



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS AMBIENTAIS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANDRÉ LUIGUI BEZERRA SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ROTINA DE CÁLCULO PARA O
DIMENSIONAMENTO À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO DE PERFIS U
SIMPLES DE AÇO FORMADOS A FRIO**

MOSSORÓ

2022

ANDRÉ LUIGUI BEZERRA SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ROTINA DE CÁLCULO PARA O
DIMENSIONAMENTO À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO DE PERFIS U
SIMPLES DE AÇO FORMADOS A FRIO**

Monografia apresentada a
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Valmiro Quéfren
Gameleira Nunes, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2022

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S237d Santos, André Luigui Bezerra .
Desenvolvimento de uma rotina de cálculo para
o dimensionamento à tração e à compressão de perfis
U simples de aço formados a frio / André Luigui
Bezerra Santos. - 2022.
44 f. : il.

Orientador: Valmiro Quéfren Gameleira Nunes.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2022.

1. Perfis Formado a Frio. 2. Perfil U. 3. Aço.
4. Microsoft Excel. I. Nunes, Valmiro Quéfren
Gameleira, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANDRÉ LUIGUI BEZERRA SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ROTINA DE CÁLCULO PARA O
DIMENSIONAMENTO À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO DE PERFIS U
SIMPLES DE AÇO FORMADOS A FRIO**

Monografia apresentada a
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 23/11/2022.

BANCA EXAMINADORA

Valmiro Quéfren Gameleira Nunes, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Christiane Mylena Tavares De Menezes Gameleira, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

João Paulo Matos Xavier, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Adaildo Benedito dos Santos e Maria de Lourdes Bezerra Santos por nunca terem medido esforços para me garantir uma educação de qualidade.

Agradeço a Deus por ter me agraciado ao longo do curso.

Agradeço a minha namorada Juliane Martins Medeiros pelo apoio mesmo quando eu estou agoniado.

Agradeço as professoras Marcielene Vieira de Nóbrega, Sara de Oliveira Marques Luna e Janielly Kaline de Oliveira Ferreira pelos projetos de extensão, iniciações científicas e monitorias essenciais para o meu crescimento.

Agradeço ao meu orientador Valmiro Quéfren Gameleira Nunes pelos ensinamentos e orientação.

Agradeço ao professor John Elói Bezerra pelos conhecimentos sobre programação.

Agradeço aos meus amigos do portal da resistência, mais especificamente Felipe Lino e Gustavo Alexandre que estão comigo desde CeT.

“Para meu herói, que é quem eu persigo. Quando eu tinha 15 anos uma pessoa importante na minha vida me perguntou quem era meu herói. Na hora, eu respondi que não sabia e que precisava pensar mais sobre isso. Pensei por algumas semanas e depois disso descobri que meu herói era eu mesmo daqui a 10 anos. Aos 25 anos essa pessoa veio até mim e perguntou se eu já era um herói. Obviamente eu não sou, respondi. Meu herói sou eu aos 35 anos. Pensei por algumas semanas e depois disso descobri que meu herói era eu mesmo daqui a 10 anos. Eu nunca vou ser um herói, nunca vou alcançar isso. Eu sei que não sou e isso é bom para mim porque isso me mantém com um objetivo a ser perseguido.” Matthew McConaughey

RESUMO

Os perfis formados a frio (PFF) possuem um extenso leque de aplicação, sendo considerado como o perfil do futuro. São utilizados em coberturas de aço, contraventamento e tirantes, sendo o seu dimensionamento com base na normativa ABNT NBR 14762:2010 - “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio”. Destaca-se que o cálculo da resistência desses perfis envolve a redução das suas áreas brutas, como forma de considerar concentrações de tensões, e a utilização de equações da teoria da elasticidade. Visando otimizar o processo de dimensionamento, o trabalho consiste em desenvolver uma planilha no Microsoft Excel ® capaz de dimensionar à compressão e à tração de perfis U simples formado a frio. Como resultado, desenvolveu-se uma planilha capaz de, após o usuário inserir os esforços atuantes, comprimentos, condição de vinculação e material estrutural, servir como subsídio para o engenheiro possa escolher o perfil que atende a situação estudada. Destaca-se que para aferir os resultados da planilha, um exemplo de cálculo analítico foi realizado e constatou-se que a planilha é eficaz para o cálculo desses tipos de perfis.

Palavras-chave: Perfis Formado a Frio. Perfil U. Aço. Microsoft Excel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de enrijecimento de um perfil formado a frio.	15
Figura 2 - Prensa dobradeira.	16
Figura 3 – Treliza composta por perfil U simples.....	16
Figura 4 – Distribuição de tensão.....	19
Figura 5 – Comportamento de cantoneira conectada por uma aba.	20
Figura 6 – Grandezas para o cálculo do coeficiente C_t	20
Figura 7 – Barras comprimidas não escoam ou rompem, e sim flambam.	21
Figura 8 – Flambagem por flexo-torção.	23
Figura 9 – Analogia do perfil U.	23
Figura 10 – Espessura dos elementos.....	24
Figura 11 – Perfil um com uma alma não enrijecida.	26
Figura 12 – Esquema representando o funcionamento da planilha.....	29
Figura 13 – Dimensões do Perfil U Simples.....	30
Figura 14 – Dimensionamento à tração.....	37
Figura 15 – Dimensionamento à compressão.	37
Figura 16 – Demonstração da planilha (Tração).....	40
Figura 17 – Demonstração da planilha (Compressão)	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Chapas finas de aço especificadas por normas brasileiras para uso estrutural.....	17
Tabela 2 - Dados do perfil.	30
Tabela 3 - Dados do perfil (continuação).	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área
$A_{ef,MLE}$	Área efetiva pelo método da largura efetiva
$A_{ef,MSE}$	Área efetiva pelo método da seção efetiva
A_g	Área bruta da seção
A_{n0}	Área da seção descontando os furos.
B	Largura do perfil
b_{AA}	Largura do elemento AA
b_{AL}	Largura do elemento AL
b_{ef}	Largura efetiva de um elemento da seção
b_{efAA}	Largura efetiva do elemento AA
b_{efAL}	Largura efetiva do elemento AL
b_{gAA}	Largura bruta do elemento AA
b_{gAL}	Largura bruta do elemento AL
C_t	Coeficiente de redução
C_w	Constante de empenamento da seção
e	Espessura
e_c	Excentricidade da ligação
f_{lim}	Força limite
f_u	Resistência à ruptura
f_y	Resistência ao escoamento
h	Altura do perfil
I_a	Momento de inercia do elemento enrijecido
I_s	Momento de inercia do enrijecedor
I_x	Momento de inércia em torno do eixo x
I_y	Momento de inércia em torno do eixo y
J	Constante de torção uniforme da seção
k	Coeficiente de flambagem local
k_l	Coeficiente de flambagem local
K_x	Coeficiente de flambagem no eixo x
K_y	Coeficiente de flambagem no eixo y
K_z	Coeficiente de flambagem no eixo z

l_c	Comprimento da solda
L_x	Comprimento da barra no eixo x
L_y	Comprimento da barra no eixo y
L_z	Comprimento da barra no eixo z
MSE	Método da seção efetiva
MLE	Método da largura efetiva
N	Esforço normal
$N_{c,Rd}$	Força axial de compressão resistente de cálculo
$N_{c,Sd}$	Solicitação a compressão de cálculo
N_e	Menor força normal de flambagem elástica
N_{ex}	Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo x
N_{ey}	Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo y
N_{ez}	Força normal de flambagem elástica por torção
N_{exz}	Força normal de flambagem elástica por flexo-torção para perfis U
N_l	Força Axial de Flambagem Elástica para o cálculo do método da seção efetiva
$N_{t,Rd}$	Resistência a tração de cálculo
$N_{t,Sd}$	Solicitação a tração de cálculo
PFF	Perfil Formado a Frio
r	Raio de giração
r_x	Raio de giração do eixo x
r_y	Raio de giração do eixo y
r_0	Raio de giração polar em relação ao centro de torção
t	Espessura
W_x	Módulo resistente do eixo x
W_y	Módulo resistente do eixo y
x_0	Coordenada do centro de torção na direção do eixo x

γ_{a1}	Coeficiente de segurança associado ao escoamento da seção bruta
γ_{a2}	Coeficiente de segurança associado a ruptura fora da região da ligação
γ	Coeficiente de segurança que depende do item calculado
η	Coeficiente utilizado para o cálculo do coeficiente de flambagem local
λ_p	Índice de Esbeltez Reduzido
λ_{p0}	Índice de Esbeltez Reduzido associado a redução do coeficiente k
σ	Tensão normal
χ	Fator de Redução Associado à Resistência à Compressão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	13
3. CONCEITOS	14
3.1. TIPOS DE PERFIS	14
3.2. DEFINIÇÃO	14
3.3. MÉTODO DE PRODUÇÃO DOS PERFIS FORMADO A FRIO	15
3.4. APLICAÇÕES DOS PERFIS U SIMPLES	16
3.5. PROPRIEDADES	17
4. DIMENSIONAMENTO À TRAÇÃO DE PERFIL FORMADO À FRIO	18
4.1. TENSÃO E FORÇA	18
4.2. ÁREA LÍQUIDA EFETIVA	19
4.3. COEFICIENTE DE REDUÇÃO (C_t)	20
4.4. DIMENSIONAMENTO AO ELU	20
5. DIMENSIONAMENTO À COMPRESSÃO DE PERFIL FORMADO À FRIO	21
5.1. FORÇAS AXIAIS DE FLAMBAGEM ELÁSTICA.....	21
5.2. MÉTODO DA LARGURA EFETIVA (MLE)	23
5.2.1. Cálculo da Largura Efetiva	24
3.2.1.2. Redução do coeficiente de flambagem local para elementos AA	25
5.2.2. Cálculo da Área Efetiva.....	27
5.3. MÉTODO DA SEÇÃO EFETIVA (MSE).....	27
5.4. CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	28
5.5. DIMENSIONAMENTO AO ELU	28
6. METODOLOGIA.....	29
7. DIMENSIONAMENTO ANALÍTICO	30
7.1. TRAÇÃO.....	31

7.2.	COMPRESSÃO	32
7.2.1.	Método da Largura Efetiva	32
7.2.1.1.	Dimensões dos Elementos Erro! Indicador não definido.	
7.2.1.2.	Forças Normais de Flambagem Elástica	32
7.2.1.3.	Cálculo da tensão normal na área efetiva	33
7.2.1.4.	Cálculo da largura efetiva.....	33
7.2.1.4.1.	Elemento AL	33
7.2.1.4.2.	Elemento AA	34
7.2.1.5.	Cálculo da Área Efetiva.....	35
7.2.2.	Método da Seção Efetiva	35
7.2.2.1.	Força Axial de Flambagem Elástica.....	35
7.2.2.2.	Cálculo da Área Efetiva.....	36
7.2.3.	Área Efetiva	36
7.2.4.	Força Axial de Compressão Resistente de Cálculo	36
7.2.5.	Esbeltez Limite	36
7.3.	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	37
8.	CONCLUSÃO.....	38
	REFERÊNCIAS	39
	ANEXO A	40

1. INTRODUÇÃO

Tratando-se do dimensionamento de perfis U simples formado a frio, mais especificamente os utilizados em treliças, as principais verificações são quanto a capacidade resistente à compressão e à tração.

No que diz respeito ao processo de cálculo, a ABNT NBR 14762:2010 - “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio” deve ser seguida para a verificação. É importante destacar que o processo de dimensionamento desses perfis, seja para tração ou compressão, consiste em avaliar a necessidade ou não de redução da área bruta da seção.

Para o processo de dimensionamento à tração, a ruptura é analisada através da redução da área da seção em função da concentração de tensão na ligação, e o escoamento é calculado utilizando uma seção fora da ligação. Após o processo de dimensionamento, a menor resistência entre as duas análises é a resistência do perfil.

Quanto a compressão, a esbeltez é um elemento crucial para a redução das áreas utilizadas na resistência. Além disso, dois métodos, sendo eles o Método da Seção Efetiva (MSE) e Método da Largura Efetiva (MLE), são utilizados, e, semelhante ao cálculo da tração, o menor valor entre os dois resultados é a resistência à compressão do perfil.

Entendendo as inúmeras operações matemáticas necessárias para o dimensionamento, e analisando uma situação no qual o engenheiro necessite de uma resposta econômica e segura (não somente um perfil que passou no dimensionamento), o presente trabalho consiste em desenvolver uma planilha no Microsoft Excel® que permita a escolha de um perfil U formado a frio em função da porcentagem de utilização do perfil.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é desenvolver uma rotina computacional por meio do Microsoft Excel® baseado na ABNT NBR 14762:2010 - “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio” capaz de fornecer uma base para o engenheiro escolher um perfil U simples formado a frio levando em consideração os esforços atuantes, os comprimentos, as condições de vinculação e o material estrutural.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Entender as prescrições normativas para os perfis formado a frio.
- Desenvolver uma rotina computacional para verificação de perfis U simples seguindo prescrições normativas.
- Verificar a rotina computacional através de análise analítica.

3. CONCEITOS

3.1. TIPOS DE PERFIS

Segundo Carvalho (2020) os perfis estruturais utilizados na construção civil estão subdivididos em três grupos:

1º Grupo: Perfis Laminados: perfis laminados a quente, em usinas siderúrgicas.

2º Grupo: Perfis Soldados: perfis obtidos por soldagem de chapas (tiras de chapas).

3º Grupo: Perfis Formados a Frio (PFF): objeto deste trabalho. (CARVALHO, 2020, p.35).

Como motivo para separação dos grupos, é importante entender as normativas brasileiras para o cálculo de estruturas metálicas.

Nos perfis dos 1º e 2º grupo, a norma utilizada para o cálculo da resistência é a ABNT NBR 8800:2008. Algo que para Fakury (2016) pode ser atribuído ao processo de fabricação, a laminação. Ressalva-se que mesmo o 2º grupo sendo composto por perfis soldados, as chapas utilizadas na construção do perfil foram obtidas pelo processo de laminação, e não passam por nenhum processo de dobra.

Quanto aos perfis do 3º grupo, a normativa utilizada é a ABNT NBR 14762:2010. A necessidade de utilizar esse tipo de grupo é quando a chapa passa por o processo de dobra.

3.2. DEFINIÇÃO

De acordo com Pravia (2013) os PFF são elementos obtidos pelo processo do dobramento a frio (temperatura ambiente) de chapas de aço. Apesar dos perfis serem padronizados, ou seja, seções nas quais suas dimensões estão prescritas na ABNT NBR 6355:2002, podem ser produzidos de acordo com o formato e dimensão requerida, necessitando do desenho da seção transversal para as fabricas de PFF executarem o perfil.

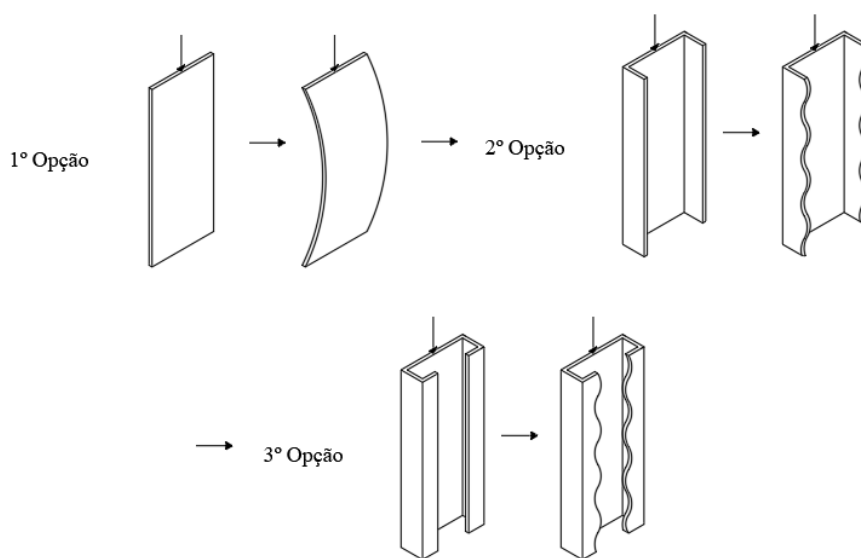
O segredo, para Carvalho (2020), da utilização de PFF é enrijecer onde existe a possibilidade de ocorrer flambagem local. Utilizando o exemplo da Figura 1, a afirmação de Carvalho (2020) pode ser melhor entendida.

Ao aumentar continuamente a carga sob uma chapa dá-se início ao processo de flambagem, não possuindo o elemento uma boa rigidez para a situação exemplificada (1º opção da Figura 1).

Como forma de enrijecer a chapa pode-se optar por realizar uma dobra nas suas extremidades, aumentando a sua carga crítica (2º opção da Figura 1).

É importante destacar que mesmo estando com uma mesa, a qual aumenta a carga crítica, o perfil da 2º opção pode flambar, e uma solução para, novamente, aumentar a sua carga crítica é realizar mais uma dobra na extremidade da mesa (3º opção da Figura 1).

Figura 1 - Processo de enrijecimento de um perfil formado a frio.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2020).

3.3. MÉTODO DE PRODUÇÃO DOS PERFIS FORMADO A FRIO

Os PFF são normalmente obtidos através de prensas dobradeiras (Figura 2). Nesse processo, segundo Carvalho (2020), uma punção provocada pela máquina pressiona a chapa contra a mesa para efetivar a dobra.

A utilização desse método por empresas produtoras se dá pela flexibilidade de se produzir diversos tipos de perfis, máquinas acessíveis e razoável mão de obra envolvida.

Figura 2 - Prensa dobradeira.



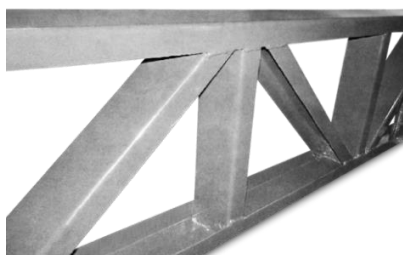
Fonte: Google¹ (2022)

3.4. APLICAÇÕES DOS PERFIS U SIMPLES

Os perfis U simples são empregados na construção de treliças de galpões, terças, contraventamentos, etc.

No que se refere às treliças (Figura 3), a principal solicitação atuante, devido à ligação rotulada nos nós, é a de tração e compressão, sendo esses dois esforços os estudados pelas formulações a seguir.

Figura 3 – Treliça composta por perfil U simples.



Fonte: Google² (2022)

¹ Prensa Dobradeira Viradeira Hidráulica 7m x 12 mm 600 toneladas Cincinnati - VN86. **VEJA MÁQUINAS**, 22 de jun. de 2021. Disponível em: < <https://www.vegamaquinas.com.br/prensa-dobradeira-viradeira-hidraulica-7m-x-12-mm-600-toneladas-cincinnati-vn86-pr-23809-229827.htm>>. Acesso em: 28 de jun. de 2022.

² Prensa Dobradeira Viradeira Hidráulica 7m x 12 mm 600 toneladas Cincinnati - VN86. **VEJA MÁQUINAS**, 22 de jun. de 2021. Disponível em: < <https://www.vegamaquinas.com.br/prensa-dobradeira-viradeira-hidraulica-7m-x-12-mm-600-toneladas-cincinnati-vn86-pr-23809-229827.htm>>. Acesso em: 28 de jun. de 2022.

3.5. PROPRIEDADES

ABNT NBR 14762:2010 normatiza as seguintes propriedades mecânicas, e os aços dispostos na Tabela 1:

Módulo de Elasticidade, $E = E_a = 200\,000\text{ MPa}$.

Coeficiente de Poisson, $\nu_a = 0,3$.

Módulo de Elasticidade Transversal, $G = 77\,000\text{ MPa}$.

Coeficiente de Dilatação Térmica, $\beta_a = 1,2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Massa específica, $\rho_a = 7\,850\text{ kg/m}^3$.

Resistência ao escoamento do aço, f_y .

Resistência a ruptura do aço, f_u .

Tabela 1 - Chapas finas de aço especificadas por normas brasileiras para uso estrutural.

Especificação	Grau	f_y (MPa)	f_u (MPa)
ABNT NBR 6649 / ABNT NBR 6650 Chapas finas (a frio/a quente) de aço-carbono	CF-26	260/260	400/410
	CF-28	280/280	440/440
	CF-30	---/300	---/490
ABNT NBR 5004 Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica	F-32/Q-32	310	410
	F-35/Q-35	340	450
	Q-40	380	480
	Q-42	410	520
	Q-45	450	550
ABNT NBR 5920 / ABNT NBR 5921 Chapas finas e bobinas finas (a frio/a quente), de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica	CFR 400	---/250	---/380
	CFR 500	310/370	450/490
ABNT NBR 7008 / ABNT NBR 7013 / ABNT NBR 14964 Chapas finas e bobinas finas com revestimento metálico	ZAR 250	250	360
	ZAR 280	280	380
	ZAR 320	320	390
	ZAR 345	345	430
	ZAR 400	400	450

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 14762:2010.

4. DIMENSIONAMENTO À TRAÇÃO DE PERFIL FORMADO À FRIO

4.1. TENSÃO E FORÇA

A tensão pode ser definida como “a intensidade de força que age normalmente à área” (HIBBELER, 2018, p. 17).

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (1)$$

Utilizando o conceito anterior, e admitindo que para a ruptura a tensão normal é a tensão limite de ruptura, a equação 1 pode ser reescrita como:

$$f_{lim} = \frac{N}{A} \quad (2)$$

Sendo a força normal máxima suportada por um perfil é igual a:

$$N = f_{lim} \cdot A \quad (3)$$

É importante destacar que normativamente devem ser considerados o escoamento da seção bruta, ruptura da seção líquida fora da região da ligação e ruptura da seção líquida na região da ligação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 14762, 2010).

a) Para escoamento da seção bruta

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{A_g \cdot f_y}{1,1} \quad (3)$$

b) Para a ruptura de furos e recortes fora da região de ligação

$$N_{t,Rd} = \frac{A_{n0} \cdot f_u}{\gamma_{a2}} = \frac{A_{n0} \cdot f_u}{1,35} \quad (5)$$

c) Para a ruptura na ligação da barra

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t \cdot A_{n0} \cdot f_u}{\gamma} = \frac{C_t \cdot A_{n0} \cdot f_u}{1,65} \quad (6)$$

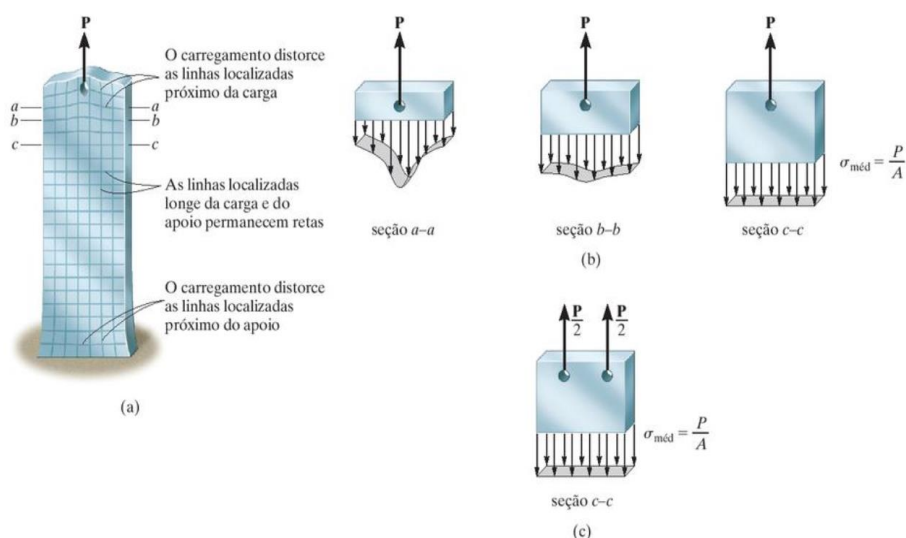
Tais considerações normativas podem ser explicadas de acordo com Hibbeler (2018). Para o autor, estando uma seção submetida a um esforço normal, algumas considerações necessitam serem feitas quanto a distribuição da tensão ao longo da barra.

Na seção a-a, onde o esforço é aplicado em uma pequena porção da peça, ocorre um pico da tensão atuante devido a concentração de tensão. Comparando o exemplo da seção a-a demonstrada na Figura 4-b com a ABNT NBR 14762:2010, a concentração da tensão faz com que ocorra uma tendência de ruptura da seção naquela região, e, devido a isso, a equação 6 da norma deve ser utilizada.

Para a seção c-c, segundo Hibbeler (2018), em uma seção distante da aplicação da força, a uma distância igual a maior largura da seção (não a espessura), a tensão pode ser admitida como constante, sendo esse comportamento denominado princípio de Saint-Venant. Nas situações de tensão constante, a ruptura do perfil se dá pelo processo de escoamento da seção, fazendo com que a região necessite ser analisada pela equação 4.

Quanto a equação 5, o exemplo de Hibbeler (2018) não contém uma explicação. Contudo, esse tipo de ruptura pode ser considerado em furos realizados distantes da região da ligação.

Figura 4 – Distribuição de tensão.

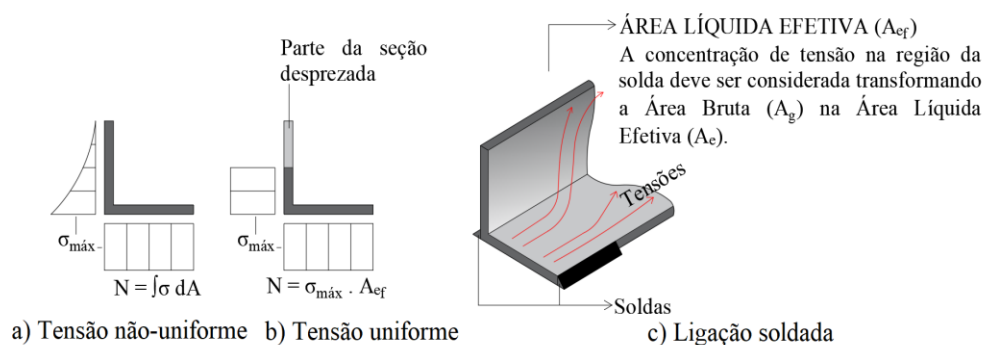


Fonte: Hibbeler (2018).

4.2. ÁREA LÍQUIDA EFETIVA

Como maneira de considerar a concentração de tensão que ocorre nas seções próximas as soldas, Fakury (2016) ressalva que a tensão não-uniforme pode ser substituída por uma tensão constante que atua apenas em uma parte da seção transversal (Figura 5).

Figura 5 – Comportamento de cantoneira conectada por uma aba.



Fonte: Adaptado de Fakury (2016).

Desse modo, a área da seção considerada no cálculo da ruptura da ligação passa a não ser igual a área bruta (A_g), e sim a multiplicação da área bruta por um coeficiente de redução (C_t).

$$A_{ef} = A_g \cdot C_t \quad (7)$$

4.3. COEFICIENTE DE REDUÇÃO (C_t)

De acordo com a ABNT NBR 14762:2010, ligações soldadas em perfis U devem ter os coeficientes de redução calculados por:

- apenas soldas transversais

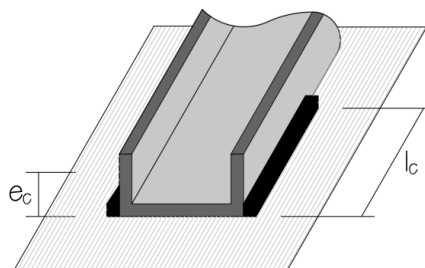
$$C_t = 1 \quad (8)$$

- perfis U com soldas longitudinais

$$C_t = 1,0 - 0,36 \cdot (e_c/l_c) < 0,9 \quad (9)$$

A Figura 6 dispõe das grandezas necessárias para o cálculo do coeficiente.

Figura 6 – Grandezas para o cálculo do coeficiente C_t .



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 14762:2010.

4.4. DIMENSIONAMENTO AO ELU

A ABNT NBR 14762:2010 prescreve que para o dimensionamento do perfil a seguinte condição deve ser atendida:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (10)$$

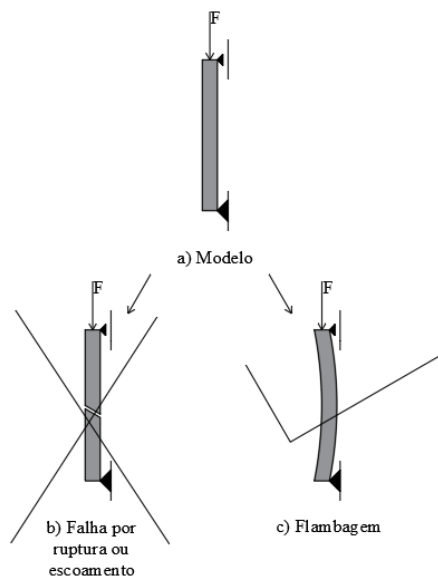
5. DIMENSIONAMENTO À COMPRESSÃO DE PERFIL FORMADO À FRIJO

Os dimensionamentos de barras comprimidas são considerados os colapsos devido à instabilidade da barra (forças axiais de flambagem elástica) e flambagem local (reduções da área da seção).

5.1. FORÇAS AXIAIS DE FLAMBAGEM ELÁSTICA

Estando uma barra submetida a um esforço de compressão, para Hibbeler (2018), pode-se imaginar que ao elevar a força de compressão atuante em uma barra pode ocorrer o escoamento ou a falha do material. Entretanto, quando a carga crítica é atingida, a coluna está na iminência de se tornar instável, sendo esse comportamento denominado de flambagem (Figura 7).

Figura 7 – Barras comprimidas não escoam ou rompem, e sim flambam.



Fonte: Autor (2022)

Como forma de considerar a força axial máxima para os perfis U (monossimétricos), a ABNT NBR 14762:2010 dispõe das seguintes equações:

a) Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E_a \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} \quad (11)$$

b) Força normal de flambagem elástica por flexo-torção:

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2 \cdot [1 - (x_0/r_0)^2]} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{ez} \cdot [1 - (x_0/r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] \quad (12)$$

Sendo N_{ex} e N_{ez} forças normais de flambagem elástica dada por:

a) Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo x:

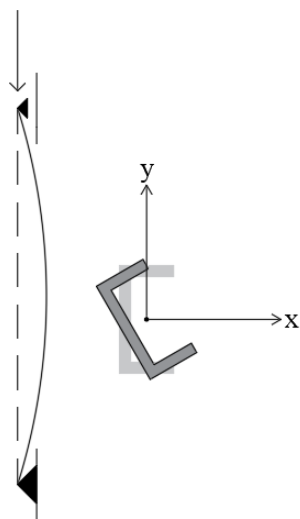
$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E_a \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} \quad (13)$$

b) Força normal de flambagem elástica por torção:

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 \cdot E_a \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + G_a \cdot J \right] \quad (14)$$

Por ser um perfil monossimétrico, ou seja, que possui apenas um eixo de simetria (eixo x), Carvalho (2020) destaca que existe uma interação entre a flexão e torção (Figura 8). Desse modo, quando o perfil flambear em torno do seu eixo de menor inércia (eixo y), a assimetria entre x e y fará com que surja uma rotação em torno do seu próprio eixo.

Figura 8 – Flambagem por flexo-torção.

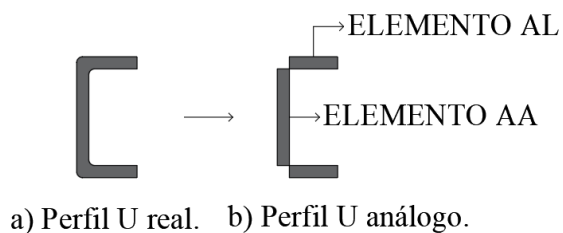


Fonte: Adaptado de Carvalho (2020).

5.2. MÉTODO DA LARGURA EFETIVA (MLE)

A análise da compressão de perfis U parte da redução da área bruta (A_g) da seção. No que se refere ao método da largura efetiva, para Carvalho (2020), cada elemento é tratado como uma placa isolada, passando após essa analogia a ser formado por três elementos, sendo composto por duas placas AL (mesas) e uma placa AA (alma) (Figura 9).

Figura 9 – Analogia do perfil U.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2020).

5.2.1. Cálculo da Largura Efetiva

De acordo com a ABNT NBR 14762:2010 para o cálculo da largura efetiva devem ser utilizadas as seguintes equações:

$$b_{ef} = b \text{ para } \lambda_p \leq 0,673 \quad (15)$$

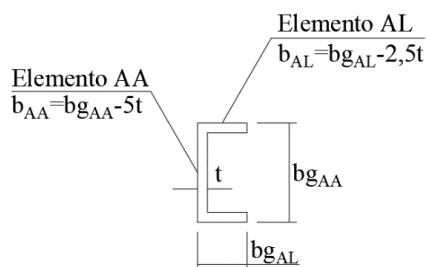
$$b_{ef} = b \cdot \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) / \lambda_p \text{ para } \lambda_p > 0,673 \quad (16)$$

O termo b corresponde a analogia dos elementos AA e AL (Figura 10), sendo para cada um:

$$b_{AL} = b_{gAA} - 2,5 \cdot t \quad (17)$$

$$b_{AA} = b_{gAL} - 5 \cdot t \quad (18)$$

Figura 10 – Espessura dos elementos.



Fonte: Autor (2022)

Quando ao termo λ_p , ele representa o índice de esbeltez reduzido e é calculado por:

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E_a}{\sigma}}} \quad (19)$$

k – coeficiente de flambagem local para elementos AA e AL (4 para elementos AA e 0,43 para elementos AL).

σ – tensão normal de compressão.

A tensão normal de compressão, de acordo com o item 9.2.2.1 da ABNT NBR 14762:2010 pode ser definida para o estado de instabilidade da barra como:

$$\sigma = \chi \cdot f_y \quad (20)$$

O fator de redução (χ) depende do índice de esbeltez reduzido (λ_0) calculado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g \cdot f_y}{N_e}} \quad (21)$$

Sendo N_e igual a menor força axial de flambagem elástica calculada, e o fator de redução (χ):

- para $\lambda_0 \leq 1,5$:

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (22)$$

- para $\lambda_0 > 1,5$:

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (23)$$

3.2.1.2. Redução do coeficiente de flambagem local para elementos AA

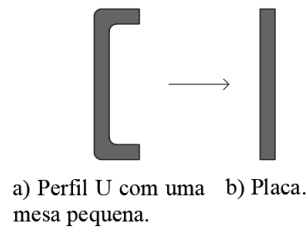
De acordo com Carvalho (2020), o coeficiente de flambagem local para elementos AA (alma) somente pode ser admitido como igual a 4 quando a mesa possuir uma largura suficiente para enrijecer a alma.

Isto significa que em um perfil U, mesmo sendo composto por uma alma e duas mesas, a mesa pode ser um elemento pequeno, não sendo capaz proporcionar um apoio efetivo para a alma do perfil.

Desse modo, como forma de avaliar a capacidade de apoio da mesa, quando os elementos AA necessitarem passar pelo processo de redução da largura, o coeficiente de flambagem local (k) deve ser ajustado para esses elementos.

A Figura 11 mostra um exemplo no qual devido à mesa ser pequena, o comportamento do perfil é mais próximo de uma única placa do que de um conjunto de placas.

Figura 11 – Perfil um com uma alma não enrijecida.



Fonte: Autor (2022)

Como forma de considerar esses efeitos, o coeficiente k deve ser reduzido a partir das seguintes equações:

- Índice de Esbeltez Reduzido do Elemento AA:

$$\lambda_{p0} = \frac{b_{AA}/t}{0,623 \cdot \sqrt{\frac{E_a}{\sigma}}} \quad (24)$$

- Momento inércia da seção do enrijecedor:

$$I_s = \frac{(t \cdot b_{AL}^3)}{12} \quad (25)$$

- Momento de inércia referente ao elemento enrijecido:

$$I_a = 399 \cdot t^4 \cdot [0,48 \cdot \lambda_{p0} - 0,328]^2 \leq t^4 [56 \cdot \lambda_{p0} + 5]^2 \quad (26)$$

- Coeficiente de flambagem local:

$$D/b = b_{gAL}/b_{AA} \quad (27)$$

$$n = (0,582 - 0,122 \cdot \lambda_{p0}) \geq 1/3 \quad (28)$$

$$k = 3,57 \cdot \left(\frac{I_s}{I_a}\right)^n + 0,43 \leq 4, \text{ para } D/b \leq 0,25, \text{ e sendo } I_s/I_a \leq 1 \quad (29)$$

$$k = (4,82 - 5 \cdot (D/b)) \cdot \left(\frac{I_s}{I_a}\right)^n + 0,43 \leq 4 \quad (30)$$

Para $0,25 < D/b \leq 0,8$, e sendo $I_s/I_a \leq 1$

5.2.2. Cálculo da Área Efetiva

Após o encontro da largura efetiva, a área efetiva (A_{ef}) deve ser calculada. Para isso, é necessário reduzir da área bruta a multiplicação da subtração da largura bruta pela largura efetiva pela espessura:

$$A_{ef,MLE} = A_g - t \cdot ((b_{AA} - bef_{AA}) + (b_{AL} - bef_{AL})) \quad (31)$$

5.3. MÉTODO DA SEÇÃO EFETIVA (MSE)

Segundo Carvalho (2020), o método da seção efetiva é um método alternativo para o cálculo da área efetiva do perfil. Nesse método, é determinada uma força de flambagem elástica, a qual serve como base para o cálculo da esbeltez reduzida (λ_p) e área efetiva.

A seguir é apresentado procedimento disposto pela ABNT NBR 14762:2010 para o cálculo da área efetiva pelo MSE.

- Força Axial de Flambagem Elástica:

$$N_l = k_l \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot (bg_{AA} / t)^2} \cdot A_g \quad (32)$$

- Esbeltez Reduzida:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\chi \cdot A_g \cdot f_y}{N_l}} \quad (33)$$

- Área Efetiva:

$$A_{ef,MSE} = A_g \cdot \left[1 - \frac{0,15}{\lambda_p^{0,8}} \right] \cdot \frac{1}{\lambda_p^{0,8}} \leq A_g \quad (34)$$

, para $\lambda_p > 0,673$

- Coeficiente de flambagem local (k_l)

$$\eta = bg_{AL} / bg_{AA} \quad (35)$$

$$k_l = 4,0 + 3,4\eta + 21,8\eta^2 - 174,3\eta^3 + 319,9\eta^4 - 237,6\eta^5 + 63,6\eta^6 \quad (36)$$

5.4. CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Segundo o item 9.7.2 da ABNT NBR 14762:2010 a força axial de compressão resistente de cálculo deve ser calculada por:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,2} \quad (37)$$

A área efetiva é o menor valor entre a área encontrada pelo MLE e MSE:

$$A_{ef} \leq \begin{cases} A_{ef,MLE} \\ A_{ef,MSE} \end{cases} \quad (38)$$

5.5. DIMENSIONAMENTO AO ELU

A ABNT NBR 14762:2010, item 9.7.1, prescreve que para o dimensionamento do perfil a seguinte condição deve ser atendida:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (39)$$

5.6. LIMITAÇÃO DA ESBELTEZ

Mesmo que uma seção resista aos esforços impostos, ela não pode exceder a esbeltez limite.

Para considerar isso, o item 9.7.4 da ABNT NBR 14762:2010 determina que:

$$\frac{KL}{r} \leq 200 \quad (40)$$

K - coeficiente de flambagem de elementos isolados.

r – raio de giração.

6. METODOLOGIA

Em posse dos dados perfis U simples mais utilizados pela indústria, o primeiro passo da pesquisa consistiu na organização das propriedades geométricas em planilha do Excel®.

As condições de apoio e carregamento são importantes para o dimensionamento. Desse modo, o comprimento da barra, tipo de apoio, esforços normais de tração e compressão foram inseridos em uma planilha a parte (planilha com os dados de entradas e porcentagem de utilização dos perfis).

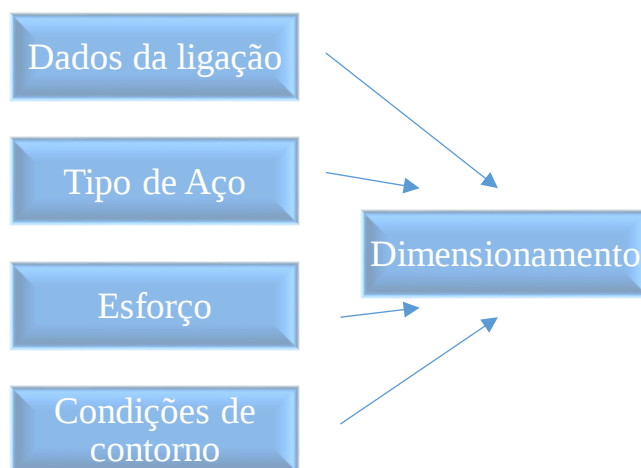
Como o desenvolvimento da rotina requer o cálculo de todos os perfis para que, posteriormente, um solver demonstre a porcentagem de cada perfil utilizado, é importante destacar que o dimensionamento foi feito para todos os perfis tabelados na planilha das propriedades geométricas.

Com o dimensionamento realizado, o próximo passo foi a criação de um solver capaz de copiar os dados da aba das propriedades geométricas dos perfis para a capa da planilha demonstrada no Apêndice A. É importante destacar que o solver organiza a planilha em função da porcentagem de utilização dos perfis.

Por fim, frisa-se que todo o cálculo é realizado quando o botão Dimensionamento (demonstrado no Apêndice A) é clicado, mostrando para o usuário as informações como nomenclatura do perfil, índice de esbeltez, esforço resistente e porcentagem de utilização do perfil.

Em suma, a planilha funciona como mostrado no esquema da Figura 12.

Figura 12 – Esquema representando o funcionamento da planilha.

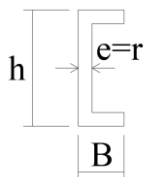


Fonte: Autor (2022)

7. DIMENSIONAMENTO ANALÍTICO

O principal resultado do trabalho é a criação de uma planilha capaz de dimensionar perfis U simples de acordo com a ABNT NBR 14762:2010. A título de conferência, a eficácia foi testada através do seguinte exemplo (Figura 13 e Tabela 2):

Figura 13 – Dimensões do Perfil U Simples.



Fonte: Autor (2022)

Tabela 2 - Dados do perfil.

NOMENCLATURA	U 150 x 50 x 2,65
Solda (cm)	1,00
Lx (cm)	100,00
Ly (cm)	100,00
Lz (cm)	100,00
Kx	1,00
Ky	1,00
Kz	1,00
Nc,Sd (kN)	10,00
Nt,Sd (kN)	60,00
AÇO	ZAR 250
fy (kN/cm ²)	25,00
fu (kN/cm ²)	36,00
h (mm)	150,00
B (mm)	50,00
e=r (mm)	2,65

Fonte: Autor (2022)

Tabela 3 - Dados do perfil (continuação).

A_g (cm ²)	6,37
P (kg/m)	5,00
I_x (cm ⁴)	204,10
W_x (cm ³)	27,20
r_x (cm)	5,65
x_{cg} (cm)	1,12
I_y (cm ⁴)	14,24
W_y (cm ³)	3,67
r_y (cm)	1,49
x_0 (cm)	2,61
r_0^2 (cm ²)	40,93
J (cm ⁴)	0,15
C_w (cm ⁶)	554,61

Fonte: Autor (2022)

7.1. TRAÇÃO

Para escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd,e} = \frac{A_g \cdot f_y}{1,1} = \frac{6,37 \cdot 25}{1,1} = 144,77 \text{ kN} \quad (41)$$

Coefficiente de Redução (C_t)

$$C_t = 1,0 - 0,36 \cdot (e_c/l_c) = 1,0 - 0,36 \cdot (1,12/1) = 0,60 \quad (42)$$

Para a ruptura na ligação da barra:

$$N_{t,Rd,r} = \frac{C_t \cdot A_{n0} \cdot f_u}{1,65} = \frac{0,60 \cdot 6,37 \cdot 36}{1,65} = 82,94 \text{ kN} \quad (43)$$

Força Axial de Tração Resistente de Cálculo:

$$N_{t,Rd} \leq \begin{cases} N_{t,Rd,e} \\ N_{t,Rd,r} \end{cases} = \begin{cases} 144,77 \text{ kN} \\ 82,94 \text{ kN} \end{cases} = 82,94 \text{ kN} \quad (44)$$

$$N_{t,Sd}/N_{t,Rd} = (60 / 82,94) \cdot 100 = 72,34\% \quad (45)$$

7.2.COMPRESSÃO

7.2.1. Método da Largura Efetiva

7.2.1.1. Largura dos elementos da seção

$$b_{AL} = b_{g_{AL}} - 2,5 \cdot t = 5 - 2,5 \cdot 0,265 = 4,34 \text{ cm} \quad (46)$$

$$b_{AA} = b_{g_{AA}} - 5 \cdot t = 15 - 5 \cdot 0,265 = 13,68 \text{ cm} \quad (47)$$

7.2.1.2. Forças Normais de Flambagem Elástica

Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo x (N_{ex}):

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E_a \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 204,10}{(1 \cdot 100)^2} = 4028,77 \text{ kN} \quad (48)$$

Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo y (N_{ey}):

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E_a \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 14,24}{(1 \cdot 100)^2} = 281,09 \text{ kN} \quad (49)$$

Força normal de flambagem elástica por torção (N_{ez}):

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 \cdot E_a \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + G_a \cdot J \right] \quad (50)$$

$$= \frac{1}{40,93} \left[\frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 554,61}{(1 \cdot 100)^2} + 7700 \cdot 0,15 \right] = 295,75 \text{ kN}$$

Força normal de flambagem elástica por flexo-torção (N_{exz}):

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2 \cdot [1 - (x_0/r_0)^2]} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{ez} \cdot [1 - (x_0/r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] = \frac{4028,77 + 295,75}{2 \cdot [1 - (2,61/6,397)^2]} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 4028,77 \cdot 295,75 \cdot [1 - (2,61/6,397)^2]}{(4028,77 + 295,75)^2}} \right] = 291,95 \text{ kN} \quad (51)$$

Força normal de flambagem elástica (N_e):

$$N_e \leq \begin{cases} N_{ey} \\ N_{exz} \end{cases} \leq \begin{cases} 281,09 \text{ kN} \\ 291,95 \text{ kN} \end{cases} = 281,09 \text{ kN} \quad (52)$$

7.2.1.3. Cálculo da tensão normal na área efetiva

Índice de esbeltez reduzido (λ_0):

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g \cdot f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{6,37 \cdot 25,00}{281,09}} = 0,75 \quad (53)$$

Fator de Redução Associado à Resistência à Compressão (χ):

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{0,75^2} = 0,79 \quad (54)$$

Tensão normal de compressão:

$$\sigma = \chi \cdot f_y = 0,79 \cdot 25,00 = 19,72 \text{ kN/cm}^2 \quad (55)$$

7.2.1.4. Cálculo da largura efetiva

7.2.1.4.1. Elemento AL

$$\frac{b_{AL}}{t} = \frac{4,34}{0,265} = 16,37 \quad (56)$$

Índice de esbeltez reduzido (λ_p):

$$\lambda_{p,AL} = \frac{b/t}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E_a}{\sigma}}} = \frac{16,37}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{0,43 \cdot 20000}{19,72}}} = 0,82 \quad (57)$$

Largura Efetiva (b_{ef}):

$$b_{ef,AL} = b \cdot \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) / \lambda_p = 4,34 \cdot \left(1 - \frac{0,22}{0,82}\right) / 0,82 = 3,85 \text{ cm} \quad (58)$$

Largura Reduzida:

$$b_{red,AL} = b_{AL} - b_{ef,AL} = 4,34 - 3,85 = 0,49 \text{ cm} \quad (59)$$

Momento inércia da seção do enrijecedor (I_s):

$$I_s = \frac{(t \cdot b_{AL}^3)}{12} = \frac{(0,265 \cdot 4,34^3)}{12} = 1,80 \text{ cm}^2 \quad (60)$$

7.2.1.4.2. Elemento AA

$$\frac{b_{AA}}{t} = \frac{13,68}{0,265} = 51,60 \quad (61)$$

Índice de Esbeltez Reduzido do Elemento AA (λ_{p0}):

$$\lambda_{p0} = \frac{b_{AA}/t}{0,623 \cdot \sqrt{\frac{E_a}{\sigma}}} = \frac{51,60}{0,623 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 20000}{19,72}}} = 2,60 \quad (62)$$

Momento de inércia referente ao elemento enrijecido (I_a):

$$\begin{aligned} I_a &= 399 \cdot t^4 \cdot [0,48 \cdot \lambda_{p0} - 0,328]^2 \leq t^4 [56 \cdot \lambda_{p0} + 5]^2 \\ &= 399 \cdot 0,265^4 \cdot [0,48 \cdot 2,60 - 0,328]^2 \leq 0,265^4 [56 \cdot 2,60 + 5]^2 \\ &= 0,74 \text{ cm}^4 \end{aligned} \quad (63)$$

Coeficiente de flambagem local (k):

$$D/b = b_{gAL}/b_{AA} = 5/13,68 = 0,37 \quad (64)$$

$$\begin{aligned} n &= (0,582 - 0,122 \cdot \lambda_{p0}) \geq 1/3 \\ &= (0,582 - 0,122 \cdot 2,60) = 0,26 = 0,33 \end{aligned} \quad (65)$$

$$\begin{aligned} I_s/I_a &\leq 1 \\ &= 1,80/0,74 = 2,43 = 1,00 \end{aligned} \quad (66)$$

$$\begin{aligned}
 k &= (4,82-5 \cdot (D/b)) \cdot \left(\frac{I_s}{I_a}\right)^n + 0,43 \\
 &= (4,82-5 \cdot (0,37)) \cdot (1)^{0,33} + 0,43 = 3,42
 \end{aligned} \tag{67}$$

Índice de esbeltez reduzido (λ_p):

$$\lambda_{p,AA} = \frac{b/t}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E_a}{\sigma}}} = \frac{51,60}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{3,42 \cdot 20000}{19,72}}} = 0,92 \tag{68}$$

Largura Efetiva:

$$b_{ef,AA} = b \cdot \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) / \lambda_p = 13,68 \cdot \left(1 - \frac{0,22}{0,92}\right) / 0,92 = 11,29 \text{ cm} \tag{69}$$

Largura Reduzida:

$$b_{red,AA} = b_{AA} - b_{ef,AA} = 13,68 - 11,29 = 2,39 \text{ cm} \tag{70}$$

7.2.1.5. Cálculo da Área Efetiva

$$\begin{aligned}
 A_{ef,MLE} &= A_g - t \cdot (b_{ef,AA} + b_{ef,AL}) \\
 &= 6,37 - 0,265 \cdot (2,39 + 0,49) = 5,48 \text{ cm}^2
 \end{aligned} \tag{71}$$

7.2.2. Método da Seção Efetiva

7.2.2.1. Força Axial de Flambagem Elástica

Coeficiente de flambagem local (k_l):

$$\eta = b_{g,AL} / b_{g,AA} = 50/150 = 0,33 \tag{72}$$

$$\begin{aligned}
 k_l &= 4,0 + 3,4\eta + 21,8\eta^2 - 174,3\eta^3 + 319,9\eta^4 - 237,6\eta^5 + 63,6\eta^6 = \\
 &= 4,0 + 3,4 \cdot 0,33 + 21,8 \cdot 0,33^2 - 174,3 \cdot 0,33^3 \\
 &\quad + 319,9 \cdot 0,33^4 - 237,6 \cdot 0,33^5 + 63,6 \cdot 0,33^6 = 4,17
 \end{aligned} \tag{73}$$

Força Axial de Flambagem Elástica (N_l):

$$N_l = k_l \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot (b_{g_{AA}} / t)^2} \cdot A =$$

$$k_l \cdot \frac{\pi^2 \cdot 20000}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot (15 / 0,265)^2} \cdot 6,37 = 149,86 \text{ kN} \quad (74)$$

7.2.2.2. Cálculo da Área Efetiva

Esbeltez Reduzida (λ_p):

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\chi \cdot A_g \cdot f_y}{N_l}} = \sqrt{\frac{0,79 \cdot 6,37 \cdot 25}{149,86}} = 0,91 \quad (75)$$

Área Efetiva (A_{ef}):

$$A_{ef,MSE} = A_g \cdot \left[1 - \frac{0,15}{0,91^{0,8}} \right] \cdot \frac{1}{0,91^{0,8}} = 5,73 \text{ cm}^2 \quad (76)$$

7.2.3. Área Efetiva

$$A_{ef} \leq \begin{cases} A_{ef,MLE} \\ A_{ef,MSE} \end{cases} \leq \begin{cases} 5,48 \text{ cm}^2 \\ 5,73 \text{ cm}^2 \end{cases} = 5,48 \text{ cm}^2 \quad (77)$$

7.2.4. Força Axial de Compressão Resistente de Cálculo

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{1,2} = \frac{0,79 \cdot 5,48 \cdot 25000}{1,2} = 90,19 \text{ kN} \quad (78)$$

$$N_{c,Sd}/N_{c,Rd} = (10 / 90,19) \cdot 100 = 11,10\% \quad (79)$$

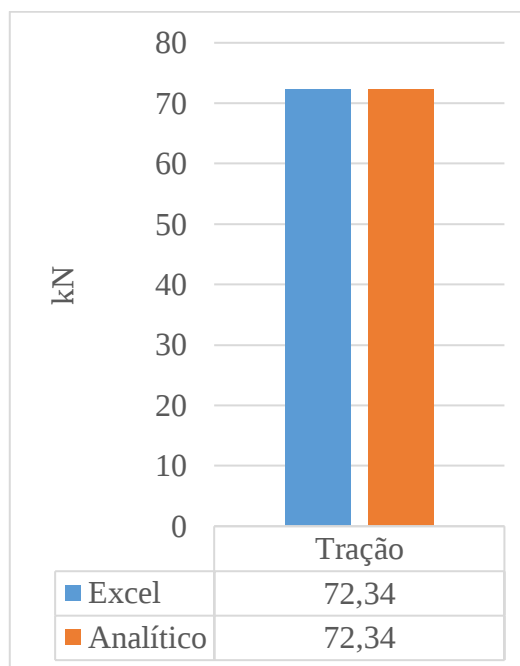
7.2.5. Esbeltez Limite

$$\frac{KL}{r} = \frac{1 \cdot 100}{1,49} = 67,11 \quad (80)$$

7.3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

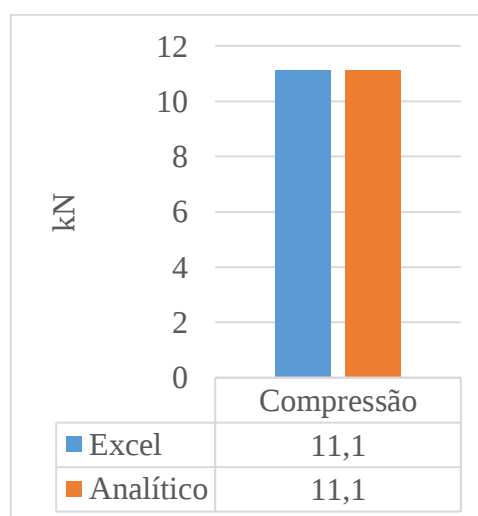
A seguir estão dispostos os resultados encontrados na análise analítica disposta no item 7.2 e na análise analítica via planilha no Microsoft Excel® (Figuras 14 e 15). Destaca-se que no Apêndice A consta o memorial emitido pela planilha para o dimensionamento dos diversos perfis cadastrados.

Figura 14 – Dimensionamento à tração.



Fonte: Autor (2022)

Figura 15 – Dimensionamento à compressão.



Fonte: Autor (2022)

8. CONCLUSÃO

O trabalho consistiu em desenvolver uma planilha no *Microsoft Excel*® capaz de dimensionar à compressão e à tração de perfis U simples formado a frio. Para verificação, um exemplo analítico foi resolvido, e os valores encontrados foram semelhantes ao calculados pela planilha.

Quanto ao contexto da elaboração do trabalho, ele permitiu ampliar os conceitos sobre o dimensionamento de perfis U, permitindo que em um cenário futuro, a planilha possa ser utilizada para o dimensionamento de treliças de galpões. Além disso, entendendo que grande parte dos engenheiros civis utilizam a ABNT NBR 8800:2008 - “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios”, uma norma não recomendada para os PFF, espera-se que o trabalho sirva como uma introdução ao cálculo de perfis formados a frio utilizando a ABNT NBR 14762:2010 - “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio”.

Como proposta para trabalhos seguintes, espera-se que versões posteriores da planilha incluam uma interface gráfica mostrando o perfil selecionado com as suas dimensões, um relatório de dimensionamento com o passo a passo possa ser exportado pelo usuário, e a otimização possa ser feita simultaneamente com diversos dados de carga, aço e comprimentos de perfis.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800:2008, Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, 2008.

CARVALHO, PAULO ROBERTO M. de. Curso básico de peris de aço formados a frio/ Paulo Roberto M. de Carvalho, Gladimir Grigoletti, Giovana Daltrozo Barbosa – 3.ed. – Porto Alegre: [s.n.], 2020.

FAKURY, RICARDO HALLAL. Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto/ Ricardo Hallal Fakury, Ana Lydia Reis de Castro e Silva, Rodrigo Barreto Calda – São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

HIBBELER, R.C. Resistência dos Materiais/ R.C. Hibbeler; [tradução Sérgio Nascimento]. – São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2018.

PRAVIA, Z. M. C. ; Ficanha, R. ; RF . Projeto e cálculo de estruturas de aço : Edifício industrial detalhado. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. v. 1. 251p .

APÊNDICE A

Figura 16 – Demonstração da planilha (Tração)

DIMENSIONAMENTO DE PERFIL U SIMPLES CHAPA DOBRADA					
DADOS DO PERFIL					
Solda (cm)	Lx (cm)	Ly (cm)	Lz (cm)	Kx	Ky
1	100	100	100	1	1
AÇO		Kz	DIMENSIONAMENTO		LIMPAR
ZAR 250			1		
fy (MPa)	fu (MPa)	ESFORÇOS			
25,00 kN/cm²	36,00 kN/cm²	Nc,Sd (kN)	10	Nt,Sd (kN)	60
TRAÇÃO					
NOMENCLATURA	P (kg/m)	λ	Nt,Rd,e (kN)	Nt,Rd,r (kN)	Sd/Rd
U 50 x 25 x 2	1,38	128,21	39,77	28,42	211,10%
U 50 x 25 x 2,25	1,62	129,87	47,05	33,29	180,21%
U 75 x 38 x 2	2,20	78,74	63,64	36,46	164,57%
U 50 x 25 x 2,65	1,86	129,87	54,09	37,91	158,28%
U 100 x 50 x 2	2,87	63,29	82,95	41,22	145,56%
U 50 x 25 x 3	2,10	129,87	60,68	42,11	142,50%
U 75 x 38 x 2,25	2,61	78,74	75,45	42,71	140,49%
U 100 x 40 x 2	2,57	81,30	74,32	46,43	129,22%
U 100 x 50 x 2,25	3,41	63,29	98,86	48,44	123,86%
U 75 x 38 x 2,65	3,01	79,37	87,27	48,79	122,96%
U 127 x 50 x 2	3,27	64,94	94,77	52,01	115,37%
U 75 x 38 x 3	3,41	79,37	98,86	54,59	109,91%
U 100 x 40 x 2,25	3,06	81,97	88,41	54,62	109,84%
U 100 x 50 x 2,65	3,95	63,29	114,55	55,33	108,43%
U 150 x 50 x 2	3,61	66,67	104,55	61,34	97,81%
U 127 x 50 x 2,25	3,90	65,36	112,95	61,59	97,42%
U 100 x 50 x 3	4,48	63,69	129,77	62,29	96,32%
U 100 x 40 x 2,65	3,54	81,97	102,50	62,62	95,81%
U 100 x 40 x 3	4,01	81,97	116,14	70,15	85,53%
U 127 x 50 x 2,65	4,52	65,36	130,91	70,48	85,13%
U 150 x 50 x 2,25	4,31	67,11	124,77	72,35	82,93%
U 75 x 38 x 4,75	5,09	80,65	147,27	76,74	78,18%
U 127 x 50 x 3	5,13	65,36	148,41	78,87	76,07%
U 200 x 50 x 2	4,39	70,92	126,14	81,42	73,69%
U 150 x 50 x 2,65	5,00	67,11	144,77	82,94	72,34%
U 150 x 50 x 3	5,68	67,11	164,32	93,57	64,12%
U 100 x 50 x 4,75	6,77	64,52	196,14	94,15	63,73%
U 200 x 50 x 2,25	5,20	70,92	150,68	96,22	62,35%
U 100 x 40 x 4,75	6,02	83,33	174,32	100,47	59,72%
U 200 x 50 x 2,65	6,04	70,92	175,00	110,54	54,28%
U 127 x 50 x 4,75	7,78	66,23	225,23	113,47	52,88%
U 200 x 50 x 3	6,87	71,43	198,86	124,93	48,03%
U 150 x 50 x 4,75	8,64	68,03	250,23	135,58	44,25%
U 200 x 50 x 4,75	10,51	72,46	304,32	182,77	32,83%

Fonte: Autor (2022)

Figura 17 – Demonstração da planilha (Compressão)

DIMENSIONAMENTO DE PERFIL U SIMPLES CHAPA DOBRADA						
DADOS DO PERFIL						
Solda (cm) 1	Lx (cm) 100	Ly (cm) 100	Lz (cm) 100	Kx 1	Ky 1	Kz 1
AÇO		ESFORÇOS				
ZAR 250		Nc,Sd (kN) 10		Nt,Sd (kN) 60		
fy (MPa) 25	fu (MPa) 36					
COMPRESSÃO						
NOMENCLATURA	P (kg/m)	Ag (cm²)	Aef (cm²)	λ	Nc,Rd (kN)	Sd/Rd
U 50 x 25 x 2	1,38	1,75	1,75	127,89	15,32	65,27%
U 50 x 25 x 2,25	1,62	2,07	2,07	128,17	18,05	55,40%
U 50 x 25 x 2,65	1,86	2,38	2,38	129,01	20,52	48,73%
U 50 x 25 x 3	2,10	2,67	2,67	129,59	22,84	43,78%
U 75 x 38 x 2	2,20	2,80	2,73	94,05	35,62	28,07%
U 100 x 40 x 2	2,57	3,27	2,93	81,70	42,86	23,33%
U 75 x 38 x 2,25	2,61	3,32	3,32	93,51	43,51	22,98%
U 100 x 50 x 2	2,87	3,65	2,85	75,58	43,94	22,76%
U 127 x 50 x 2	3,27	4,17	3,03	68,46	49,21	20,32%
U 150 x 50 x 2	3,61	4,60	3,13	66,44	51,59	19,38%
U 75 x 38 x 2,65	3,01	3,84	3,84	87,91	53,11	18,83%
U 200 x 50 x 2	4,39	5,55	3,33	70,39	53,36	18,74%
U 100 x 40 x 2,25	3,06	3,89	3,83	82,36	55,69	17,96%
U 100 x 50 x 2,25	3,41	4,35	3,96	76,89	60,31	16,58%
U 75 x 38 x 3	3,41	4,35	4,35	83,83	62,44	16,01%
U 127 x 50 x 2,25	3,90	4,97	4,04	69,85	65,00	15,39%
U 100 x 40 x 2,65	3,54	4,51	4,51	81,68	65,97	15,16%
U 150 x 50 x 2,25	4,31	5,49	4,21	66,74	69,23	14,44%
U 200 x 50 x 2,25	5,20	6,63	4,55	70,66	72,78	13,74%
U 100 x 40 x 3	4,01	5,11	5,11	81,94	74,57	13,41%
U 100 x 50 x 2,65	3,95	5,04	4,82	74,81	74,68	13,39%
U 127 x 50 x 2,65	4,52	5,76	5,21	68,45	84,72	11,80%
U 100 x 50 x 3	4,48	5,71	5,66	73,34	88,72	11,27%
U 150 x 50 x 2,65	5,00	6,37	5,48	66,88	90,11	11,10%
U 200 x 50 x 2,65	6,04	7,70	5,94	70,90	94,86	10,54%
U 75 x 38 x 4,75	5,09	6,48	6,48	80,50	95,75	10,44%
U 127 x 50 x 3	5,13	6,53	6,45	67,61	105,53	9,48%
U 100 x 40 x 4,75	6,02	7,67	7,67	83,16	110,75	9,03%
U 150 x 50 x 3	5,68	7,23	6,75	67,05	110,86	9,02%
U 200 x 50 x 3	6,87	8,75	7,34	71,10	117,01	8,55%
U 100 x 50 x 4,75	6,77	8,63	8,63	64,27	144,43	6,92%
U 127 x 50 x 4,75	7,78	9,91	9,91	66,13	163,74	6,11%
U 150 x 50 x 4,75	8,64	11,01	11,01	67,96	179,57	5,57%
U 200 x 50 x 4,75	10,51	13,39	13,39	72,10	211,77	4,72%

Fonte: Autor (2022)