



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



DIEGO AUGUSTO CUNHA COSTA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS PERFURAÇÕES EM COLUNAS CURTAS EM PERFIS  
FORMADOS A FRIO

OURO PRETO

Abril 2025

Análise da influência das perfurações em colunas curtas em perfis formados a frio

Diego Augusto Cunha Costa

Trabalho Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 11/04/2025

Área de concentração: Estruturas Metálicas

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. D.Sc. Arlene Maria Cunha Sarmanho– UFOP

OURO PRETO

Abril 2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C837a Costa, Diego Augusto Cunha.  
Análise da influência das perfurações em colunas curtas em perfis formados a frio. [manuscrito] / Diego Augusto Cunha Costa. - 2025.  
63 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Arlene Sarmanho.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Colunas - Perfil formado a frio. 2. Colunas - Análise numérica. 3. Construção metálica. I. Sarmanho, Arlene. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624

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



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Diego Augusto Cunha Costa

### Análise da influência das perfurações em colunas curtas em perfis formados a frio

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil

Aprovada em 11 de abril de 2025

#### Membros da banca

Profa. D.Sc. - Arlene Maria Cunha Sarmanho - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Prof. D.Sc. - Gabriel Vieira Nunes - Membro (Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Congonhas)  
Pós Doutorando D.Sc - Matheus Miranda de Oliveira - Membro - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Profa. Arlene Maria Cunha Sarmanho, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/04/2025



Documento assinado eletronicamente por **Arlene Maria Cunha Sarmanho, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/04/2025, às 21:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0900539** e o código CRC **8C4B5CA6**.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Augusto e Mírian, e aos meus irmãos, Pablo e Maria, pelo apoio e amor imensuráveis — sem vocês, nada disso teria sido possível.

À Geiza, pelo amor e companheirismo.

À República Unidos por Acaso, meu eterno lar e minha escola de vida.

À minha orientadora, Arlene, pela paciência na orientação deste trabalho e por me permitir aprender tanto.

A todos do LABEST, pelo suporte e colaboração durante a jornada.

Por fim, agradeço à Escola de Minas e à Universidade Federal de Ouro Preto por me proporcionarem um ensino público superior de qualidade.

*"Hasta la victoria, siempre."*

*Che Guevara.*

## RESUMO

Perfis formados a frio (PFF) são amplamente utilizados na fabricação de estruturas e elementos secundários de edificações na engenharia. Uma aplicação que também utiliza os PFF são os sistemas de armazenagem, que em função das suas especificidades de montagem, alguns dos seus elementos, como as colunas, possuem perfurações ao longo do comprimento. Pesquisas que abordam os efeitos das perfurações no comportamento estrutural e na carga máxima resistida das colunas ainda são relativamente recentes. Além disso, as normas brasileiras que tratam diretamente de perfurações nesses perfis exigem a realização de ensaios experimentais para a determinação da carga máxima e, mesmo a NBR17150 que admite um método teórico, por meio de simulações numéricas feitas por elementos finitos, exige que os modelos numéricos sejam validados experimentalmente. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar como as dimensões e a posição das perfurações influenciam a carga máxima resistida por esses perfis quando submetidos a compressão, bem como propor uma formulação, não empírica, que considere essa influência. Para o desenvolvimento do trabalho, foram feitas simulações numéricas por meio do método dos elementos finitos, utilizando o *software* ANSYS. As análises em colunas curtas consideraram perfurações retangulares ao longo do comprimento da seção transversal tipo rack, avaliando-se as dimensões de largura e altura dos furos, bem como a posição em relação à borda externa da alma do perfil. Essas variações foram analisadas para diferentes larguras da alma do perfil. Verificou-se que a posição da perfuração em relação à borda não apresenta influência bem definida no comportamento estrutural dos perfis, que tiveram como modo de falha o escoamento do aço, antes da flambagem. Também foi possível concluir que, tanto a largura, quanto a altura da perfuração, tem influência na resistência. Ao final, é proposta uma formulação para a avaliação da carga máxima em função das duas dimensões da perfuração.

**Palavras-chaves:** Estruturas metálicas, Perfil formado a frio, Análise numérica.

## ABSTRACT

Cold-formed steel sections (CFSS) are widely used in the construction of structures and secondary building elements in engineering. One application that also employs CFSS is storage systems where, due to specific assembly requirements, some elements, such as columns, feature perforations along their length. Research addressing the effects of perforations on the structural behavior and ultimate load capacity of these columns is still relatively recent. Moreover, Brazilian standards that directly address perforations in these profiles require experimental testing to determine the maximum load capacity. Even NBR17150, which allows a theoretical approach through numerical simulations using finite element methods, mandates that such numerical models be validated experimentally. Therefore, this study aims to evaluate how the dimensions and position of perforations influence the maximum load capacity of these profiles under compression, as well as to propose a non-empirical formulation that accounts for this influence. For this purpose, numerical simulations were conducted using the finite element method with ANSYS software. The analyses focused on short columns with rectangular perforations along the length of rack-type cross-sections, assessing the width and height of the holes, as well as their position relative to the outer edge of the web of the profile. These variations were analyzed for different web widths. It was found that the position of the perforation relative to the edge does not have a well-defined influence on the structural behavior of the profiles, which failed by steel yielding prior to buckling. It was also concluded that both the width and the height of the perforation affect the load-bearing capacity. Finally, a formulation is proposed for evaluating the ultimate load based on the two perforation dimensions.

**Keywords:** Metal structures, Cold-formed steel sections, Numerical analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seções transversais em perfis formados a frio: (a) U; (b) U enrijecido; (c) Caixa; (d) Cartola; (e) I; (f) I Enrijecido; (g) Rack;(h) Zeta. FONTE: SOUZA, SANTOS E SARMANHO (2020). .....	15
Figura 2 - Flambagem global: por torção e por flexo-torção. FONTE: SILVA <i>et al.</i> , 2016. ....	17
Figura 3 - Flambagem local em seções U simples, U enrijecido e tipo rack. FONTE: NEIVA, 2017 .....	18
Figura 4 - Flambagem distorcional em diferentes perfis formados a frio. FONTE: Adaptado da NBR 14762 (ABNT,2010) .....	18
Figura 5 - Sistema de armazenagem industrial. FONTE: ÁGUIA SISTEMAS, 2025. ....	19
Figura 6 - Sistema de armazenagem industrial. FONTE: ÁGUIA SISTEMAS, 2025 .....	20
Figura 7 - Seção tipo rack ou garrafa. FONTE: FARIA,2016 .....	21
Figura 8 - Elementos de seção transversal tipo rack. Fonte: ELIAS,2018.....	22
Figura 9 - Elemento SHELL 181. Fonte (ANSYS INC. SHELL181, 2017) .....	29
Figura 10 - Nó do centro geométrico da seção .....	30
Figura 11 - Ajuste da malha nas perfurações .....	30
Figura 12 - Detalhamento das perfurações estudadas .....	32
Figura 13 - Dimensões da seção transversal, 80 mm .....	33
Figura 14 - Dimensões da seção transversal, 90 mm .....	33
Figura 15 - Dimensões da seção transversal, 100 mm .....	33
Figura 16 - perfuração com $d=2$ mm, ou seja, posicionada a 2 mm da borda externa e uma perfuração com $d'=0$ , quando o furo atinge o enrijecedor da alma.....	35
Figura 17 - Diagrama tensão x deformação. Adaptado de: Neiva, 2017.....	38

Figura 18 - Esquema geral de determinação de $A_{\min,liq}$ para o modelo CC80-6-20.....	41
Figura 19 - CC80-20-20 .....	43
Figura 20 - CC90-2-18 .....	43
Figura 21 - CC100-20-8 .....	44
Figura 22 – CC80, variação da carga máxima em função da posição do furo, para um furo de largura constante (valores em mm) .....	45
Figura 23 – CC80, variação da carga máxima em função da posição do furo, para um furo de altura constante (valores em mm).....	45
Figura 24 -CC90, variação da carga máxima em função da posição do furo, para um furo de largura constante (valores em mm) .....	46
Figura 25 - CC90, variação da carga máxima em função da posição do furo, para um furo de altura constante (valores em mm).....	46
Figura 26 - CC100, variação da carga máxima em função da posição do furo, para um furo de altura constante (valores em mm).....	47
Figura 27 - CC100, variação da carga máxima em função da posição do furo, para um furo de largura constante (valores em mm) .....	47
Figura 28 – Carga máxima em função da altura da perfuração, para largura constante .....	49
Figura 29- Carga máxima em função da largura da perfuração, para altura constante .....	50
Figura 30 - Comparativo entre as variações da altura e largura da perfurações, CC80 .....	51
Figura 31 - Comparativo entre as variações da altura e largura das perfurações, CC90.....	51
Figura 32 - Comparativo entre as variações da altura e largura das perfurações, CC100.....	52
Figura 33 - Representação tridimensional da relação entre a área alvo, a área líquida mínima e a altura das perfurações .....	53

Figura 34 - Relação entre a carga máxima numérica ( $P_{num}$ ) e a carga máxima prevista ( $P_{prop}$ ) para diferentes dimensões de perfuração..... 54

Figura 35 - Relação entre a carga máxima numérica ( $P_{num}$ ) e a carga máxima prevista ( $P_{prop}$ ) para diferentes dimensões de perfuração..... 55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do aço utilizado .....	31
Tabela 2 - Estudo da posição das perfurações .....	34
Tabela 3 - Estudo das dimensões das perfurações .....	35
Tabela 4 - Nomenclatura adotada .....	36
Tabela 5 - Definição do comprimento das colunas .....	36
Tabela 6 - Área bruta de cada seção .....	40
Tabela 7 - Cargas críticas obtidas pela análise linear .....	42
Tabela 8 - Resultados obtidos com variação da posição da perfuração, para diferentes configurações de furo, nos perfis com largura de alma igual a 100 mm.....	48

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Modos de instabilidade dos perfis formados a frio.....	16
1.1.1	Flambagem global.....	16
1.1.2	Flambagem local.....	17
1.1.3	Flambagem distorcional.....	18
1.1.4	Escoamento.....	18
1.2	Sistemas de armazenagem.....	19
1.3	Objetivos.....	22
1.4	Justificativa.....	22
1.5	Metodologia.....	23
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	24
3	ANÁLISE NUMÉRICA.....	27
3.1	Modelo numérico.....	28
3.1.1	Elemento.....	28
3.1.2	Condições de contorno.....	29
3.1.3	Propriedades do material.....	31
3.2	Geometria das colunas.....	31
3.3	Análise linear.....	37
3.4	Análise não linear.....	38
4	ANÁLISE TEÓRICA.....	39
4.1	Dimensionamento segundo a NBR 14762.....	39
4.2	Dimensionamento segundo a NBR 17150.....	39
4.3	Análise da carga máxima.....	40
5	ANÁLISE DE RESULTADOS e PROPOSIÇÃO TEÓRICA.....	41
5.1	Escoamento do aço.....	42

5.2	Influência da posição da perfuração .....	44
5.3	Variação das dimensões da perfuração .....	49
5.4	Proposta de formulação .....	52
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	55
6.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	57

## 1 INTRODUÇÃO

Os perfis formados a frio (PFF) são elementos estruturais obtidos a partir do dobramento ou perfilagem de chapas de aço em temperatura ambiente. De acordo com a NBR 14762 (ABNT, 2010), a fim de garantir a trabalhabilidade necessária, as chapas devem ser finas, com espessura de até 8 mm.

Os perfis formados a frio apresentam algumas vantagens como produção simples, facilidade de montagem e reduzido peso estrutural, especialmente quando comparados aos perfis laminados e soldados. Devido a essa simplicidade de produção dos perfis, surge grande variedade de seções transversais e conseqüentemente grande aplicabilidade em diferentes tipos de construção. É apresentado na Figura 1, algumas seções transversais de PFF comumente empregadas no Brasil. Dentre as seções apresentadas os seguintes perfis são padronizados pela norma ABNT NBR 6355 (ABNT, 2012): Cantoneira de abas iguais (L), U simples, U enrijecido, Z enrijecido a 90 graus (Z90), Z enrijecido a 45 graus (Z45) e Cartola (Cr).

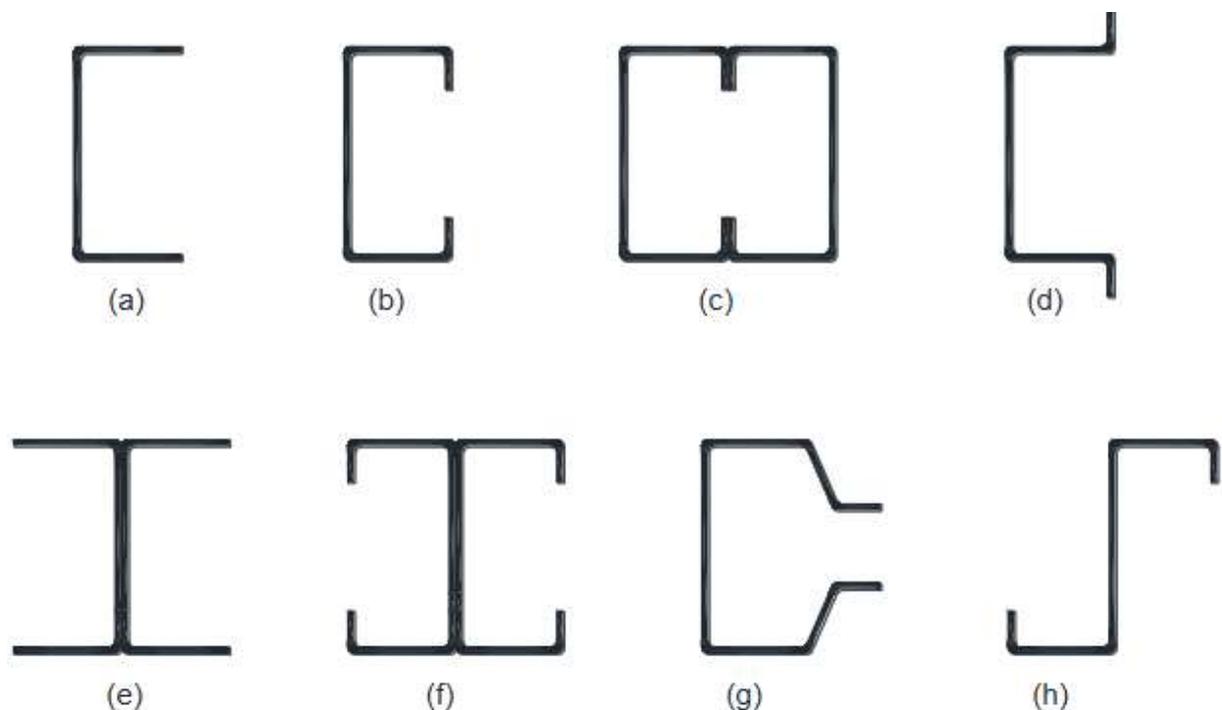


Figura 1 - Seções transversais em perfis formados a frio: (a) U; (b) U enrijecido; (c) Caixa; (d) Cartola; (e) I; (f) I Enrijecido; (g) Rack; (h) Zeta. FONTE: SOUZA, SANTOS E SARMANHO (2020).

## 1.1 MODOS DE INSTABILIDADE DOS PERFIS FORMADOS A FRIO

Perfis metálicos em PFF, no geral, são compostas por placas esbeltas e, por isso, estão suscetíveis a problemas de instabilidade de seção como a flambagem local. Especificamente quando analisados os sistemas de armazenagem industrial, em sua maioria compostos por perfis formados a frio, essa susceptibilidade é ainda maior, devido a esbeltez dos elementos de barra e ao modo distorcional associado a seção aberta com a tipo rack.

A seguir, é apresentada uma visão geral dos modos de instabilidade dos perfis submetidos à compressão e a importância da análise de estabilidade estrutural.

### 1.1.1 Flambagem global

A flambagem global refere-se à perda de estabilidade de elementos comprimidos, quando ocorrem deslocamentos laterais ao longo do seu comprimento. A flambagem global (Figura 2) pode se manifestar de três maneiras distintas:

- Flambagem por flexão: Ocorre em torno de um dos eixos da seção transversal, geralmente o eixo de menor inércia, sem alterar a forma da seção.
- Flambagem por torção: Envolve a rotação do perfil em torno do seu eixo longitudinal.
- Flambagem por flexo-torção: Caracteriza-se pela combinação de translação lateral e rotação simultânea, resultando em uma interação entre os modos de flexão e torção.

A análise da flambagem global é complexa, uma vez que os modos podem ocorrer de forma isolada e também simultaneamente.

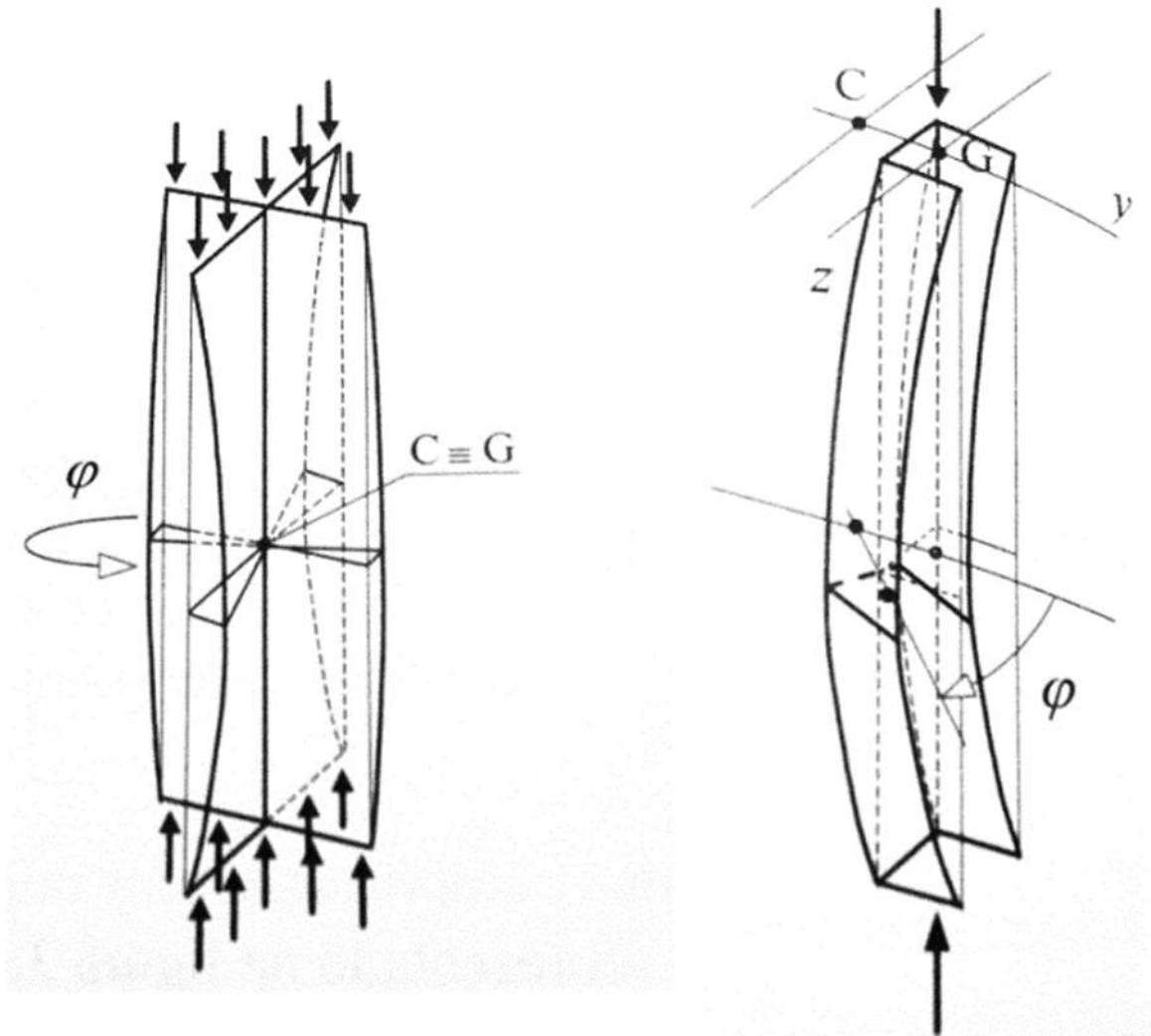


Figura 2 - Flambagem global: por torção e por flexo-torção. FONTE: SILVA *et al.*, 2016.

### 1.1.2 Flambagem local

A flambagem local é um fenômeno caracterizado pelo enrugamento ou ondulação de um ou mais elementos de um perfil, sem que haja deslocamento das arestas da seção transversal. Esse tipo de instabilidade resulta em deslocamentos laterais senoidais, enquanto os ângulos entre os elementos do perfil permanecem inalterados (SALES, 2017). A Figura 3 exemplifica esse comportamento.

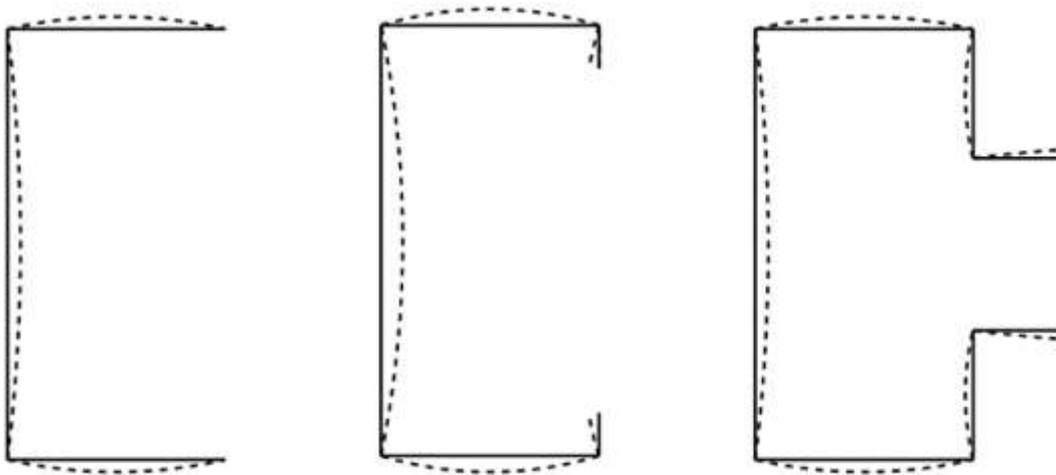


Figura 3 - Flambagem local em seções U simples, U enrijecido e tipo rack. FONTE: NEIVA, 2017

### 1.1.3 Flambagem distorcional

No caso da flambagem distorcional, se dá pela perda de estabilidade do perfil submetido a compressão, de modo que há translação de pelo menos uma de suas arestas, ocorrendo fechamento ou abertura delas. Conforme pode-se observar na Figura 4.

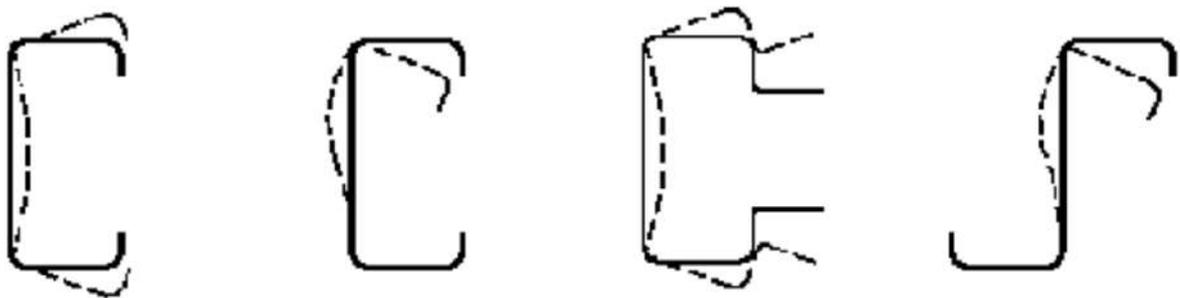


Figura 4 - Flambagem distorcional em diferentes perfis formados a frio. FONTE: Adaptado da NBR 14762 (ABNT,2010)

### 1.1.4 Instabilidade por escoamento

Neste trabalho é avaliado o comportamento de colunas curtas. Esse modelo foi escolhido de maneira a priorizar o escoamento do aço como modo de instabilidade do perfil. Esse tipo de colapso não está relacionado a instabilidades geométricas, mas sim ao comportamento plástico do material, ocorrendo quando as tensões atuantes atingem o limite de escoamento do aço.

Nestes casos, a falha ocorre por plastificação generalizada da seção.

## 1.2 SISTEMAS DE ARMAZENAGEM

Os sistemas de armazenagem industrial, ou racks, são perfis formados a frio, projetados para armazenar, estocar e distribuir produtos manufaturados em diversos ambientes, como fábricas, supermercados, atacados, entre outros. Esses sistemas variam amplamente em escala e complexidade, desde simples estantes manualmente carregadas até imponentes estruturas automatizadas de mais de 30 metros de altura. Construídos com perfis de seção específicos para facilitar a montagem, os racks possuem furos ao longo de seus pilares para permitir o rápido encaixe das ligações entre vigas e pilares.



Figura 5 - Sistema de armazenagem industrial. FONTE: ÁGUIA SISTEMAS, 2025.



Figura 6 - Sistema de armazenagem industrial. FONTE: ÁGUIA SISTEMAS, 2025

No entanto, esses perfis também enfrentam desafios específicos relacionados à estabilidade estrutural. Devido a sua fabricação feita a partir de chapas de pequena espessura e, por serem estruturas esbeltas, estão sujeitos a problemas de instabilidade, como a flambagem local, distorcional e global, quando submetidos a compressão.

Além do maior potencial de ocorrência destes modos de flambagem, os perfis formados a frio, no geral, ainda podem apresentar a interação dos modos. Essa interação acontece quando as

cargas críticas correspondentes a cada um coincidem ou possuem valores suficientemente próximos para ativar essa interação (MATSUBARA, 2018, p. 2).

A seção mais utilizada nesses sistemas de armazenagem industrial é a tipo rack ou garrafa. Trata-se de uma seção aberta, composta por diferentes elementos estruturais, como alma, mesas (ou flanges), enrijecedores e flanges de ligação, apresentados na Figura 7.

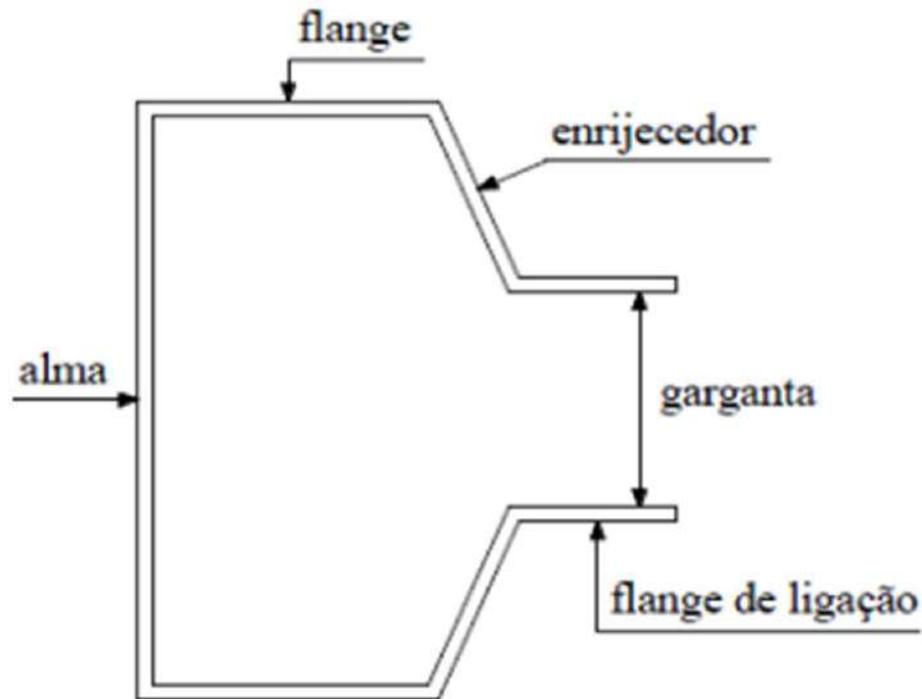


Figura 7 - Seção tipo rack ou garrafa. FONTE: FARIA,2016

Além desses elementos, a seção rack também pode apresentar enrijecedores na alma e nos flanges de ligação, como apresentado na Figura 8.

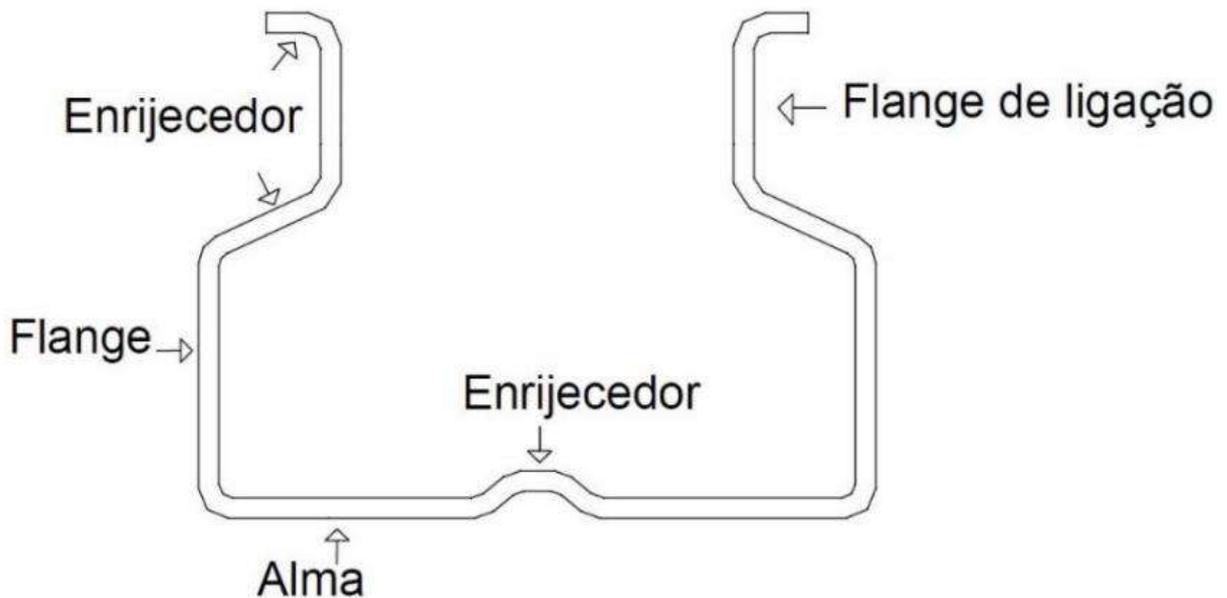


Figura 8 - Elementos de seção transversal tipo rack. Fonte: ELIAS,2018.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar por meio de análise numérica a influência da variação da posição e das dimensões das perfurações na carga máxima de colunas curtas de perfis formados a frio, com seção transversal do tipo rack, submetidos a carga centrada.

#### Objetivos específicos

- Avaliar via método dos elementos finitos a influência da variação da altura e largura das perfurações na força axial de compressão resistente dos racks;
- Avaliar via método dos elementos finitos a influência da posição das perfurações, em relação a extremidade, ao longo da seção;
- Propor uma equação que consiga dimensionar a influência desses parâmetros

### 1.4 JUSTIFICATIVA

Os perfis formados a frio vêm sendo cada vez mais utilizados, principalmente por sua economia e versatilidade. Dentre suas diversas aplicações, destaca-se o uso na construção de sistemas de armazenagem, conhecidos como racks. Nesses sistemas, as colunas são fabricadas em PFF e apresentam seções adequadas ao uso, além de perfurações distribuídas ao longo de

seu comprimento para facilitar o encaixe de elementos e conseqüentemente a montagem. Entretanto, ao se analisarem as normas atuais para a determinação da carga máxima desses perfis, nota-se a necessidade de considerar a influência das perfurações nas formulações — levando em conta tanto suas dimensões quanto sua posição — e utilizando métodos não empíricos. Atualmente, no Brasil, existem duas normas que abordam perfis formados a frio e o seu uso em sistemas de armazenagem: a NBR 14762– Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio (ABNT, 2010); e a NBR 17150:2024 sistemas de armazenagem — estrutura de armazenagem estática tipo porta-paletes - Parte 1: requisitos para projeto estrutural; Parte 2: tolerâncias, deformações e folgas para projetos (ABNT, 2024).

A NBR 14762:2010 não considera a influência das perfurações na resistência das colunas. Já a NBR 17150:2024, embora aborde as perfurações, possui um caráter empírico, de modo que é necessária a realização de ensaios experimentais para a determinação da carga máxima.

Dessa forma, o presente trabalho se propõe a contribuir com as linhas de pesquisa que tratam da influência dos parâmetros relacionados às perfurações nesses sistemas, visando obter um aperfeiçoamento desses estudos.

## 1.5 METODOLOGIA

O estudo foi realizado por meio de análise numérica desenvolvida com elementos finitos, utilizando o *software* ANSYS (ANSYS, 2018). Para estudo das dimensões da perfuração, foi desenvolvido um modelo numérico utilizando a linguagem APDL (*Ansys Parametric Design Language*) para análise de um comprimento de coluna definido a partir de proporções geométricas, onde a foram feitas variações de largura da alma da seção (80 mm, 90mm e 100mm).

Foi realizada análise numérica linear a fim de obter os modos de flambagem e cargas críticas associadas. Posteriormente, os resultados obtidos na análise linear são utilizados para introdução das não-linearidades físicas (plasticidade do aço) e geométricas (imperfeições) no modelo, tornando possível a obtenção das cargas máximas.

Em uma primeira etapa, buscou-se avaliar a influência, na carga máxima, da posição da perfuração. Para isso, foram analisadas seções com diferentes proporções de perfuração,

variando a posição do furo em relação à borda externa da seção. Nessa etapa, considerando as três variações de largura da alma, foram testados, no total, 172 modelos.

Na segunda etapa, o trabalho buscou avaliar a influência das dimensões das perfurações na carga máxima das colunas comprimidas. Para isso, a altura da perfuração foi mantida fixa, enquanto a largura foi variada. Em seguida, o processo foi invertido: a largura foi mantida fixa, e a altura foi variada. Foram avaliadas, para as três larguras da alma, 45 modelos, resultando em 135 seções. O estudo considerou todas as variações possíveis de altura e largura das perfurações dentro dos intervalos estabelecidos.

No total, considerando as variações de posição e dimensão dos furos, o presente trabalho analisou 307 modelos. Por fim, utilizou-se um *software* matemático para analisar os resultados e ajustar uma equação representativa.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Até o presente momento, a consideração de perfurações nas análises da carga máxima destes elementos não foi contemplada na NBR 14762 (ABNT, 2010), norma de dimensionamento de perfis formados a frio. Apesar de ter sido incluída na NBR 17150 (ABNT, 2024), a abordagem da norma é empírica, sendo necessário ensaios experimentais, por exemplo, para avaliar a influência dos furos. Dada sua ampla utilização industrial, vista anteriormente, o sistema de racks demanda um maior aprofundamento dos sistemas de estabilidade e comportamento de seus elementos.

Sarmanho (2004) investiga o comportamento estrutural de colunas perfuradas utilizadas em sistemas de armazenagem industrial perfuradas. É ressaltada a dificuldade da previsão do comportamento dessas estruturas, principalmente dada a existência de perfurações, o que acaba sendo feito por meio de resultados de ensaios. O estudo então propõe o uso da simulação por elementos finitos, via *software* ANSYS, para simular o teste da coluna curta. A pesquisa comparou os resultados das simulações com prescrições normativas e ensaios experimentais, destacando a influência das propriedades elasto-plásticas do aço e das perfurações no comportamento estrutural. A partir da análise dos resultados foi possível atestar que a simulação numérica é eficiente para prever a resistência dessas colunas.

Sarawit e Peköz (2003) utilizaram o método dos elementos finitos, através do programa computacional ABAQUS, para realizar simulações numéricas do ensaio de coluna curta. A partir disso, os resultados obtidos foram comparados com uma nova formulação proposta para determinação da área efetiva e do módulo elástico da seção efetiva, em colunas perfuradas. A comparação dos resultados permitiu atestar que os valores obtidos, utilizando a nova formulação, se aproximaram mais dos valores numericamente obtidos que aqueles obtidos utilizando o processo indicado pelo “*Rack Manufacturers Institute*”, RMI (1997).

Ribeiro (2006) realizou análises experimentais em colunas curtas com seção tipo rack de diferentes espessuras com e sem furos, de modo a avaliar o impacto da perfuração na capacidade de carga e nas deformações que os perfis sofrem durante os ensaios. O estudo buscou analisar as prescrições propostas pelo RMI (1997), empregado nos Estados Unidos, pela NBR 14762, norma brasileira, e a formulação proposta por Sarawit e Peköz (2003). Os resultados experimentais obtidos das colunas com perfuração foram comparados com os procedimentos utilizados no RMI e os propostos por Sarawit e Peköz (2003). Já as colunas sem perfurações foram comparadas com as prescrições das normas americana e brasileira de dimensionamento de perfis a frio. Os resultados foram utilizados para propor uma formulação que emprega o método do cálculo da área efetiva, utilizado pelo RMI, para as recomendações da NBR 14762.

Moen e Schafer (2009) conduziram uma pesquisa com o objetivo de expandir a aplicação do Método da Resistência Direta para perfis formados a frio que apresentam perfurações. Os estudos mostraram que a carga crítica de flambagem elástica pode ser afetada, aumentando ou diminuindo, pela presença de furos, assim como pela geometria, tamanho e localização desses furos. Ao final do estudo, os autores formularam equações para o Método da Resistência Direta que consideram a influência das perfurações.

Yao e Rasmussen (2012) estudaram os efeitos das perfurações em perfis formados a frio sujeitos à flambagem local. O estudo conduzido analisou o comprimento, a largura e espaçamento entre as perfurações. O estudo conclui que, a presença de perfurações alterou significativamente a distribuição de tensões e desencadeou modos distintos de colapso. Além disso, o comprimento do furo teve menor influência que a largura. Já o espaçamento entre furos teve menos impacto que largura e comprimento, não apresentando uma relação direta com a carga última.

Souza (2013) analisou, por meio da Teoria Generalizada de Vigas (GBT) e do Método dos Elementos Finitos, a influência das perfurações na ocorrência dos modos de flambagem local,

distorcional e global em perfis do tipo rack, de maneira isolada ou em interação, por meio de um estudo teórico-experimental. O estudo passou pela definição numérica de uma série de protótipos sujeitos aos modos de flambagem, esses protótipos foram posteriormente ensaiados, e os resultados experimentais utilizados para a validação do procedimento via elementos finitos de análise não linear dos perfis formados a frio. Os resultados indicaram uma boa representatividade dos Método dos Elementos finitos, com dispersão máxima de 5,9%.

Faria (2016) conduziu um estudo numérico e experimental sobre perfis formados a frio com seção do tipo rack, contendo perfurações ao longo de seu comprimento. O objetivo foi avaliar os modos de instabilidade local e distorcional, considerando o impacto dos furos no comportamento estrutural dos perfis. Para a análise numérica, foi utilizado o Método dos Elementos Finitos por meio do *software* ANSYS, calibrado com a Teoria Generalizada de Vigas, utilizando o *software* GBTul. O estudo experimental incluiu 18 ensaios com carregamento axial sem excentricidade. A comparação entre os resultados numéricos e experimentais demonstrou uma boa concordância, validando o modelo numérico proposto.

Sales (2017) avaliou a viabilidade de adaptar o método da resistência direta, previsto na NBR 14762, para a determinação da força axial de compressão resistente sob o aspecto da flambagem distorcional de perfis formados a frio com perfurações. Para isso, foi realizado um estudo numérico por meio do método dos elementos finitos no *software* ANSYS, analisando colunas sem perfurações submetidas à compressão centrada. Esse modelo foi comparado ao Método da Resistência Direta e validado. Em seguida, o modelo numérico validado foi utilizado para avaliar as adaptações do Método da Resistência Direta em colunas com perfurações. Por fim, o estudo mostrou viabilidade de adaptação do método para o dimensionamento de perfis com perfurações.

Neiva (2017) avaliou os modos de instabilidade e as cargas máximas dos elementos em seções PFF com perfurações ao longo do comprimento. Foram avaliadas as influências da inclinação e das dimensões das perfurações, além de da excentricidade de carga e da variação da largura da alma, nas cargas máximas e nos modos de flambagem. O estudo foi realizado utilizando o Método dos Elementos Finitos, com a utilização do programa ANSYS, com um total de 160 seções avaliadas. Os resultados obtidos permitiram propor uma formulação para avaliação da capacidade resistente dos modos de flambagem local e distorcional, utilizando o Método da Resistência Direta.

Chen et al. (2020) desenvolveram modelos numéricos eficazes para analisar perfis com perfurações de borda enrijecidas, submetidos à compressão. Utilizando o método de elementos finitos, investigaram 348 modelos numéricos, avaliando a esbeltez das colunas, o tamanho, a posição e o espaçamento dos furos. Os resultados indicaram que a resistência dos furos reforçados nas bordas foi ligeiramente aumentada, enquanto o espaçamento entre furos e o diâmetro do furo podem reduzir a resistência axial. Os efeitos da localização do furo na capacidade axial dessas seções foram considerados insignificantes.

Pinto (2021), utilizou o Método dos Elementos Finitos, via ANSYS, e a Teoria Generalizada de Vigas, via GBTul, para obter os valores das forças axiais resistentes de compressão, associadas ao modo de flambagem distorcional em perfis formados à frio, perfurados. O estudo realizou variações nas larguras, comprimentos e posição de furos retangulares nas almas dos perfis, a fim de avaliar como o comportamento estrutural é influenciado pelas dimensões e posição das perfurações. Os resultados das análises lineares e não lineares indicaram que a presença de perfurações provoca uma redução tanto nas cargas críticas quanto na capacidade resistente associado ao modo distorcional. O estudo observou que não houve uma boa correlação dos resultados obtidos pelo *software* Ansys e o método proposto por Sales (2017), ao contrário do método proposto por Moen e Schaffer (2009), que alcançou valores de dispersão média satisfatórios. Mais ainda, a análise conclui que perfis com a mesma área de furos, porém que possuem a largura menor que o comprimento, apresentam, em média, valores superiores de força resistente.

Gomes (2023), analisou, via elementos finitos, colunas de perfis formados a frio do tipo rack com duas linhas de perfurações, em que pode ocorrer um modo de flambagem localizado entre as perfurações, além da flambagem local na alma das seções. Foi feita análise flambagem elástica e a análise não linear física e geométrica. O estudo demonstrou que perfurações não enrijecidas aumentam a esbeltez e reduzem a resistência das colunas. Como proposição, adota-se enrijecedores nas bordas das perfurações que aproximam o comportamento dos perfis perfurados à aqueles não perfurados.

### 3 ANÁLISE NUMÉRICA

Para a realização da análise numérica, foi empregado o Método dos Elementos Finitos, que consiste na subdivisão de uma estrutura contínua em pequenos elementos, formando uma

malha de elementos finitos. Dentre os diversos *softwares* comerciais que utilizam esse método, optou-se pelo ANSYS neste estudo.

A implementação da análise foi conduzida por meio da linguagem de programação do ANSYS, a APDL (*Ansys Parametric Design Language*), que permite uma abordagem paramétrica, facilitando a variação geométrica das colunas. No presente trabalho, foram analisados modelos com diferentes larguras da alma, especificamente 80 mm, 90 mm e 100 mm, de maneira que a espessura das seções não foi variada, sendo mantida fixa em 2 mm. O estudo considerou apenas furos de formato retangular, incluindo quadrados, uma vez que pesquisas anteriores Yao e Rasmussen (2012; 2016) demonstraram que a forma do furo não tem influência significativa na resistência última das colunas. Entre os diferentes formatos de furos, os retangulares geralmente resultam na menor carga máxima, servindo assim como um limite inferior para a resistência estrutural, além de permitirem um melhor ajuste da malha. Além disso, Neiva (2017) concluiu que, as angulações dos furos, não tem influência significativa na carga máximas das colunas estudadas.

### **3.1 MODELO NUMÉRICO**

#### **3.1.1 Elemento**

Para a modelagem das colunas no ANSYS, foi utilizado o elemento de casca SHELL181, adequado para análises plásticas. Sua eficácia demonstrada em estudos anteriores (SOUZA, 2013; SILVA, 2011). Esse elemento finito possui quatro nós, com seis graus de liberdade em cada um, permitindo translações nas direções X, Y e Z e rotações em torno desses mesmos eixos.

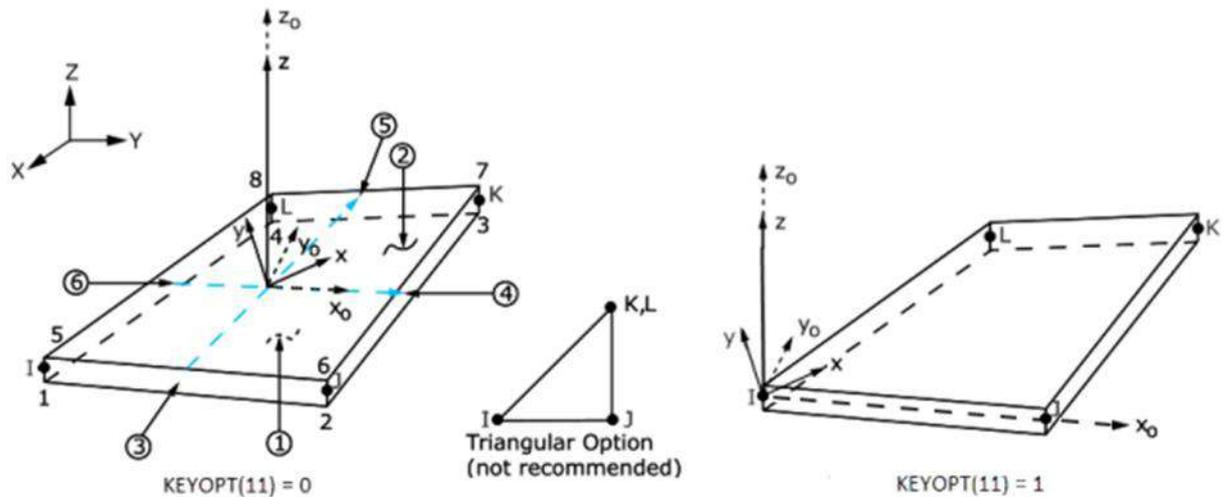


Figura 9 - Elemento SHELL 181. Fonte (ANSYS INC. SHELL181, 2017)

### 3.1.2 Condições de contorno

As condições de contorno foram aplicadas de modo a simular uma coluna com uma extremidade engastada e a outra sujeita à aplicação de deslocamento. Na extremidade engastada, todas as translações e rotações foram restringidas, impedindo qualquer movimento ou rotação. Já na extremidade oposta, para garantir uma compressão uniforme e restringir o empenamento, as translações dos nós foram acopladas a um nó mestre localizado no centro geométrico da seção transversal. Essa configuração é ilustrada na Figura 10:

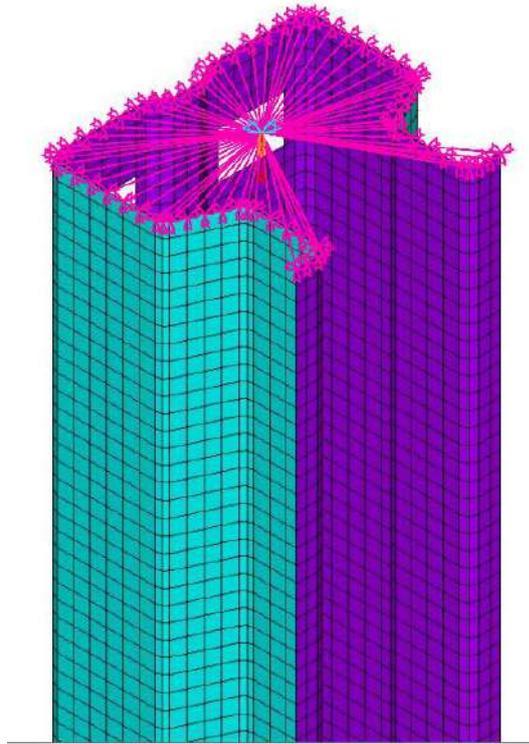


Figura 10 - Nó do centro geométrico da seção

Além disso, para aliar precisão de resultados, baixo custo computacional e uniformidade da malha foram adotados quadrangulares com lado igual 5 mm. A utilização dos elementos em forma quadrada otimizou a distribuição da malha na região dos furos.

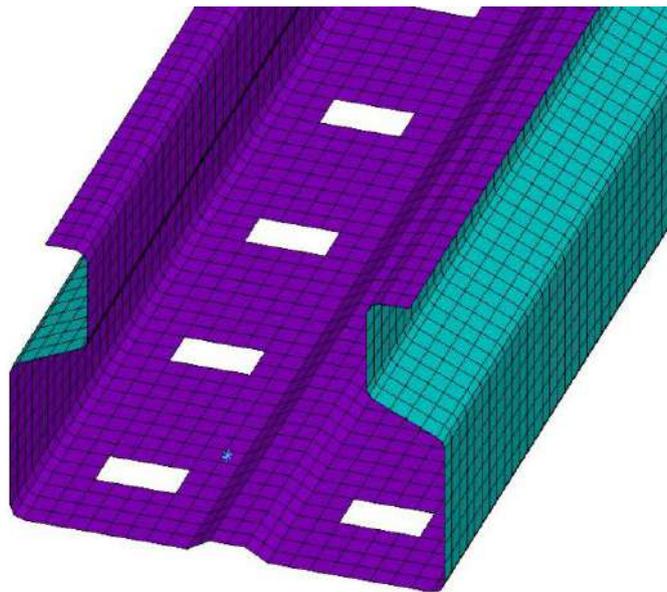


Figura 11 - Ajuste da malha nas perfurações

### 3.1.3 Propriedades do material

As propriedades do aço utilizado nos modelos adotados, estão resumidas na Tabela 1:

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do aço utilizado

<b>Tensão de escoamento (<math>f_y</math>)</b>	350 Mpa
<b>Tensão de ruptura (<math>f_u</math>)</b>	450 Mpa
<b>Módulo de Elasticidade (E)</b>	200 GPa
<b>Coefficiente de Poisson (<math>\nu</math>)</b>	0,3

## 3.2 GEOMETRIA DAS COLUNAS

Neste estudo, adotou-se uma coluna de perfil formado a frio com seção do tipo rack. Essa coluna possui perfurações verticais distribuídas ao longo de seu comprimento. Em relação as perfurações, é mostrado na Figura 12 um esquema de como eles foram utilizadas.

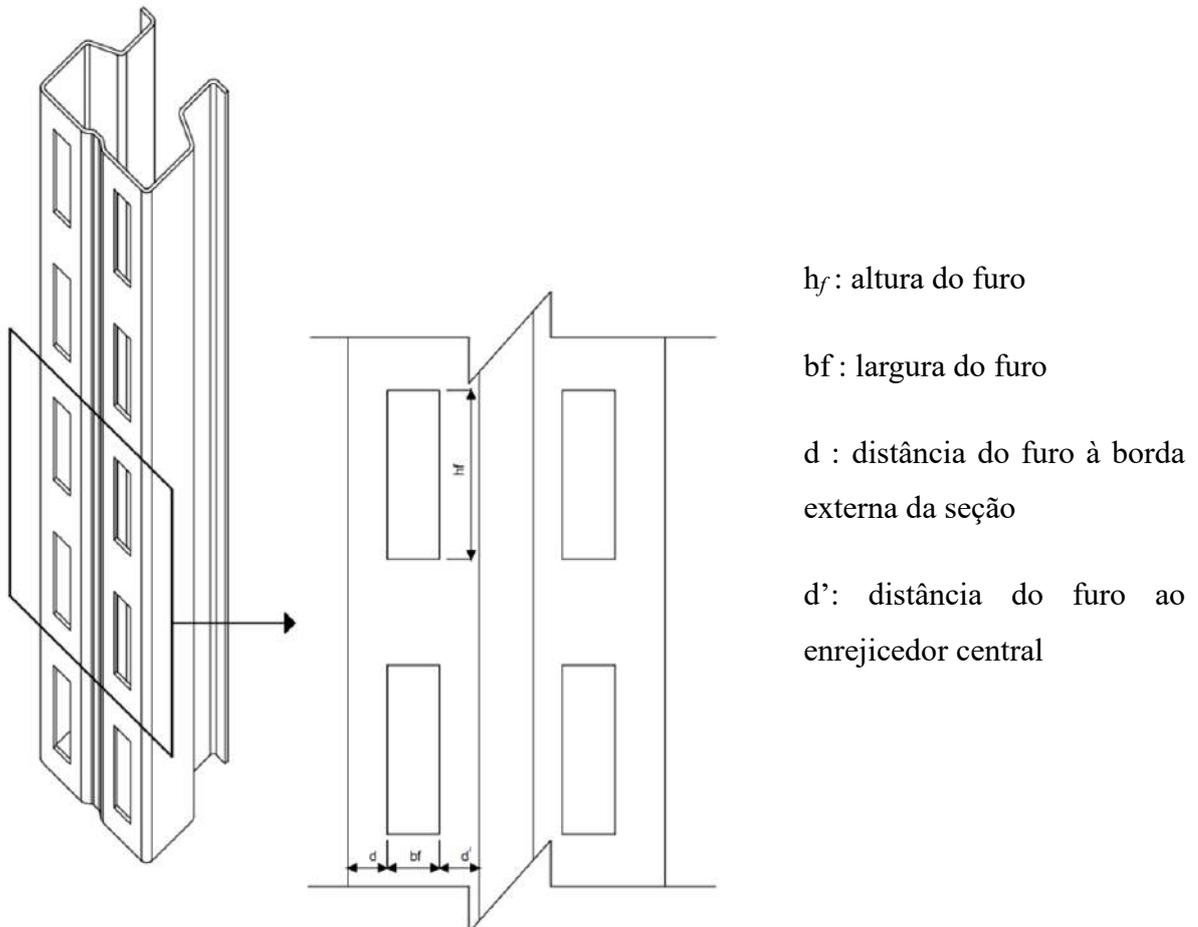


Figura 12 - Detalhamento das perfurações estudadas

Foram consideradas três variações na largura da alma, sendo 80 mm, 90 mm e 100 mm. Além disso espessura  $t$  dos perfis foi mantida fixa em todas as variações utilizadas, sendo  $t = 2$  mm. São apresentadas, nas figuras a seguir, as seções transversais correspondentes a cada uma dessas variações.

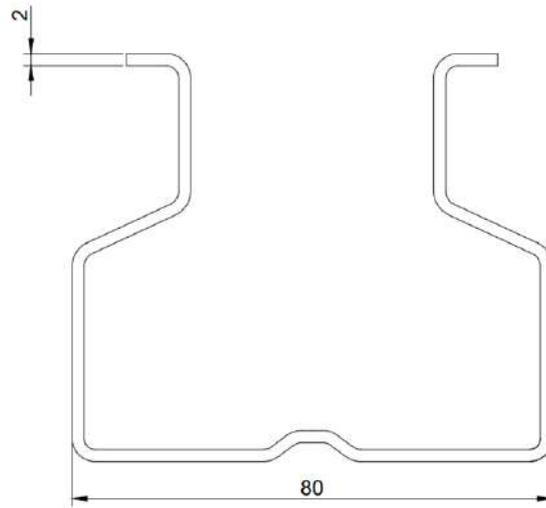


Figura 13 - Dimensões da seção transversal, 80 mm

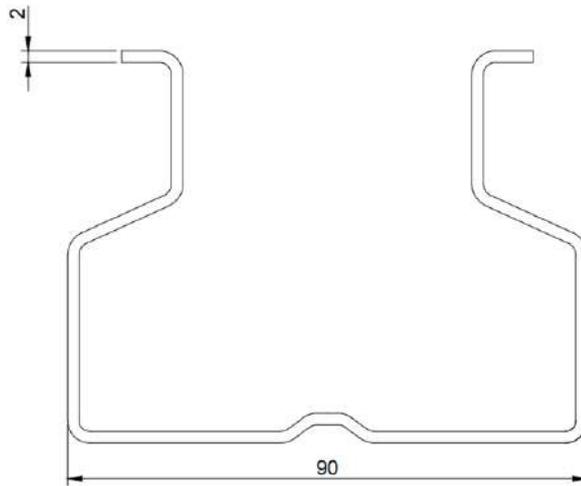


Figura 14 - Dimensões da seção transversal, 90 mm

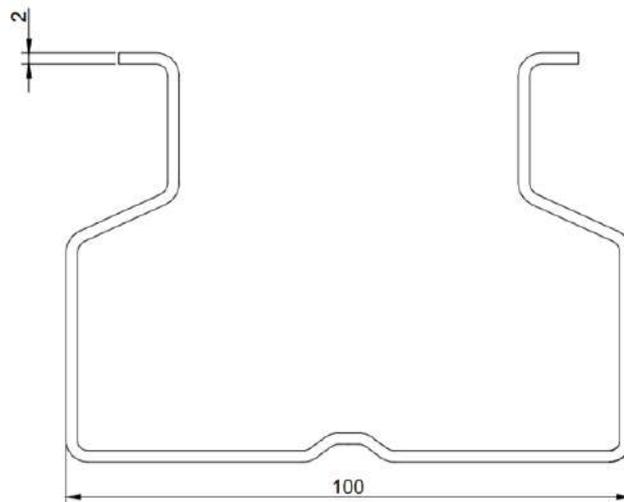


Figura 15 - Dimensões da seção transversal, 100 mm

Na primeira etapa, no estudo da variação da distância  $d$ , num primeiro momento a altura  $h_f$  da perfuração foi mantida constante em 20 mm e a largura  $b_f$  da perfuração variou em 5 mm, 10 mm, 15 mm e 20 mm. Posteriormente, a largura  $b_f$  foi mantida constante em 20 mm, enquanto a altura  $h_f$ , também variou em 5 mm, 10 mm, 15 mm e 20 mm. Para todas essas combinações de perfuração, a distância  $d$ , foi variada a partir de 2 mm, em incrementos de 2 mm até o limite em que  $d' = 0$  (ou seja a perfuração atinge o enrijecedor de alma). São apresentados, na Tabela 2, as variações feitas no estudo da posição da perfuração.

Tabela 2 - Estudo da posição das perfurações

<b>Configuração</b>	<b>Altura (<math>h_f</math>)</b>	<b>Largura (<math>b_f</math>)</b>	<b>Posições avaliadas (<math>d</math>)</b>	<b>Total de Casos</b>
Altura variável, largura fixa (20 mm)	5, 10, 15, 20	20	2 mm até $d' = 0$ (incrementos de 2 mm)	$b_f = 80$ mm → 26 modelos $b_f = 90$ mm → 36 modelos $b_f = 100$ mm → 46 modelos
Largura variável, altura fixa (20 mm)	20	5, 10, 15, 20	2 mm até $d' = 0$ (incrementos de 2 mm)	$b_f = 80$ mm → 12 modelos $b_f = 90$ mm → 20 modelos $b_f = 100$ mm → 32 modelos

A seguir, são apresentados, na Figura 16, dois exemplos de posicionamento dos furos em um perfil.

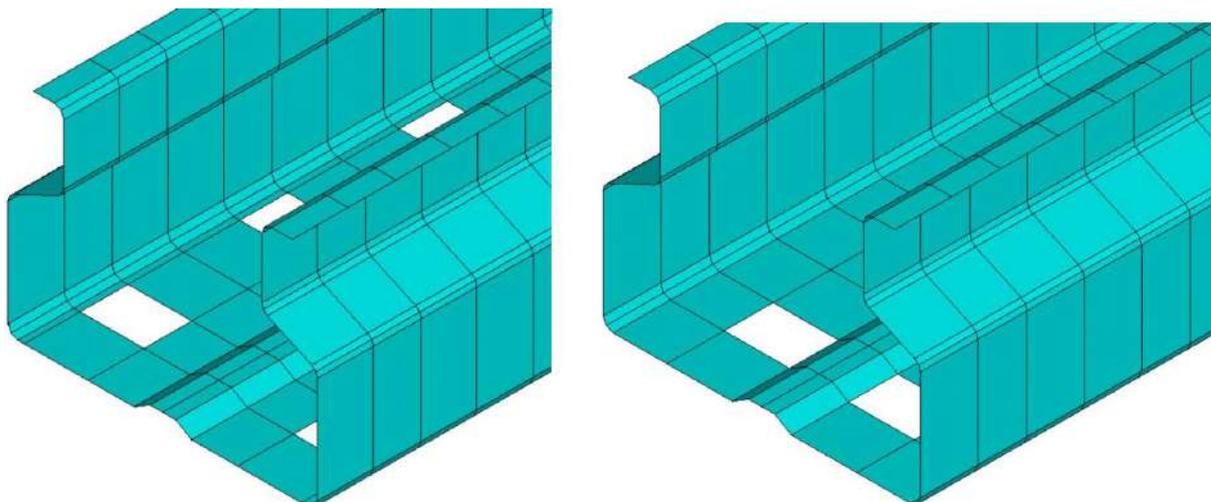


Figura 16 - perfuração com  $d=2$  mm, ou seja, posicionada a 2 mm da borda externa e uma perfuração com  $d'=0$ , quando o furo atinge o enrijecedor da alma.

As dimensões das perfurações foram variadas com o objetivo de avaliar se a posição dos furos afeta o comportamento dos perfis de maneira distinta para diferentes tamanhos e configurações.

Na segunda etapa, no estudo da variação das dimensões da perfuração, as alturas e larguras dos furos foram variadas, em incrementos de 2 e 4 mm. A distância da extremidade da alma,  $d$ , foi ajustada de acordo com a largura da perfuração,  $b_f$ , de maneira que, fosse sempre igual à distância do enrijecedor central,  $d = d'$ , com o objetivo de manter a perfuração centralizada entre a borda externa e o enrijecedor da alma. São apresentados, na Tabela 3, as variações feitas no estudo das dimensões da perfuração.

Tabela 3 - Estudo das dimensões das perfurações

<b>Configuração</b>	<b>Altura (<math>h_f</math>)</b>	<b>Largura (<math>b_f</math>)</b>	<b>Total de Casos</b>
Altura variável, largura fixa (20 mm)	5, 10, 15, 20	20	10 combinações
Largura variável, altura fixa (20 mm)	20	5, 10, 15, 20	10 combinações
Combinações completas	2, 6, 10, 14, 18	2, 6, 10, 14, 18	25 combinações ( $5 \times 5$ )

Procurou-se criar um sistema de nomenclaturas para facilitar a identificação dos diversos modelos analisados. Essas nomenclaturas estão apresentadas na Tabela 4:

Tabela 4 - Nomenclatura adotada

<b>Esquema de identificação: CC-WW-XX-YYY-ZZZ</b>	
<b>WW</b>	Largura da alma ( $b_w$ ): 80 mm, 90 mm e 100 mm
<b>XX</b>	Altura dos furos ( $h_f$ )
<b>YYY</b>	Largura dos furos ( $b_f$ )
<b>ZZZ</b>	Distância da borda externa

O presente trabalho se limitou a analisar colunas curtas, para que pudesse se utilizar da premissa que os efeitos das flambagens, local, global e distorcional não fossem levados em consideração e o modo de falha se desse, predominantemente, por escoamento do aço. A NBR 17150:2024 estabelece que colunas curtas devem atender a dois critérios principais: possuir um comprimento superior a três vezes a largura da alma do perfil,  $b_w$ , incluir pelo menos cinco passos de perfurações  $h_5$  como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Definição do comprimento das colunas

$b_w$ (mm)	$3 b_w$ (mm)	$h_{15}$	$h \geq \begin{cases} 3b_w \\ h_5 \text{ furos} \end{cases}$ (mm)
80	240	100	350
90	270	100	350
100	300	100	350

Como o maior valor para a altura da perfuração adotada foi de 20 mm, foi utilizado  $h_{f5} = 100$  mm. Com base nessas diretrizes, foi adotado um comprimento padrão que atendesse a todas as exigências para as seções analisadas. Dessa forma, definiu-se o comprimento de 350 mm para as colunas curtas utilizadas no estudo.

### 3.3 ANÁLISE LINEAR

A análise linear das colunas, foi feita de maneira a se obter o carregamento crítico e os modos de flambagem das colunas. Para definição do modelo e análise linear dos perfis, o estudo utilizou da linguagem APDL do ANSYS (APDL – *ANSYS Parametric Design Language*), para construção de um modelo, uma vez que todas as características eram funções de variáveis pré-estabelecidas, tornando possível a parametrização do modelo, conforme:

1. Inicialização do ANSYS e definição do tipo de análise: Estrutural.
2. Elementos utilizados: SHELL18.
3. Definição dos parâmetros do modelo.
4. Dados do material:
5. Definição da geometria do modelo a partir dos dados de:
  - a. Criação dos Keypoints.
  - b. Definição das Linhas.
  - c. Criação das Áreas básicas.
  - d. Perfurações.
  - e. Divisão das Áreas em faixas.
6. Geração da malha de elementos finitos.
7. Condições de contorno:
  - a. Acoplamentos dos nós de extremidade coincidentes.
  - b. Restrição de deslocamentos.
  - c. Aplicação de carga de compressão unitária.
8. Solução do problema de autovalor e autovetor para determinação da carga crítica de flambagem elástica e do modo associado.

### 3.4 ANÁLISE NÃO LINEAR

A análise não-linear foi realizada para obtenção da carga máxima resistida pela coluna. Nessa etapa são introduzidas as não-linearidades física e geométrica da coluna (imperfeições geométricas). Na Figura 17, é apresentado o diagrama de tensão x deformação utilizado para a consideração da não linearidade física, baseado em trabalhos anteriores (Neiva, 2017).

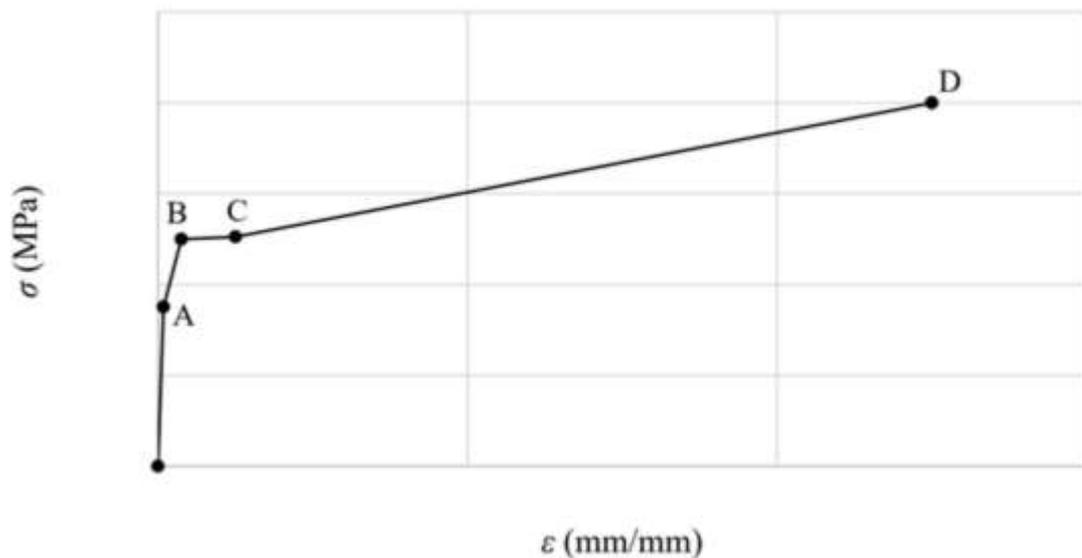


Figura 17 - Diagrama tensão x deformação. Adaptado de: Neiva, 2017

No gráfico apresentado na figura, o ponto A representa uma tensão equivalente a 70% da tensão de escoamento ( $0,70 f_y$ ), correspondente a deformação  $\epsilon_1$ . O ponto B marca a tensão de escoamento propriamente dita, ocorrendo quando a deformação atinge três vezes o valor da deformação de escoamento ( $3\epsilon_y$ ). Já o ponto C delimita o término da fase de escoamento, com uma deformação correspondente a 10 vezes  $\epsilon_y$ . Por fim, o ponto D refere-se à tensão última ( $f_u$ ), atingida quando a deformação alcança 100 vezes a deformação de escoamento ( $100\epsilon_y$ ).

A consideração das não linearidades geométricas é feita pela atualização da geométrica do modelo a cada passo de carga, baseado no primeiro modo de flambagem obtido na análise linear.

## 4 ANÁLISE TEÓRICA

Esta seção analisa o dimensionamento de perfis formados a frio sob compressão conforme as normas NBR 14762:2010 e NBR 17150:2024 (para perfis perfurados).

### 4.1 DIMENSIONAMENTO SEGUNDO A NBR 14762

A NBR 14762:2010 oferece três métodos para dimensionamento de uma barra comprimida, sendo que tanto Método da largura efetiva (MLE), quanto o Método da seção efetiva (MSE), consideram os efeitos da flambagem local do elemento no cálculo da capacidade resistente, porém, possui a limitação de não abranger a flambagem distorcional. O terceiro é o Método da resistência direta (MRD).

O MRD, descrito no anexo C da norma, tem como princípio básico a obtenção de todos os modos de flambagem e seus respectivos esforços críticos. No entanto, a utilização deste método está condicionada à realização de análise de estabilidade elástica da seção, feita através de *softwares*, como CUFISM (SCHAFFER E ÁDÁNY, 2006) e o GBTul (BEBIANO et al., 2008). Além disso, o MRD se limita a perfis não perfurados.

### 4.2 DIMENSIONAMENTO SEGUNDO A NBR 17150

A NBR 17150:2024 estabelece critérios específicos para o dimensionamento de barras comprimidas, abordando tanto perfis perfurados quanto não perfurados. Para as barras perfuradas, a norma apresenta três procedimentos distintos, sendo que, todos precisam ser validados experimentalmente.

Dos três métodos previstos, dois são baseados em ensaios diretos de colunas curtas, conforme detalhado nos itens A2.1 e A2.3 (ABNT, 2024), que especificam os requisitos para execução e interpretação dos testes.

Além disso, a norma admite um método teórico, por meio de simulações que considerem de maneira adequada as perfurações e os efeitos das flambagens global, global e distorcional, como por exemplo a simulação feita por elementos finitos (MEF). No entanto, mesmo nessa abordagem, a norma adota uma postura conservadora, exigindo que os modelos numéricos sejam validados experimentalmente.

### 4.3 ANÁLISE DA CARGA MÁXIMA

Dado que a análise foi realizada em colunas curtas, partiu-se do pressuposto que o mecanismo de falha ocorre predominantemente por escoamento do aço, sem que a flambagem tenha influência significativa na perda de resistência. Dessa forma, de acordo com a resistência do material, a carga máxima é dada pela equação (1):

$$P_{m\acute{a}x} = A_g \cdot f_y \quad (1)$$

Onde:

- $P_{m\acute{a}x}$  é a carga máxima;
- $f_y$  é a tensão de escoamento do aço;
- $A_g$  é área bruta da seção transversal;

Para todos os elementos analisados temos que:  $f_y = 350$  MPa.

As áreas brutas analisadas seguem distribuição de acordo com a Tabela 6:

Tabela 6 - Área bruta de cada seção

<b>CC80</b>	5,04 cm <sup>2</sup>
<b>CC90</b>	5,24 cm <sup>2</sup>
<b>CC100</b>	5,57 cm <sup>2</sup>

Nos casos das seções perfuradas que atendem aos mesmos requisitos, utiliza-se a coluna líquida, sem furos e com a seção transversal de área igual à área líquida mínima,  $A_{min\ liq}$ . A área líquida mínima é aquela onde existe a maior concentração de furos.

A área líquida mínima é obtida por meio da equação 2:

$$A_{min,liq} = A_g - n \cdot b_f \cdot t \quad (2)$$

Onde:

- $n$  é o número de perfurações em uma linha transversal;
- $b_f$  é o diâmetro ou largura do furo;
- $t$  é a espessura da chapa

A título de exemplificação a Figura 18, apresenta a determinação da área líquida para o modelo CC80-6-20.

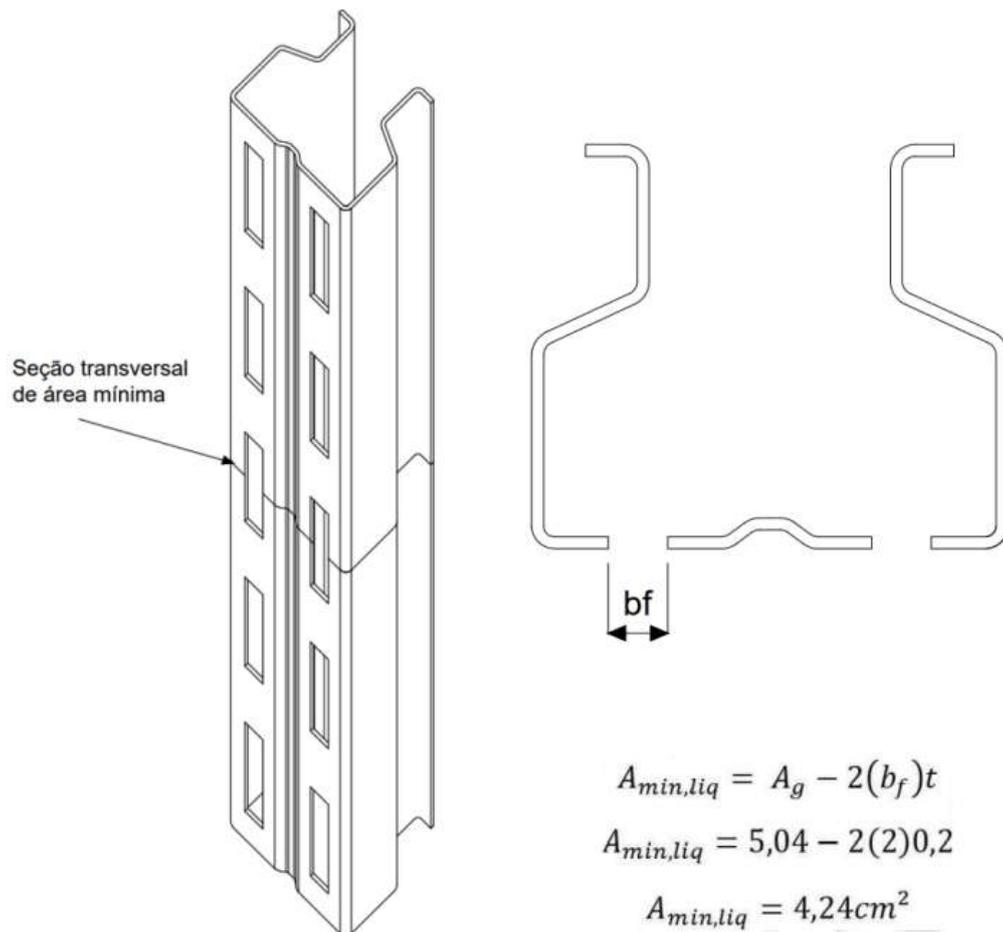


Figura 18 - Esquema geral de determinação de  $A_{min,liq}$  para o modelo CC80-6-20

## 5 ANÁLISE DE RESULTADOS E PROPOSIÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos por análise numérica, e as devidas interpretações com a finalidade de propor uma equação para determinação da carga máxima.

## 5.1 ESCOAMENTO DO AÇO

A seguir, a título de exemplificação, são apresentados, para um padrão estabelecido de perfurações, as cargas críticas ( $P_{cr}$ ) obtidas pela análise linear para cada uma das larguras de alma estudadas.

Tabela 7 - Cargas críticas obtidas pela análise linear

$b_w$	$P_{cr}$ (kN)
CC80	566,15
CC90	472,55
CC100	413,38

Os resultados obtidos pela análise linear reforçam que o mecanismo de falha ocorre por escoamento do aço, uma vez que o primeiro modo de flambagem, apresentado em todas as larguras de alma, tem valores elevados quando comparados à carga máxima obtida

## 5.2 CONFIGURAÇÃO DEFORMADA

A seguir, para título de exemplo, são apresentadas, para algumas configurações de perfuração, as configurações deformadas e os deslocamentos, obtidos após análise não linear.

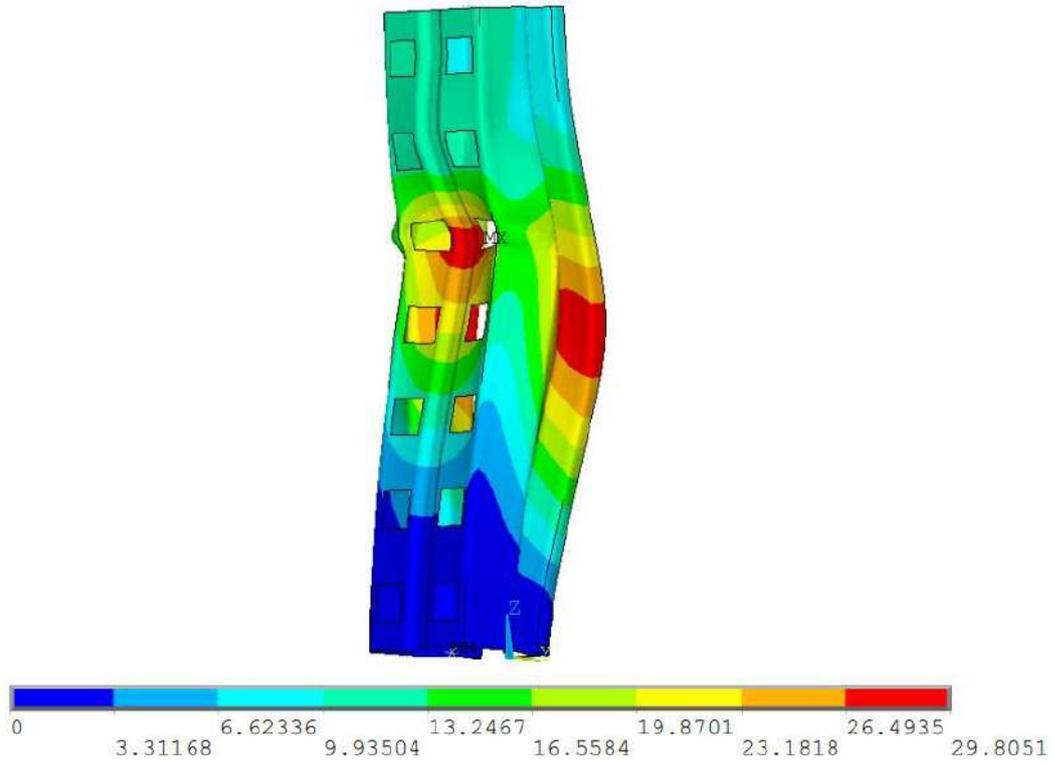


Figura 19 - CC80-20-20

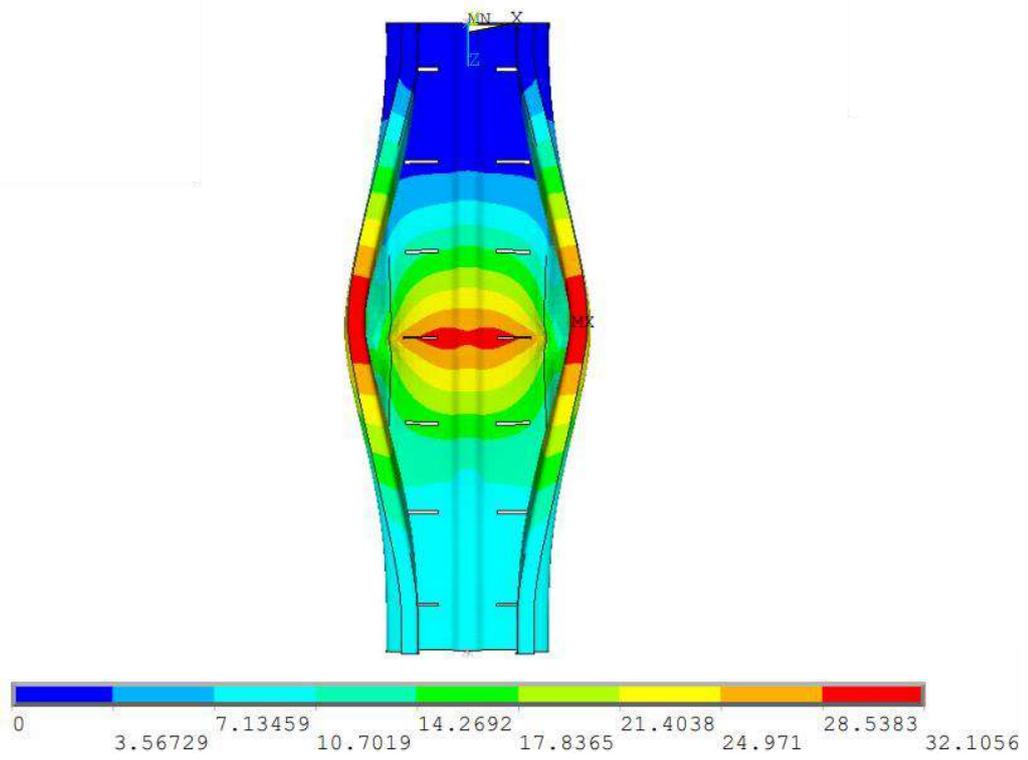


Figura 20 - CC90-2-18

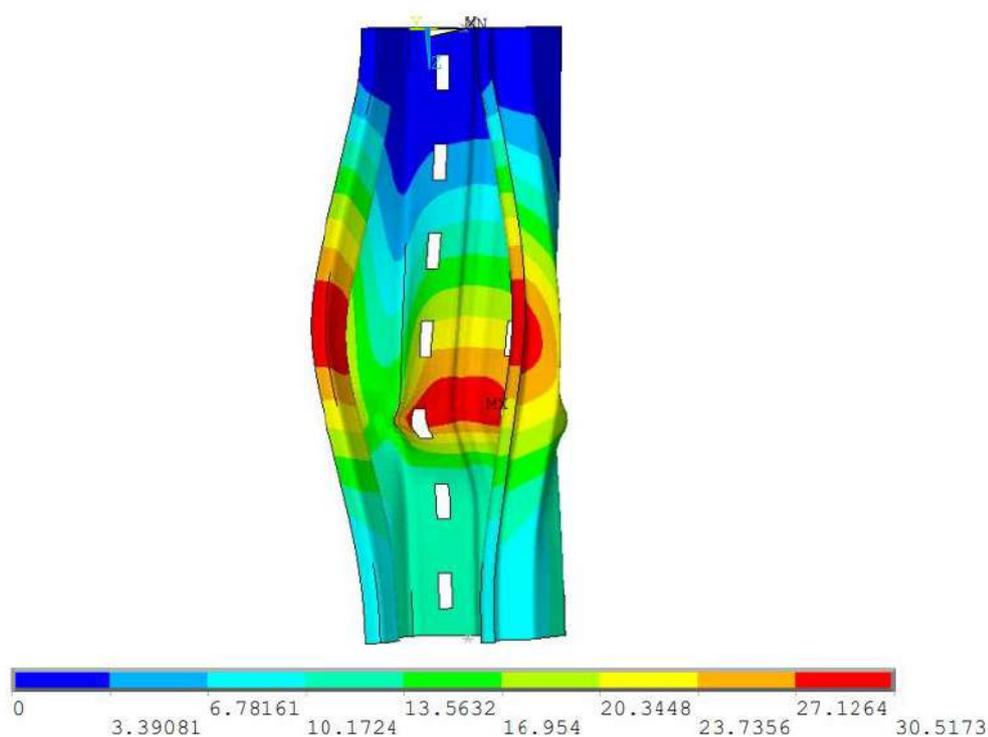


Figura 21 - CC100-20-8

Quanto aos modos de falha presentes nas colunas, para os comprimentos de 350 mm, observa-se a abertura dos flanges de ligação indicando a possibilidade da ocorrência do modo distorcional na fase inelástica. O nível das aberturas das perfurações influencia, na forma do mecanismo de plastificação.

### 5.3 INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA PERFURAÇÃO

Como dito anteriormente, a posição da perfuração foi analisada para diferentes dimensões de furos. As dimensões dessas perfurações foram alteradas da seguinte forma: primeiro, manteve-se a largura ( $b_f$ ) constante enquanto variamos a altura ( $h_f$ ); posteriormente, a altura ( $h_f$ ) e variamos a largura ( $b_f$ ). Finalmente, foram feitas variações na posição de todas essas perfurações. Os resultados obtidos são apresentados nas figuras seguintes:

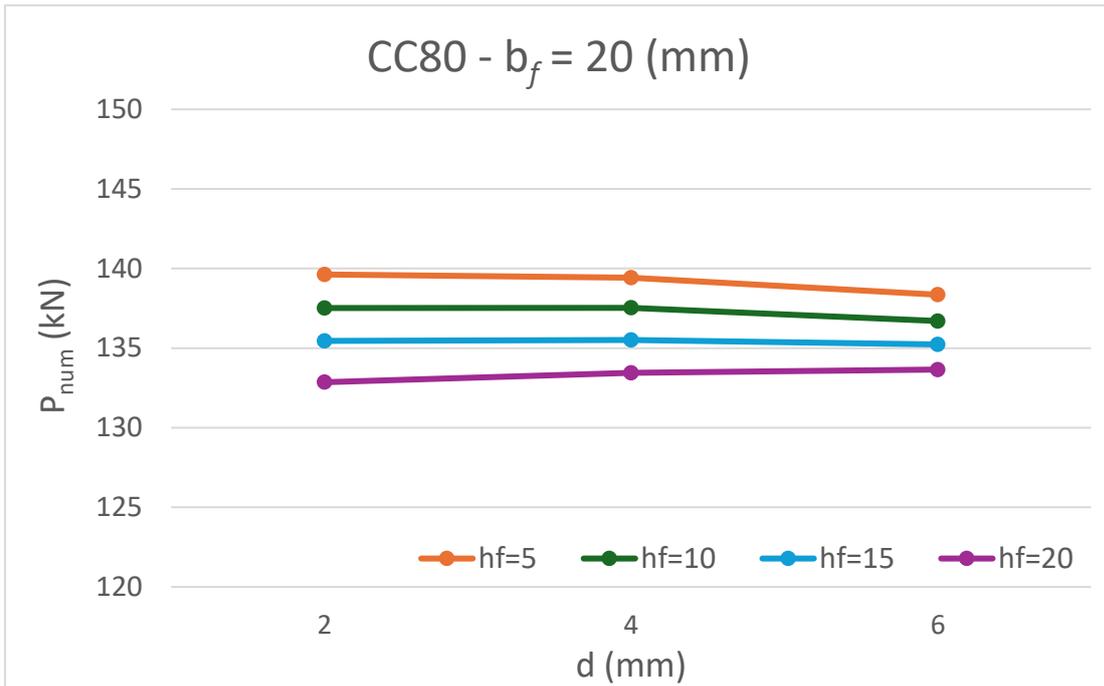


Figura 22 – CC80, variação da carga máxima em função da posição do furo, para um furo de largura constante (valores em mm)

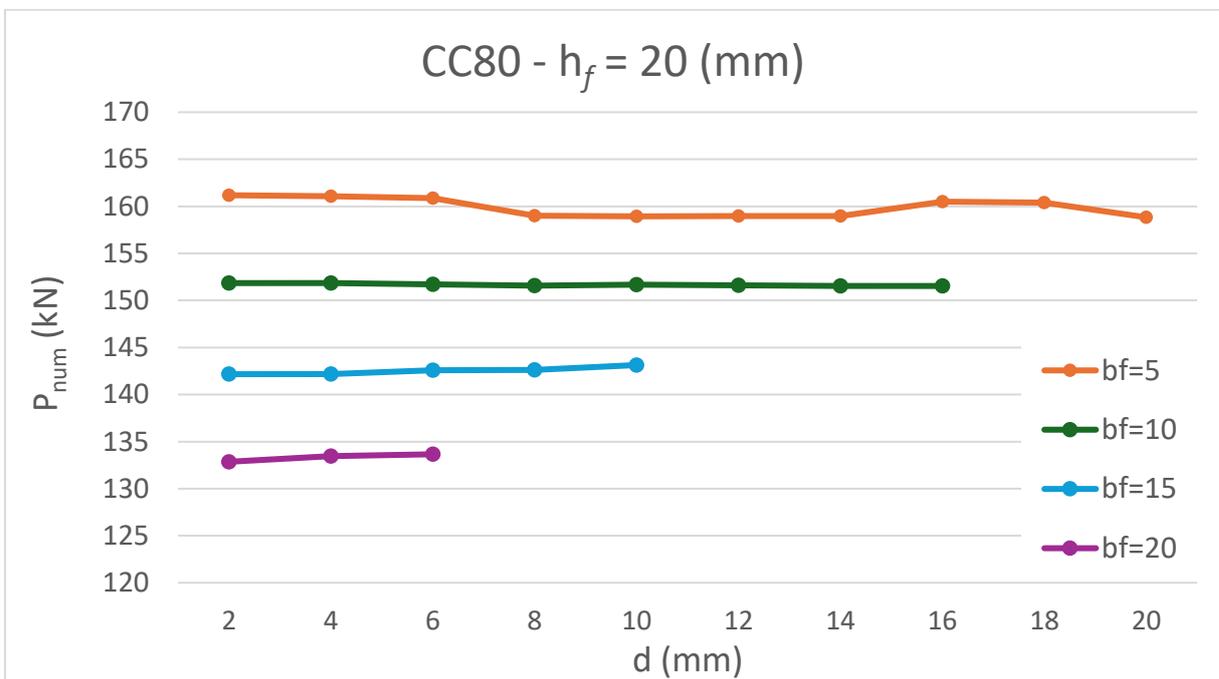


Figura 23 – CC80, variação da carga máxima em função da posição do furo, para um furo de altura constante (valores em mm)

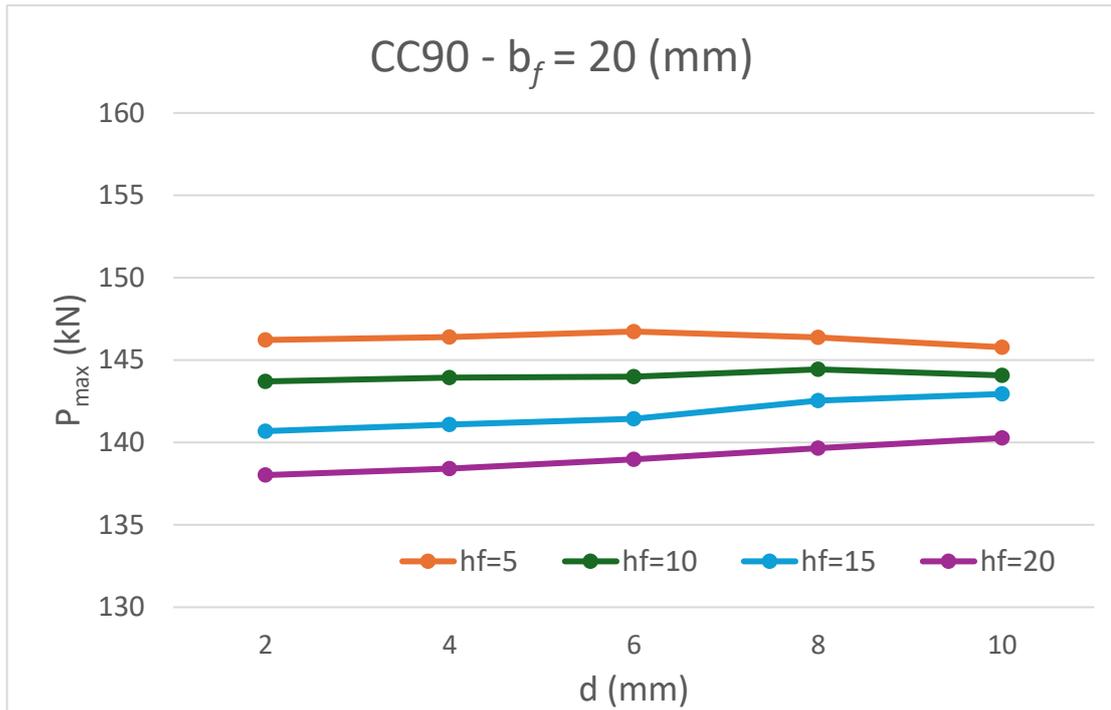


Figura 24 - CC90, variação da carga máxima em função da posição do furo, para um furo de largura constante (valores em mm)

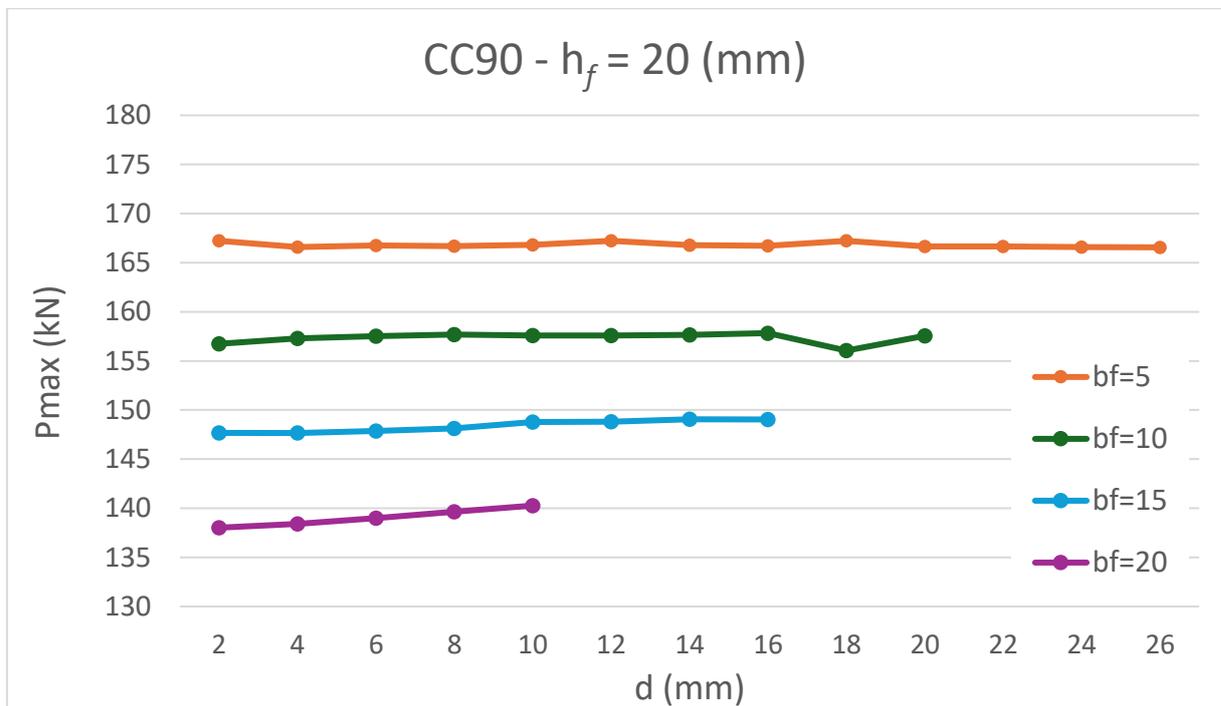


Figura 25 - CC90, variação da carga máxima em função da posição do furo, para um furo de altura constante (valores em mm)

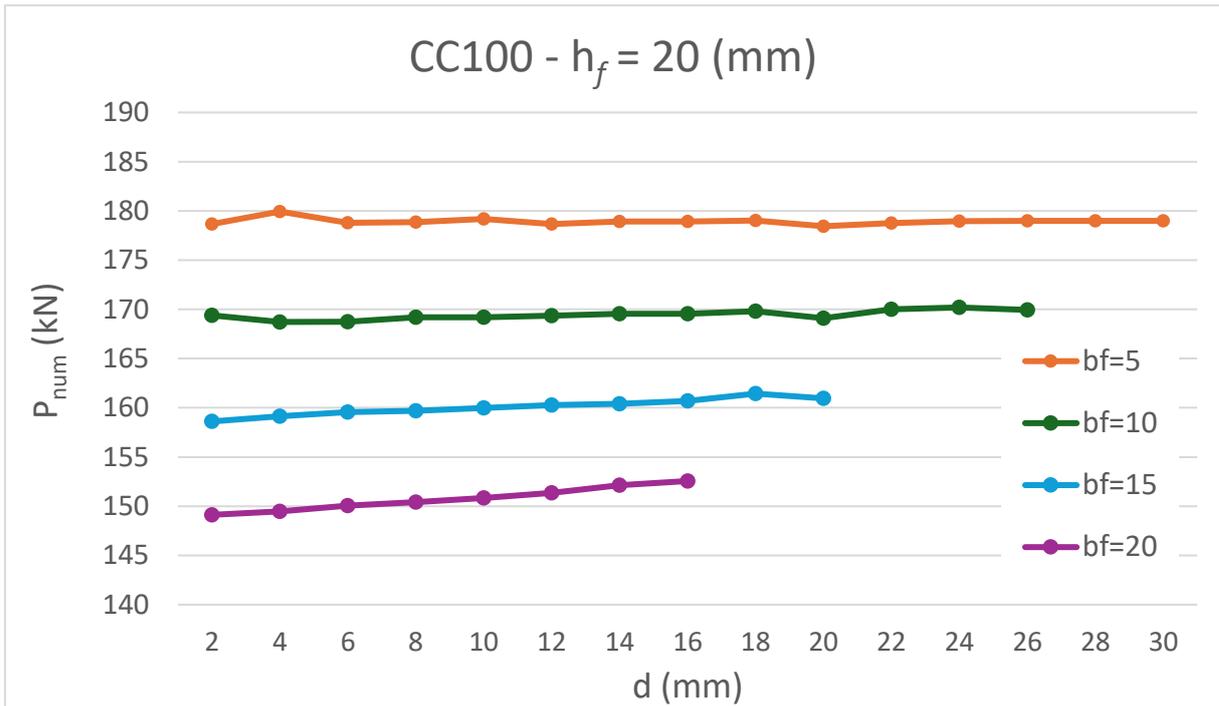


Figura 26 - CC100, variação da carga máxima em função da posição do furo, para um furo de altura constante (valores em mm)

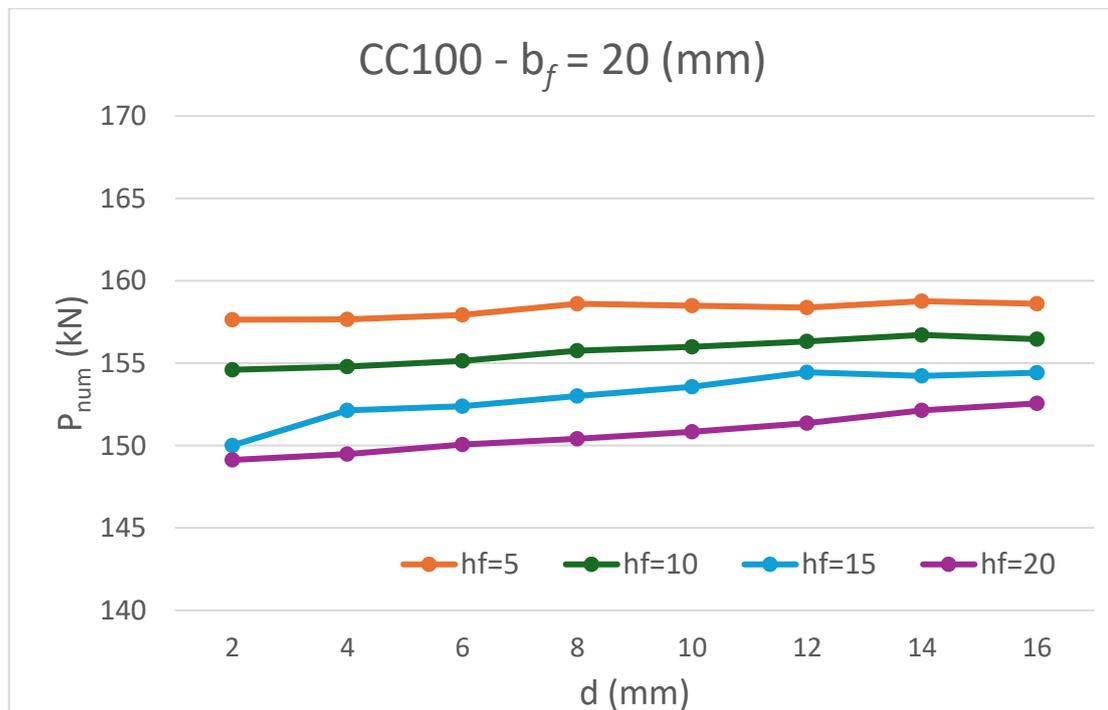


Figura 27 - CC100, variação da carga máxima em função da posição do furo, para um furo de largura constante (valores em mm)

A partir dos resultados obtidos, é possível perceber que, assim como esperado, o aumento em qualquer uma das dimensões das perfurações provoca uma redução na carga

máxima. Porém, também é possível perceber que a influência da posição das perfurações não parece seguir um padrão sistemático. Para exemplificar, a Tabela 8 traz parâmetros encontrados para os perfis do tipo CC100, sendo este escolhido apenas como referência, uma vez que o comportamento observado foi similar para todas as larguras de alma e, além disso, foi o perfil que obteve maiores variações na carga máxima obtida. Esses valores auxiliam na interpretação dos resultados.

Tabela 8 - Resultados obtidos com variação da posição da perfuração, para diferentes configurações de furo, nos perfis com largura de alma igual a 100 mm

$h_f$ (mm)	$b_f$ (mm)	Maior $P_{max}$ (perfil)	Menor $P_{max}$ (perfil)	$P_{max}$ médio (kN)	Desvio padrão	Amplitude (kN)
20	5	CC100-20-5-4	CC100-20-5-20	178,94	0,33	1,50
20	10	CC100-20-10-24	CC100-20-10-4	169,44	0,46	1,48
20	15	CC100-20-15-18	CC100-20-15-2	160,08	0,86	2,83
20	20	CC100-20-20-16	CC100-20-20-2	150,74	1,22	3,43
5	20	CC100-20-5-14	CC100-20-5-2	158,26	0,45	1,12
10	20	CC100-20-10-14	CC100-20-10-2	155,72	0,80	2,12
15	20	CC100-20-15-12	CC100-20-15-2	153,02	1,51	4,44

Os desvios padrão variam entre 0,33 e 1,51, quando analisa-se a amplitude variada, o maior valor encontrado, de 4,44 kN, em termos de porcentagem de variação de carga, a posição das perfurações influenciou de 0,66% a 2,95%. Outro ponto evidenciado é que não há um padrão claro entre a posição do furo e os valores extremos de carga máxima. A distância da borda externa,  $d$ , representada no último número da nomenclatura dos perfis, não apresenta relação previsível nem com as maiores e nem com as menores cargas encontradas. Por exemplo, para furos com altura de 20 mm e largura de 5 mm, a maior carga ocorreu para  $d=4$  mm e a menor para  $d=20$  mm. No entanto, para perfurações de 20 mm  $\times$  10 mm, a maior carga apareceu em  $d=24$  mm e a menor em  $d=4$  mm.

Devido à ausência de um padrão sistemático e de uma relação clara entre a carga máxima e a posição das perfurações, optou-se posteriormente pela centralização das perfurações — conforme apresentado anteriormente — como uma forma de mitigar possíveis efeitos decorrentes da sua posição.

#### 5.4 VARIAÇÃO DAS DIMENSÕES DA PERFURAÇÃO

Conforme esperado, os resultados obtidos a partir da análise numérica indicam que o aumento da área perfurada provoca uma redução na resistência do perfil, sendo observado esse comportamento em todas as seções analisadas (CC80, CC90 e CC100). Abaixo, são apresentados os gráficos dos resultados dos perfis nos quais a altura foi variada em incrementos de 2 mm, mantendo a largura fixa em 20 mm, e também dos perfis nos quais a largura foi variada, mantendo a altura fixa em 20 mm. Apesar de apenas essas variações sejam ilustradas, o mesmo comportamento foi verificado em todas as configurações de perfuração analisadas.

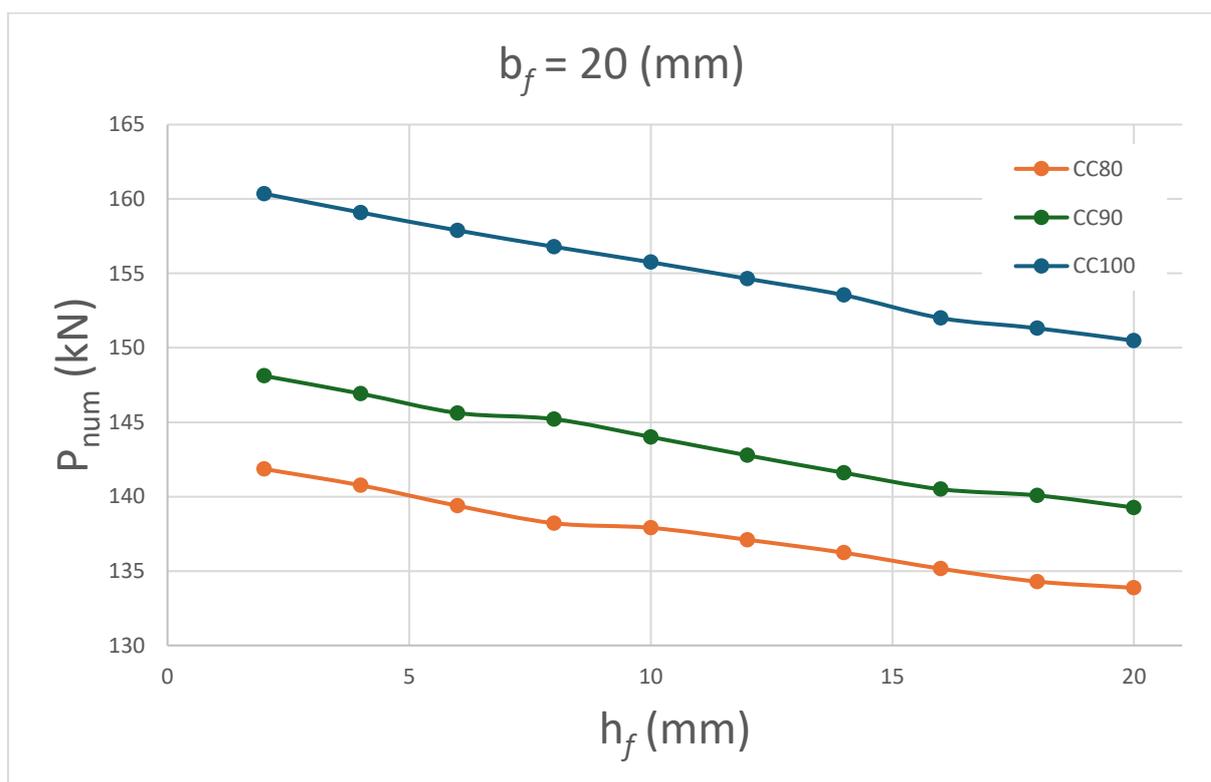


Figura 28 – Carga máxima em função da altura da perfuração, para largura constante

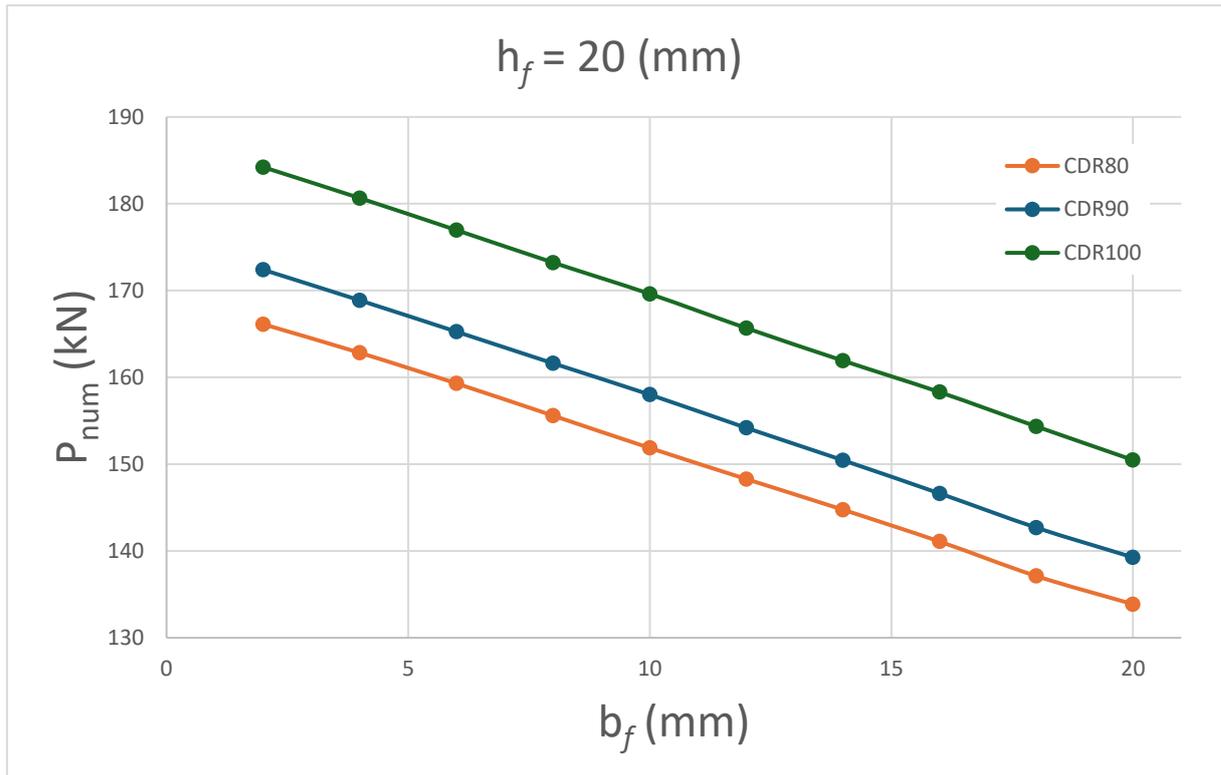


Figura 29- Carga máxima em função da largura da perfuração, para altura constante

Primeiramente, observa-se que a carga máxima aumenta com o aumento da largura da alma  $b_w$ . Além disso, ao considerarmos a área perfurada conforme a equação 3:

$$A_f = b_f \cdot h_f \quad (3)$$

Os resultados indicam que, embora tanto a altura quanto a largura da perfuração impactem a carga máxima, a largura tem um papel significativamente mais relevante. Esse mesmo comportamento foi observado por Yao e Rasmussen (2012) e Pinto (2021), que constataram que, mesmo para uma mesma área perfurada, a carga máxima pode variar dependendo de como essa área está distribuída, sendo a largura o fator de maior influência, porém, também é possível observar uma influência da altura. Esses resultados estão na Figura 30 para CC80, 31 para CC90 e 32 para CC100.

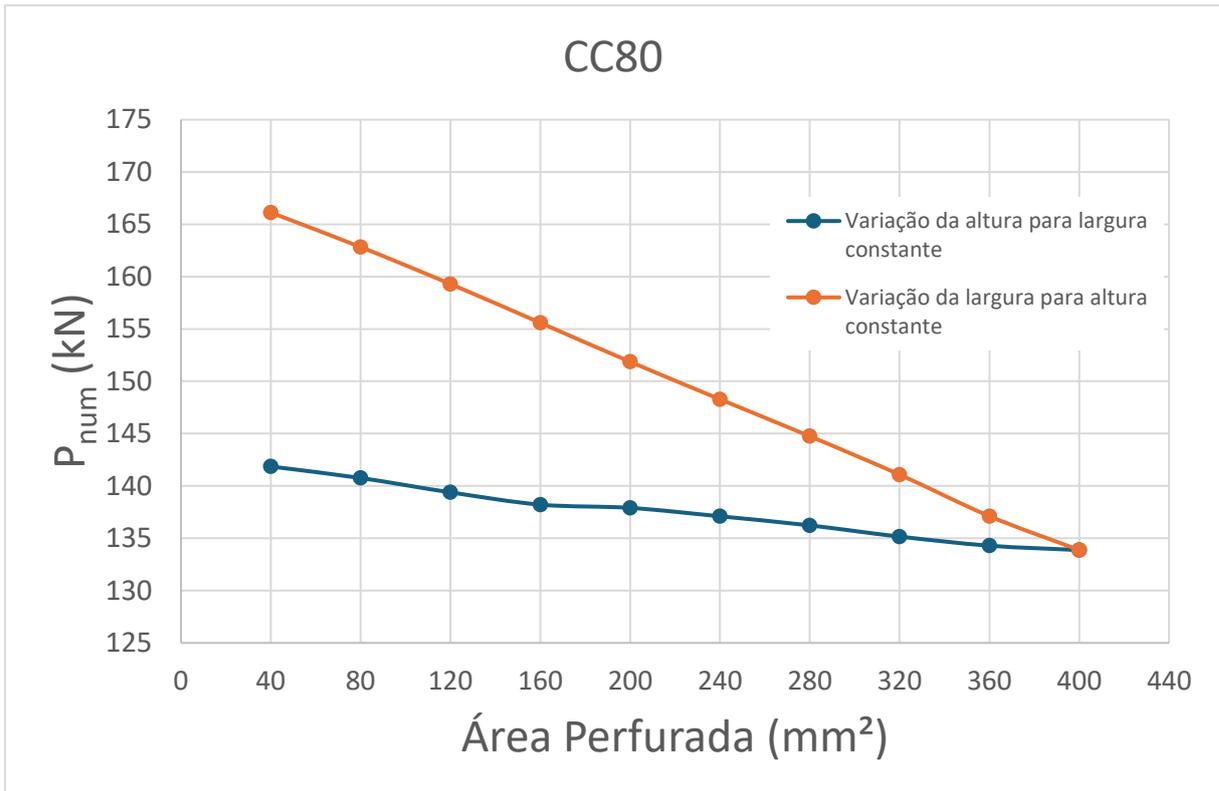


Figura 30 - Comparativo entre as variações da altura e largura da perfurações, CC80

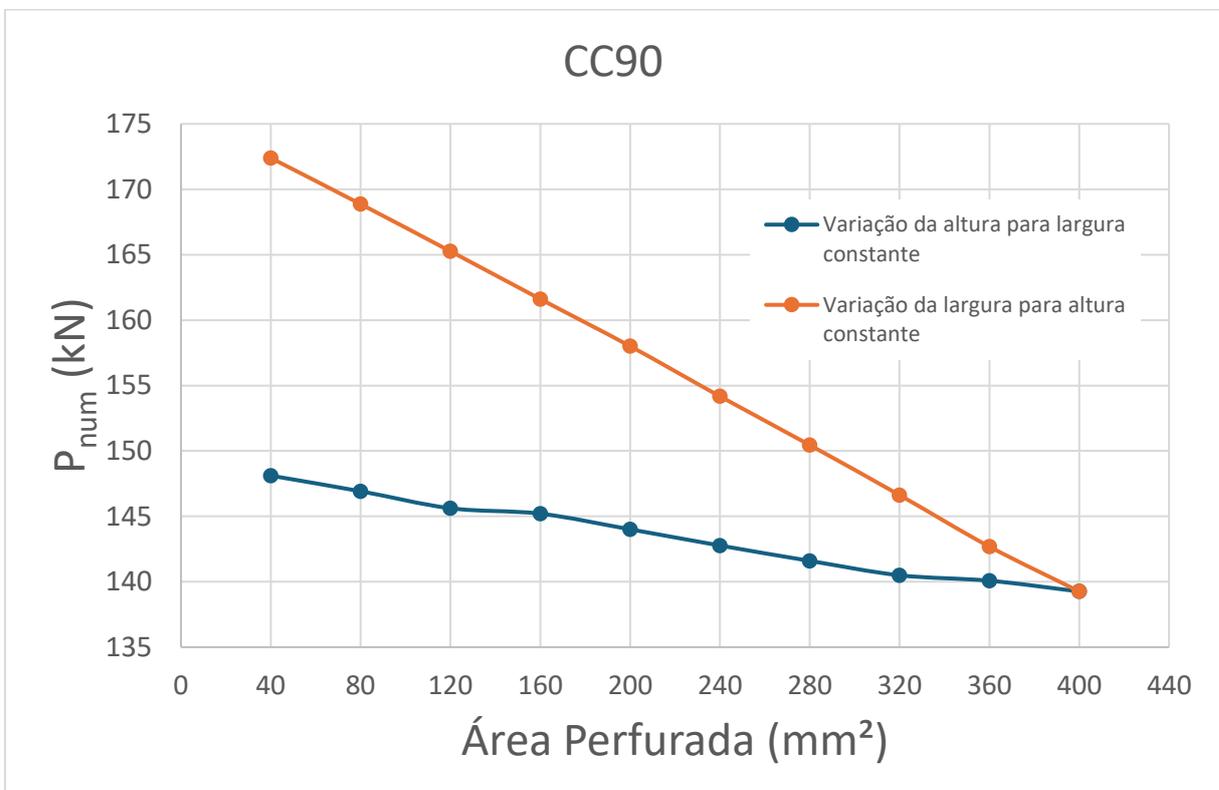


Figura 31 - Comparativo entre as variações da altura e largura das perfurações, CC90

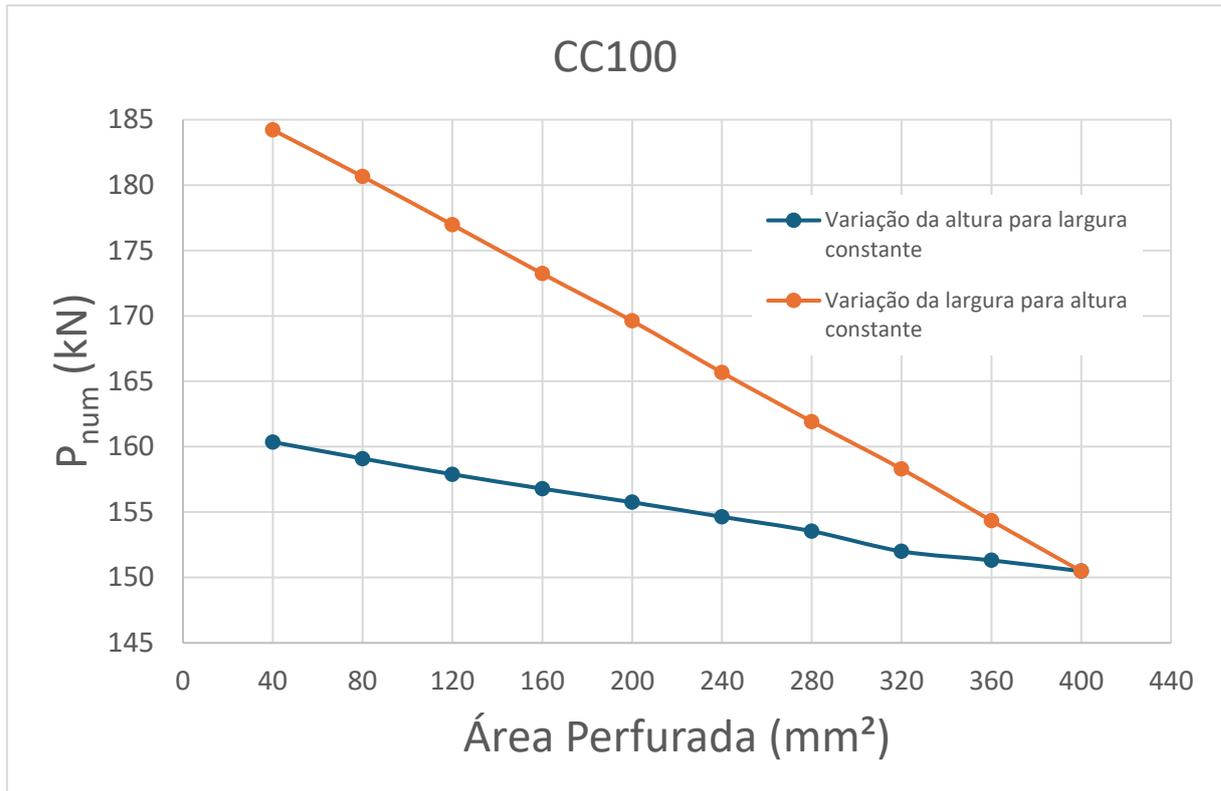


Figura 32 - Comparativo entre as variações da altura e largura das perfurações, CC100

## 5.5 PROPOSTA DE FORMULAÇÃO

A partir da análise numérica via Elementos Finitos, foi possível obter os valores das cargas máximas numéricas,  $P_{num}$ , para diferentes configurações geométricas de perfuração. A partir desses resultados, foi definida a área alvo ( $A_{alv}$ ).

A área alvo, é definida pela equação 4:

$$A_{alv} = P_{num}/f_y \quad (4)$$

A definição da área alvo se deu como uma tentativa de relacionar a área mínima e altura da perfuração com as cargas máximas resistentes obtidas numericamente

Após definir a área alvo para todas as variações de perfuração, os dados foram processados no MATLAB, que utiliza operações matriciais para análise matemática interativa dos resultados. A abordagem adotada envolve a representação gráfica tridimensional, no qual o eixo Z representa os valores da área alvo, o eixo Y corresponde à área líquida mínima, que depende

da largura das perfurações, e o eixo X indica a altura das perfurações. A partir dos resultados, se formou um plano, indicado na Figura 33.

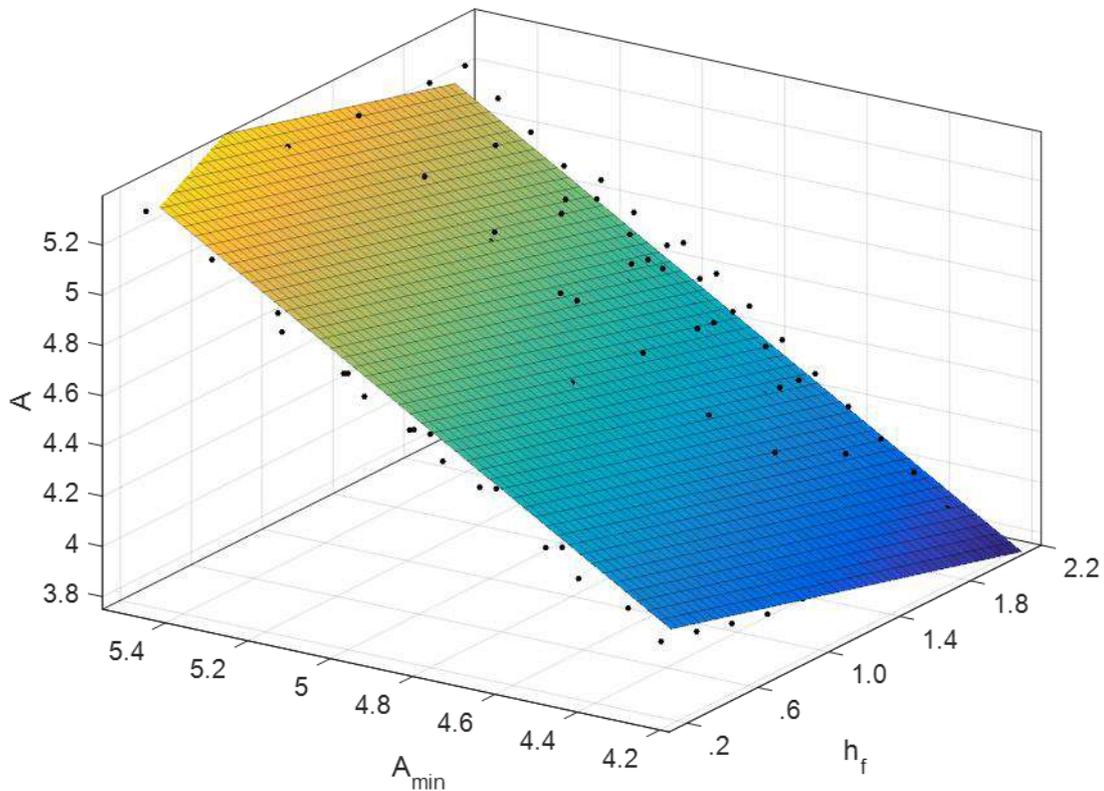


Figura 33 - Representação tridimensional da relação entre a área alvo, a área líquida mínima e a altura das perfurações

O objetivo principal é encontrar uma equação que descreva o comportamento da área alvo em função da área líquida mínima e da altura da perfuração. Para isso, foram testadas diferentes funções matemáticas, a fim de encontrar uma que tenha grau satisfatório de representatividade dos resultados.

A equação foi ajustada para a seguinte forma, apresentada na equação 5:

$$A_{prop} = A_g - 2 \cdot t \cdot b_f - t \cdot h_f \quad (5)$$

Onde:

- $A_{prop}$  é a definição da nova área proposta

- $A_g$  é a área bruta da seção
- $t$  é a espessura da chapa
- $b_f$  é a largura do furo
- $h_f$  é a largura do furo

Conforme discutido anteriormente, a altura da perfuração exerce um papel menos significativo do que a largura, o que agora é evidenciado pela equação proposta, porém, podemos perceber que a influência da altura também é significativa. Com base nessa formulação, foram calculadas novas áreas para todas os 135 modelos utilizados para avaliação das dimensões da perfuração. A partir dessas áreas, foi possível calcular uma nova carga máxima, denominada  $P_{prop}$ . Os valores obtidos  $P_{prop}$  foram então comparados com os valores da carga máxima obtidos no modelo numérico,  $P_{num}$ . O comparativo entre os resultados dos dois métodos é apresentado nos gráficos a seguir.

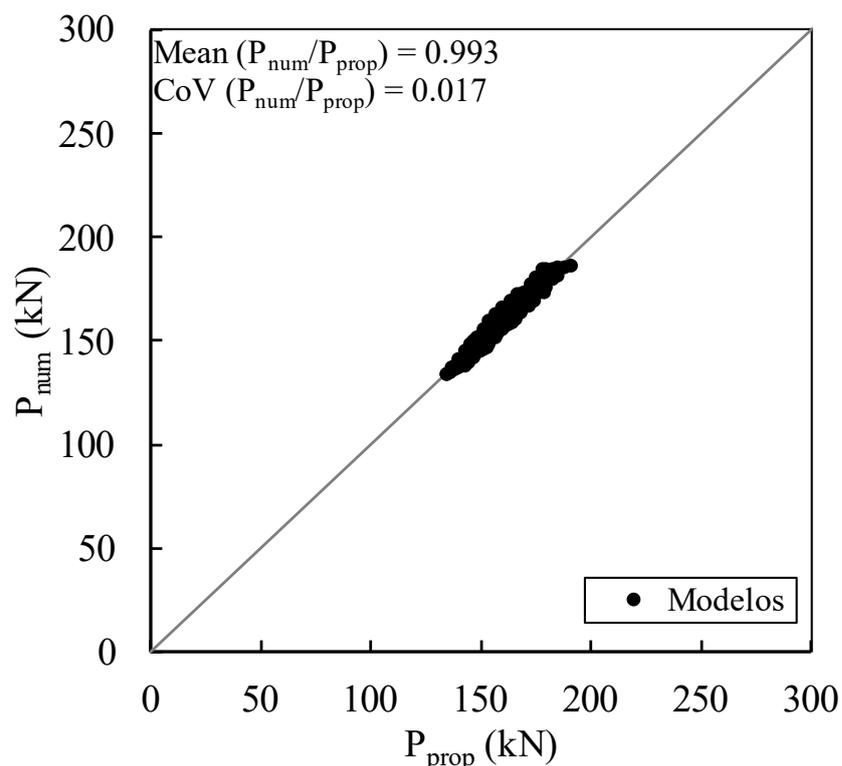


Figura 34 - Relação entre a carga máxima numérica ( $P_{num}$ ) e a carga máxima prevista ( $P_{prop}$ ) para diferentes dimensões de perfuração

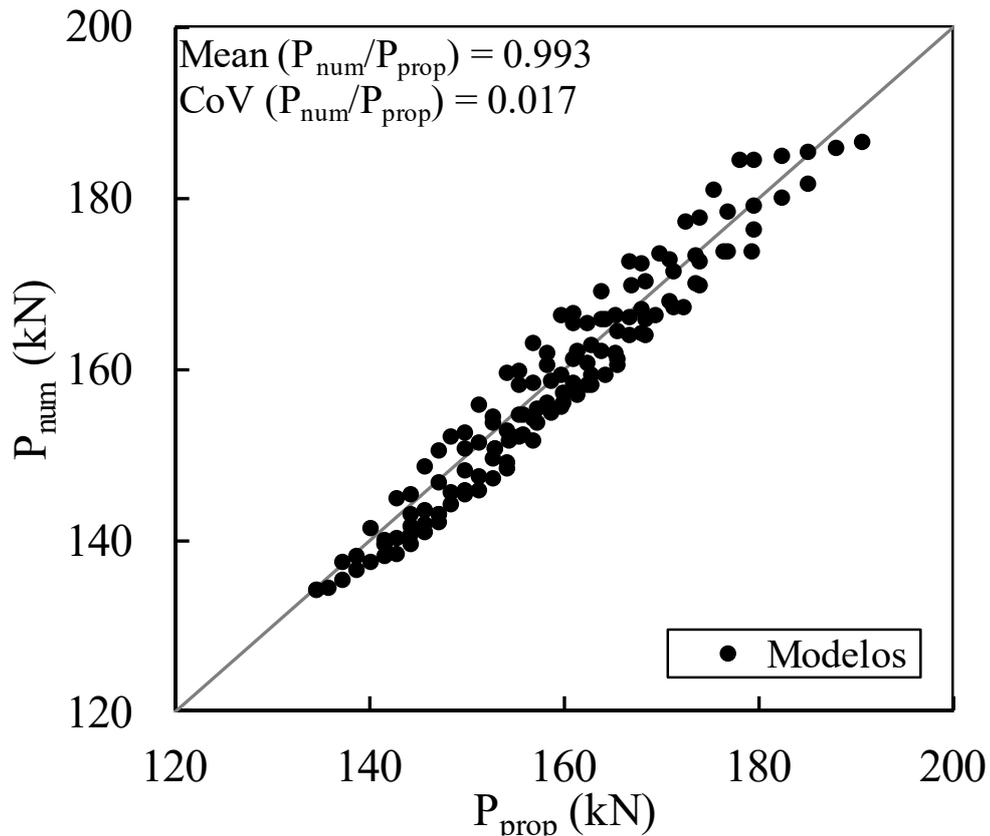


Figura 35 - Relação entre a carga máxima numérica ( $P_{num}$ ) e a carga máxima prevista ( $P_{prop}$ ) para diferentes dimensões de perfuração

A média,  $\text{Mean}(P_{num}/P_{prop})$ , representa a divisão entre as médias dos valores obtidos numericamente e através da equação proposta, enquanto o coeficiente de variação,  $\text{CoV}(P_{num}/P_{prop})$ , representa o desvio médio, que é a razão entre o desvio padrão e a média. Podemos observar, através destes resultados, que a formulação proposta tem boa representatividade para os casos estudados, uma vez que o desvio médio foi inferior a 2%.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da variação das dimensões e da posição das perfurações em colunas de Perfil Formado a Frio de seção tipo rack, através de métodos computacionais. As perfurações foram consideradas ao longo do comprimento das colunas.

O uso do método computacional teve como objetivo oferecer uma alternativa aos ensaios experimentais para a determinação da carga máxima. Atualmente, as duas principais normas brasileiras para o dimensionamento de perfis formados a frio, a NBR 14762 e a NBR 17150,

não apresentam diretrizes bem definidas para esse caso. A NBR 14762 não considera os efeitos das perfurações, enquanto a NBR 17150, embora os contemple, exige comprovação por meio de ensaios experimentais.

Foram consideradas três seções transversais, variando a largura da alma (80 mm, 90 mm e 100 mm), a espessura da chapa foi mantida fixa em 2 mm. O comprimento da coluna foi mantido fixo em 350 mm para que o mecanismo de falha se desse preferencialmente por escoamento do aço.

Para o estudo da influência da posição da perfuração, foram realizadas variações na distância em relação à borda externa, considerando diferentes configurações de perfurações para cada uma das três larguras de alma analisadas — totalizando 172 modelos nessa etapa. Já na análise da influência das dimensões das perfurações, foram consideradas 45 variações de furos para cada largura de alma, com diferentes combinações de largura e altura, resultando em um total de 135 modelos avaliados.

A análise computacional foi realizada por meio do Método dos Elementos Finitos no *software* ANSYS. Para facilitar e automatizar a utilização do programa, foi desenvolvido um script em APDL (*ANSYS Parametric Design Languages*).

Os resultados obtidos por meio do *software* possibilitaram concluir que a posição da perfuração não teve comportamento bem definido na carga máxima dos modelos.

Já no estudo das dimensões dos furos, os resultados obtidos pelo ANSYS foram utilizados para definir uma nova área equivalente da seção, denominada área alvo. Em seguida, com o auxílio de um *software* matemático, foi desenvolvida uma relação tridimensional que buscava correlacionar a área mínima (dependente da largura do furo) e a altura do furo, de modo a determinar uma expressão matemática capaz de reproduzir os valores da área alvo.

Com base na relação matemática estabelecida, foram calculados novos valores de carga para todos os modelos. Os resultados obtidos pela nova formulação foram então comparados aos dados experimentais. A razão entre a carga máxima obtida experimentalmente e a carga prevista apresentou uma média de 99,3%, enquanto a razão entre o desvio padrão e a média dos resultados foi inferior a 2%. Esses índices indicam uma boa representatividade da formulação proposta

## **6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Análise da variação da espessura da chapa;
- Análise para diferentes dimensões da seção transversal tipo rack;
- Análise para diferentes comprimentos da coluna.

## REFERÊNCIAS

- AGUIA SISTEMAS.** Porta pallets. Disponível em: <https://aguiasistemas.com.br/br/solucoes/estruturas/porta-pallets/>. Acesso em: 3 abr. 2025.
- ANSYS.** *Ansys program version 18.0. Finite Element Software.* S.l.: Ansys Incorporation, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 6355: Perfis estruturais de aço formados a frio — Padronização. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 17150:2024 – Sistemas de armazenagem — Estrutura de armazenagem estática tipo porta-paletes – Parte 1: Requisitos para projeto estrutural; Parte 2: Tolerâncias, deformações e folgas para projetos. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- BEBIANO, R.; PINA, P.; SILVESTRE, N.; CAMOTIM, D.** *GBTUL – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members.* DECivil/IST, Technical University of Lisbon, 2008. Disponível em: <http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>.
- CHEN, Boshan; ROY, Krishanu; UZZAMAN, Asraf; RAFTERY, Gary M.; LIM, J. B. P.** Parametric study and simplified design equations for cold-formed steel channels with edge-stiffened holes under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 172, p. 106161, 2020.
- FARIA, Vinícius de Oliveira.** Análise de estabilidade de perfis formados a frio com perfurações. 2016. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- GOMES, D. M.; SARMANHO, A. M. C.; SOUZA, F. T. de.** Análise numérica de pilares formados a frio do tipo rack com perfurações de bordas enrijecidas. *REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 19, n. 1, p. 78-91, 2023. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/74342>. Acesso em: 3 abr. 2025.

**MATSUBARA, Gustavo Yoshio.** Análise da interação entre modos de flambagem local e distorcional em perfis de aço formados a frio com seção U enrijecido sob compressão axial. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COOPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

**MOEN, C. D.; SCHAFER, B. W.** Direct Strength 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, 2009. 540 p.

**NEIVA, Luiz Henrique de Almeida.** Análise da influência da variação de perfurações no comportamento e capacidade de carga de perfis formados a frio de seção tipo rack. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

**PINTO, Ramon Albis Rodrigues.** Análise numérica da influência das dimensões de perfurações em perfis formados a frio do tipo rack submetidos à compressão centrada sujeitos à flambagem distorcional. 2021. 99 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia das Construções) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

**RIBEIRO, F. S.** Análise Teórico-Experimental de Colunas Curtas em Perfis Formados a Frio de Seção Transversal tipo Rack. 2006. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.

**RMI.** *Specification for the Design, Testing, and Utilization of Industrial Steel Storage Racks.* Charlotte, North Carolina: Racks Manufacturers Institute, 1997.

**SARMANHO, A. M. C.; FREITAS, M. S. da R.; SOUZA, F. T. de.** Análise teórico-experimental de elementos formados a frio perfurados submetidos à compressão. *REM: Revista Escola de Minas*, v. 57, n. 1, p. 59-63, jan./mar. 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rem/v57n1/v57n1a11.pdf>. Acesso em: 3 abr. 2025.

**SARAWIT, A. T.; PEKÖZ, T.** Cold-formed Steel Frame and Beam-column Design. Research Report N° 03-03, Cornell University, Ithaca, NY, 2003.

**SCHAFFER, B.; ÁDÁNI, S.** Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained methods. In: *18th International Specialty Conference on Cold Formed Steel Structures*, Orlando, Florida, 2006.

**SALES, Amaury Eloy Carvalho Araújo.** Análise da aplicação do método da resistência direta a perfis formados a frio com perfurações submetidos à compressão. 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Construção Metálica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

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

**SILVA, L. S.; SIMÕES, R.; GERVÁSIO, H.; VELLASCO, P.; LIMA, L.** *Dimensionamento de Estruturas de Aço: Comparação entre o Eurocódigo 3 e a Norma Brasileira NBR 8800*. 1ª ed., 316 p., 2016.

**SOUZA, Flávio Teixeira de.** Análise teórico-experimental da estabilidade de colunas perfuradas em perfis de aço formados a frio de seções tipo rack. 2013. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

**SOUZA, Flávio Teixeira de; SANTOS, Elves Tiago dos; SARMANHO, Arlene Maria Cunha.** Análise numérica da influência das dimensões de perfurações em perfis formados a frio do tipo rack submetidos à compressão. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*, v. 5, n. 5, p. 1-266, 2020.

**YAO, Z.; RASMUSSEN, K. J. R.** Inelastic local buckling behaviour of perforated plates and sections under compression. *Thin-Walled Structures*, v. 61, p. 49-70, 2012.

**YAO, Z.; RASMUSSEN, K. J. R.** Perforated Cold-Formed Steel Members in Compression. I: Parametric Studies. *Journal of Structural Engineering*, v. 143, 2016.