2) + 0,516^2] = 0,687 \quad (30)$$

O fator de redução quanto à flambagem global será:

$$\chi = \frac{1}{0,687 + \sqrt{0,687^2 - 0,516^2}} = 0,877 \quad (31)$$

Para este caso, também haverá influência da flambagem global, pois $\chi < 1,00$. A força axial resistente é então:

$$N_b = \frac{0,877 \times 4,49 \times 30}{1,00} = 118,13 \text{ kN} \quad (32)$$

Comparando os resultados das Equações 23 e 32, a força axial resistente N_b da coluna é igual a 118,13 kN. Dessa forma, a relação entre os valores de N_{db} e N_b é:

$$\varepsilon = \frac{100,98}{118,13} = 0,854 \quad (33)$$

Como $\varepsilon < 1,00$, é necessário corrigir o valor da área efetiva, considerando o efeito da flambagem distorcional. A nova área efetiva é:

$$A_{ef} = \frac{N_{db}}{\gamma \times \chi \times f_y} = \frac{100,98}{0,877 \times 30} = 3,84 \text{ cm}^2 \quad (34)$$

Esse deve ser o valor de área efetiva utilizado no dimensionamento de colunas com largura de alma igual a 80 mm e espessura de 2,00 mm. O processo descrito foi utilizado também para as outras seções estudadas. As Tabelas 9 e 10 apresentam um resumo dos resultados encontrados.

Tabela 9 - Ajuste da área efetiva quanto à flambagem local e perfurações

Coluna	R_{co} (kN)	Q	A_g (cm ²)	A_{ef} (cm ²)
C_80_2,00_300	112,35	0,892	5,04	4,49
C_80_2,25_300	127,29	0,899	5,67	5,10
C_90_2,00_300	117,21	0,888	4,40	4,67
C_90_2,25_300	132,83	0,894	5,89	5,27
C_90_2,65_300	158,42	0,906	6,94	6,29
C_100_2,00_300	122,87	0,866	5,57	4,82
C_100_2,25_300	141,40	0,886	6,26	5,55
C_100_2,65_300	168,60	0,898	7,38	6,63

Tabela 10 - Ajuste da área efetiva quanto à flambagem distorcional

Coluna	N_{b, final} (kN)	χ	ε	A_g (cm²)	A_{ef, final} (cm²)
C_80_2,00_1000	118,27	0,877	0,854	5,04	3,84
C_80_2,25_1000	134,10	0,876	0,869	5,67	4,43
C_90_2,00_1000	124,93	0,892	0,837	4,40	3,91
C_90_2,25_1000	140,80	0,891	0,863	5,89	4,55
C_90_2,65_1000	167,75	0,890	0,890	6,94	5,60
C_100_2,00_1000	130,90	0,905	0,824	5,57	3,97
C_100_2,25_1000	150,15	0,902	0,833	6,26	4,62
C_100_2,65_1000	179,12	0,901	0,866	7,38	5,74

3.2 Dimensionamento utilizando a NBR 14762:2010

Para a NBR 14762:2010, o valor do fator de redução da força axial de compressão resistente associado à flambagem global, χ , é calculado da seguinte forma:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2}, \quad \text{para } \lambda_0 \leq 1,5 \quad (35)$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}, \quad \text{para } \lambda_0 > 1,5 \quad (36)$$

Sendo λ_0 dado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_e}} \quad (37)$$

Onde:

- A é a área bruta da seção;

- N_e é a força axial de flambagem, tomada como o menor dos valores a seguir, para perfis monossimétricos:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \times E \times I_x}{K_x \times L_x^2} \quad (38)$$

$$N_{eyz} = \frac{N_{ey} + N_{ez}}{2\beta} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ey}N_{ez}\beta}{(N_{ey} + N_{ez})^2}} \right) \quad (39)$$

- N_{ex} e N_{ey} são as forças axiais de flambagem global elástica em relação aos eixos principais de inércia x e y, respectivamente;
- N_{ey} é dado por:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{K_y \times L_y^2} \quad (40)$$

- N_{ez} é dado por:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 \times E \times C_w}{(K_z \times L_z)^2} + GJ \right] \quad (41)$$

- $K_x L_x$ e $K_y L_y$ são os comprimentos de flambagem por flexão em relação aos eixos x e y respectivamente, adotados como sendo o comprimento da coluna;
- $K_z L_z$ é o comprimento efetivo de flambagem global por torção. Foi adotado coeficiente K_z igual a 1,0, considerando que não há garantia de impedimento ao empenamento em situações reais;
- β é dado pela Equação 16;

Para este trabalho, o valor da área na Equação 37 foi substituído pela área bruta da seção, pela área mínima líquida e pela área efetiva encontrada na análise pela NBR 15524:2007. A seguir, serão descritos exemplos de cálculo para o dimensionamento com a formulação da NBR 14762:2010, a para coluna C_80_2,00_1000.

3.2.1 Área efetiva

Primeiramente, considerando simetria em torno do eixo y, determina-se a força axial de flambagem elástica, sendo o menor valor entre N_{ex} e N_{ey} .

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 28,96}{100^2} = 571,615 \text{ kN} \quad (42)$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \times 20000 \times 44,47}{100^2} = 877,80 \text{ kN} \quad (43)$$

$$N_{ez} = \frac{1}{7,19^2} \left[\frac{\pi^2 \times 20000 \times 651,56}{100^2} + 7700 \times 0,0672 \right] = 258,80 \text{ kN} \quad (44)$$

$$N_{eyz} = \frac{877,80 + 258,80}{2 \times 0,283} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \times 877,80 \times 258,80 \times 0,283}{(877,80 + 258,80)^2}} \right) = 210,95 \text{ kN} \quad (45)$$

A força axial de flambagem é então $N_e = 210,95 \text{ kN}$. O índice de esbelteza reduzido será:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_{ef} \times f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{3,84 \times 30}{210,95}} = 0,739 \quad (46)$$

Como o valor de λ_0 é menor que 1,5, o fator de redução quanto flambagem global será dado pela Equação 35.

$$\chi = 0,658^{0,739^2} = 0,796 \quad (47)$$

Como χ é menor que 1,00, a coluna sofre flambagem global por flexão. A força axial resistente N_b será:

$$N_b = \frac{0,796 \times 3,84 \times 30}{1,00} = 91,70 \text{ kN} \quad (48)$$

3.2.2 Área bruta

A força axial de flambagem elástica para esse caso é a mesma calculada anteriormente ($N_e = 210,95 \text{ kN}$). O índice de esbeltez reduzido, considerando a área bruta é:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g \times f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{5,04 \times 30}{210,95}} = 0,847 \quad (49)$$

Como λ_0 é menor que 1,50:

$$\chi = 0,658^{0,847^2} = 0,741 \quad (50)$$

A força axial resistente N_b , considerando a área bruta da seção é:

$$N_b = \frac{0,741 \times 5,04 \times 30}{1,00} = 112,04 \text{ kN} \quad (51)$$

3.2.3 Área mínima líquida

A força axial de flambagem elástica para esse caso é a mesma calculada anteriormente ($N_e = 210,95 \text{ kN}$). O índice de esbeltez reduzido, considerando a área mínima líquida é:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_{min,liq} \times f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{4,20 \times 30}{210,95}} = 0,773 \quad (52)$$

Como λ_0 é menor que 1,50:

$$\chi = 0,658^{0,773^2} = 0,779 \quad (53)$$

A força axial resistente N_b , considerando a área mínima líquida da seção é:

$$N_b = \frac{0,779 \times 4,20 \times 30}{1,00} = 98,15 \text{ kN} \quad (54)$$

Para as demais seções foram feitos cálculos seguindo o mesmo procedimento descrito anteriormente.

4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A partir das áreas efetivas encontradas para cada seção e seguindo os procedimentos descritos no item 3, foram traçados gráficos relacionando a força axial resistente e o comprimento das colunas. Foram consideradas colunas de até 8 m para melhor visualização do comportamento das curvas. Nas Figuras 15 a 22 são apresentados os gráficos de comparação, separados por tipo de seção.

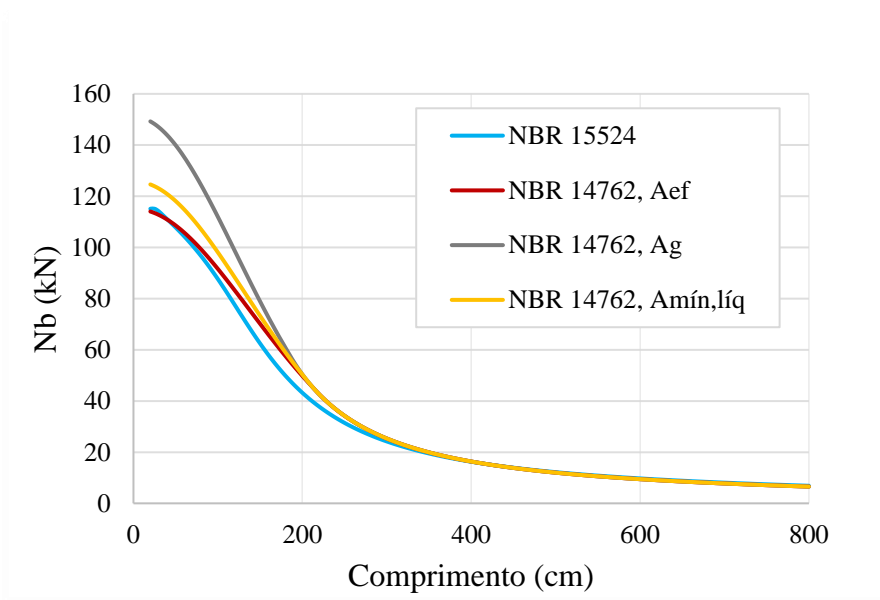


Figura 15 - Curva de comparação N_b versus λ - colunas C_80_2,00

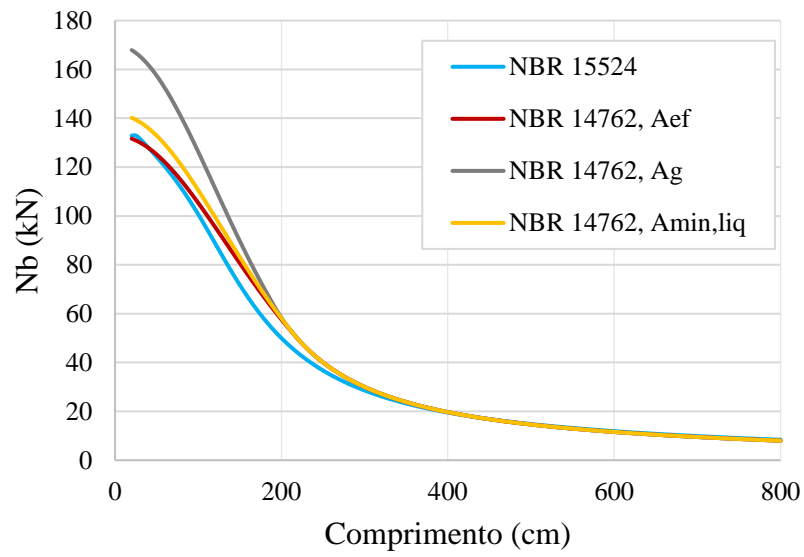


Figura 16 - Curva de comparação N_b versus λ - colunas C_80_2,25

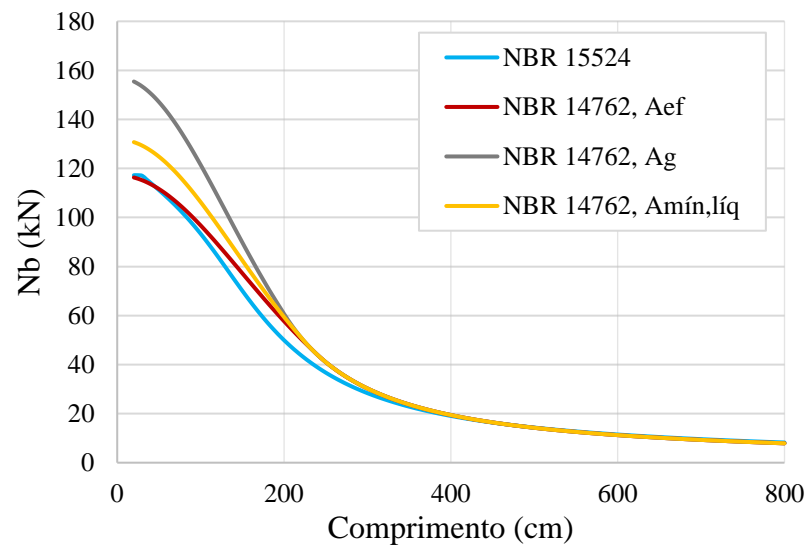


Figura 17 - Curva de comparação N_b versus λ - colunas C_90_2,00

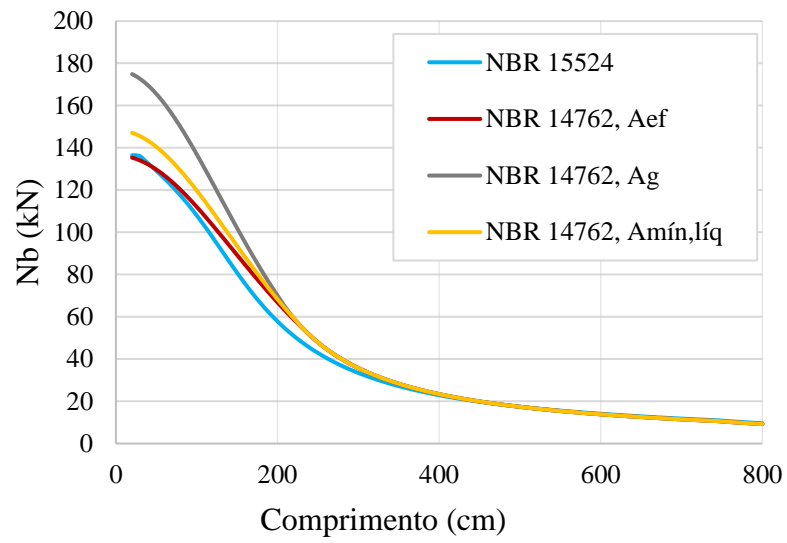


Figura 18 - Curva de comparação N_b versus λ - colunas C_90_2,25

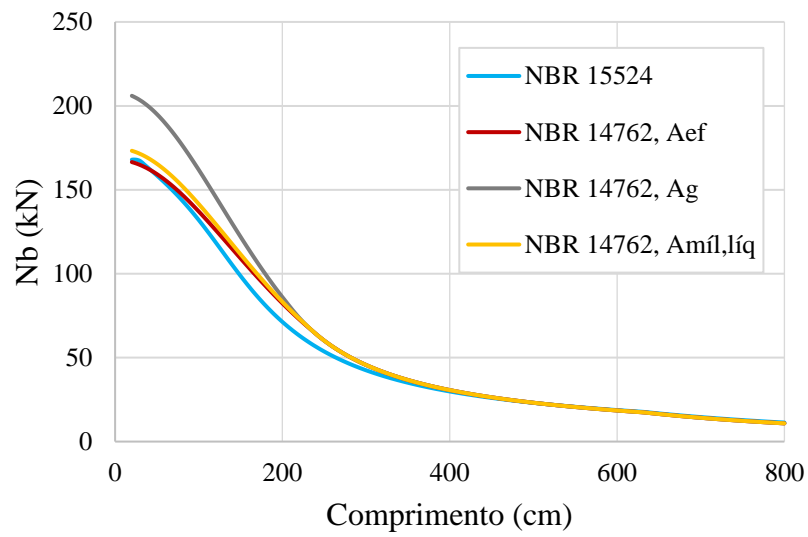


Figura 19 - Curva de comparação N_b versus λ - colunas C_90_2,65

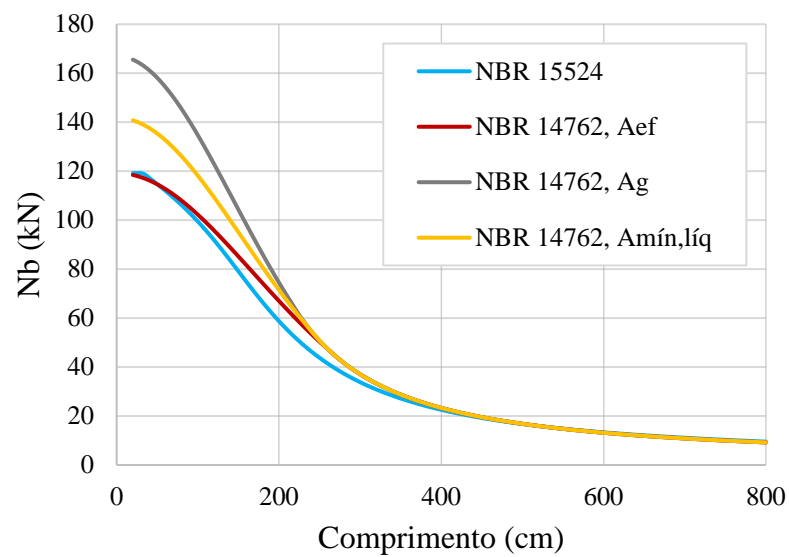


Figura 20 - Curva de comparação N_b versus λ - colunas C_100_2,00

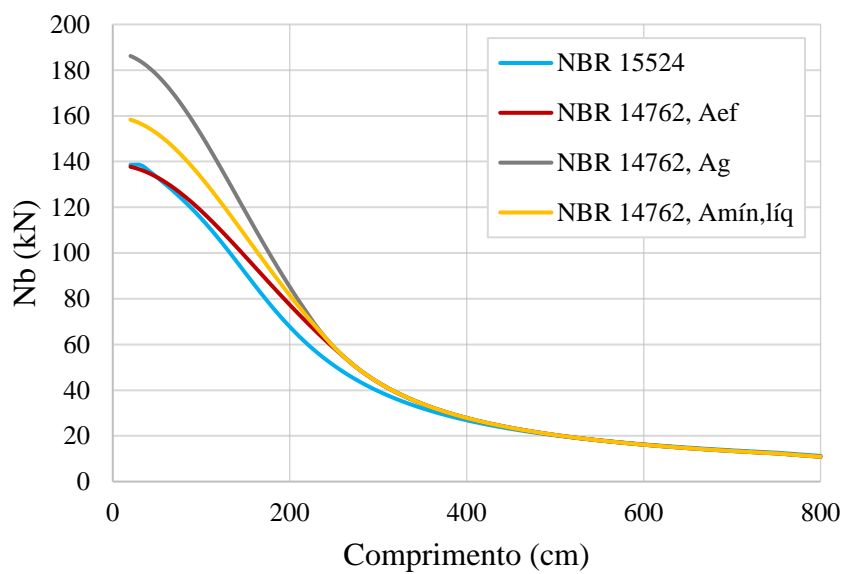


Figura 21 - Curva de comparação N_b versus λ - colunas C_100_2,25

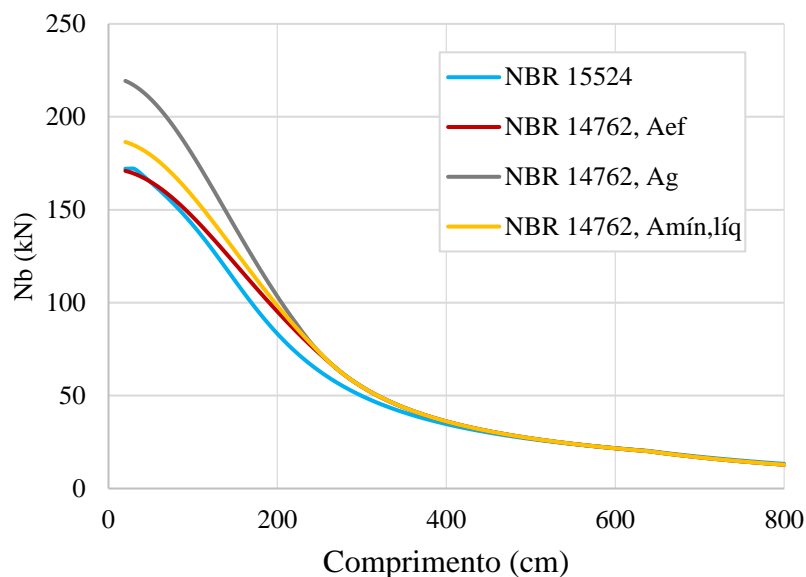


Figura 22 - Curva de comparação N_b versus λ - colunas C_100_2,65

Observa-se que, assim como nas análises numéricas, a resistência da coluna aumenta com o aumento da espessura e da largura da alma. Tal efeito ocorre devido à redução da esbeltez local e aumento da inércia da seção.

Para todos os tipos de seções analisadas, nos comprimentos iniciais ocorre maior dispersão entre as cargas resistentes para as colunas. Percebe-se que o valor da carga resistente considerando a área bruta é maior, em todo os casos, uma vez que não considera a influência das perfurações. Seguindo, tem-se que a resistência obtida para a área mínima líquida é menor que para a área bruta, mas é maior que a resistência considerando a área efetiva. Isso ocorre, pois a determinação da resistência com a área mínima líquida é uma simplificação que apenas desconta a projeção das perfurações na seção transversal, enquanto a resistência com a área efetiva considera também a influência das flambagem local e distorcional.

Foi observado que tanto com as formulações da NBR 14762:2010 e da NBR 15524:2007, a flambagem global crítica ocorre por flexo-torção, como é comum para seções monossimétricas. Para os comprimentos acima de 350 cm, as curvas passam a convergir e tender para flambagem global, com a carga crítica se aproximando da carga crítica de Euler.

Para esses casos, a consideração ou não das perfurações e da flambagem local e distorcional não tem muita influência na determinação da resistência das colunas, em função dos elevados índices de esbeltez globais.

Comparando-se o dimensionamento utilizando a área efetiva pelas duas normas, a máxima diferença encontrada foi de 11,91 kN, para coluna C_100_2,65. A Figura 23 ilustra o comportamento das duas curvas.

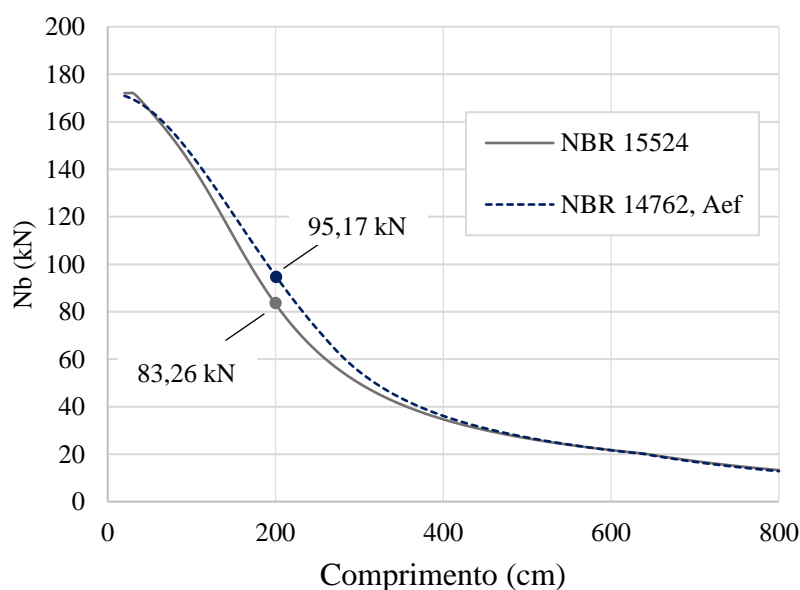


Figura 23 - Dimensionamento pela NBR 15524 e NBR 14762, A_{ef} para coluna C_100_2,65

Observa-se que dentro da faixa de maior utilização das colunas (100 mm a 300 mm) a diferença encontrada é baixa (máximo de 12,5%) sendo o valor mais alto encontrado pela NBR 14762:2010. A proximidade dos valores encontrados e semelhança do comportamento das duas curvas indica que é possível adotar a formulação proposta pela NBR 14762:2010 em conjunto com a NBR 15524:2007 no dimensionamento dessa tipologia de colunas.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo verificar a utilização das prescrições da NBR 14762:2010 conjuntamente à NBR 15524:2007 no dimensionamento de colunas em perfil formado a frio perfuradas e submetidas a compressão axial. Para tanto, o estudo foi dividido em duas etapas: análise computacional e análise teórica.

Na análise computacional, que é uma alternativa às realizações de ensaios experimentais, foi desenvolvido um modelo numérico via ANSYS para a determinação das resistências reais das colunas. Foram avaliadas colunas com comprimento de 300 mm, para a avaliação da influência do trabalho a frio, das perfurações e da flambagem local, e de 1000 mm, para a avaliação da influência da flambagem distorcional. As colunas sofreram também variação de largura de alma (80 mm, 90 mm e 100 mm) e de espessura (2,00 mm, 2,25 mm e 2,65 mm), totalizando 16 modelos.

A análise numérica foi dividida em análise linear, para determinação dos modos de flambagem e das cargas críticas das colunas, e análise numérica, que considera as imperfeições físicas e geométricas das colunas para a obtenção da resistência final.

Em seguida, os resultados encontrados foram aplicados na formulação da NBR 15524:2007 para a obtenção das áreas efetivas das seções. A partir dos resultados das colunas de 300 mm (colunas curtas) foi avaliada a necessidade de ajuste da área considerando a influência da flambagem local, das perfurações e do trabalho a frio. Verificou-se que para todas as seções estudadas houve a necessidade de ajuste da área, definindo então um primeiro valor de área efetiva.

Então, os valores das resistências encontradas para as colunas de 1000 mm e o valor de área efetiva encontrado foram utilizados para verificar a necessidade de um novo ajuste na área efetiva. Novamente, todas as seções analisadas sofreram influência da flambagem distorcional, fazendo necessário um novo ajuste da área efetiva.

Com o valor final de área efetiva, foram dimensionadas colunas com comprimento variando de 20 cm a 800 cm utilizando a NBR 15524:2007 e a NBR 14762:2010. Além disso, as colunas também foram dimensionadas aplicando-se os valores de área bruta (A_g) e área mínima líquida ($A_{mín,líq}$) nas formulações da NBR 14762:2010. Após a comparação dos

resultados, foi observado que o dimensionamento utilizando a área bruta apresenta valores de resistência maiores, pois não considera as perfurações das colunas.

Os valores de resistências mais baixos foram encontrados para o dimensionamento com a área efetiva, tanto utilizando a NBR 14762:2010 quanto pela NBR 15524:2007. Tal fato se deve à consideração das perfurações e da flambagem distorcional no cálculo da área efetiva, que tem como consequência a redução da carga resistente.

As curvas encontradas no dimensionamento pelas duas normas utilizando a área efetiva apresentam um mesmo comportamento e valores próximos de cargas resistentes. A maior diferença encontrada vale 11,91 kN (equivalente a 12,5%) e ocorre para a coluna C_100_2,65_200, sendo maior a resistência dada pela NBR 14762:2010. Assim, conclui-se que é possível inserir a formulação da NBR 14762:2010 na NBR 15524:2007 para o dimensionamento de colunas com a tipologia estudada.

6 REFERÊNCIAS

ABNT NBR 14762, *Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio*, (2010).

ABNT NBR 15524, *Sistemas de armazenagem industrial - Parte 2: Diretrizes para o uso de estruturas tipo porta-paletes seletivos*, (2007).

ANSYS, Ansys program version 12.1. Finite Element Software. Ansys Incorporation. (2012).

Campos, S. R., *Estudo teórico-experimental de sistemas de armazenagem industrial tipo drive-in*. Dissertação de Mestrado: PROPEC - UFOP (2003).

Carvalho, R. M. d., Grigoletti, G. e Barbosa, D. G., *Curso básico de perfis de aço formados a frio*. 3º ed. Porto Alegre: (2014).

Dias, L. A. d. M., *Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem*. 11º ed. São Paulo: Zigurate (1997).

Elias, G. C., *Análise de painéis contraventados de sistemas de armazenagem industrial*. Dissertação de Mestrado. : PROPEC - UFOP (2018).

Faria, V. d. O., *Análise de estabilidade de perfis formados a frio com perfurações*. Dissertação de Mestrado: PROPEC- UFOP (2016).

Godley, M.H. R., *Storage Racking In Design of Cold Formed Steel Members*, Chapter 11, Ed Rhodes . Elsevier Aplied Science, Amsterdam, p. 361-399 (1991).

Neiva, L. H. d. 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: PROPEC - UFOP (2017).

Neta, N. d. A. S. e Neto, F. M. F., *O Uso do Aço na Construção Civil*. Ponta Grossa (2017)

Pastor, M. M., Casafont, M., Bonada, J. e Roure, F., Imperfection amplitudes for nonlinear analysis of open thin-walled steel cross-sections used in rack column uprights. *Thin-Walled Structures*, Volume 79, pp. 28-41 (2014).

Pfeil, W. & Pfeil, M., *Estruturas de aço: dimensionamento prático*. 8º ed. Rio de Janeiro: LTC (2014)

Ribeiro, F. S., *Análise Teórico-Experimental de Colunas Curtas em Perfis Formados a Frio de Seção Transversal tipo Rack*. Dissertação de Mestrado: UFES (2006).

Roure, F., Pastor, M. M., Casafont, M. e Somalo, M. R., Stub column tests for racking design: Experimental testing, FE analysis and E3. *Thin-Walled Structures*, Volume 49, pp. 167-184 (2011).

Sarmanho, A. M. C., *Estudo do Comportamento Pós-crítico de Paredes Esbeltas de Perfis Metálicos*. Dissertação de Mestrado: COPPE/UFRJ (1991).

Silva, E. L. e Silva, V. P. e., *Dimensionamento de perfis formados a frio conforme NBR 14762 e NBR 6355*. Rio de Janeiro: IBS/CBCA (2008).

Souza, F. T., *Análise Teórico-Experimental da Estabilidade de Colunas Perfuradas em Perfis de Aço Formados a Frio em Seções Tipo Rack*. Ouro Preto: Tese de Doutorado, PROPEC - UFOP (2013).

Souza, F. T., *Análise teórico-experimental de sistemas apertados com elementos perfurados em perfis formados a frio - racks*. Dissertação de Mestrado: PROPEC - UFOP (2005).

Starlino, J. A. B., *Análises de colunas em perfis formados a frio com perfurações e carregamento excêntrico*. Relatório de Iniciação científica: PIBITI - UFOP (2018).

Starlino, J. A. B., *Análise numérica da capacidade resistente de montantes de sistema de armazenagem industrial*. Relatório de Iniciação Científica: PIBITI - UFOP (2019).