

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE PLANILHAS ELETRÔNICAS
PARA DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE PERFIS
LAMINADOS SUBMETIDOS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO E
COMPRESSÃO CONFORME ABNT NBR 8800:2024**

VINICIUS MARTINS BASTOS DE ARAÚJO

UBERLÂNDIA - MG
2025

VINICIUS MARTINS BASTOS DE ARAÚJO

**DESENVOLVIMENTO DE PLANILHAS ELETRÔNICAS PARA
DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE PERFIS LAMINADOS
SUBMETIDOS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO
CONFORME ABNT NBR 8800:2024**

Projeto de fim de curso apresentado junto ao programa de **Graduação em Engenharia Mecânica** da **Universidade Federal de Uberlândia**, como requisito parcial à obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Orientador:

Prof. Dr. Ricardo Humberto de Oliveira Filho.

UBERLÂNDIA - MG

2025

AGRADECIMENTOS

Minha formação e este projeto só foram possíveis graças a contribuição de muitas pessoas, às quais tenho imensa gratidão.

Em primeiro lugar, agradeço à minha família, em especial meus pais, Carlos e Kátia, e minha irmã, Gabriela, por terem sido os pilares da minha formação, pelo apoio e amor incondicional

Ao meu orientador, Prof. Ricardo Humberto de Oliveira Filho, pela pronta iniciativa em me guiar neste trabalho, pelos ensinamentos em sala de aula e por todo o tempo dedicado à minha orientação.

À minha namorada, Clara, pelo companheirismo, compreensão e amor, por ter sido minha referência nos últimos anos, como amiga, parceira e estudante de engenharia.

Ao meu amigo Gustavo, que tenho como irmão, com o qual partilhei muitos momentos bons e por diversas vezes foi meu apoio nas adversidades.

Enfim, a todos os meus amigos e a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a realização deste projeto, fica o meu agradecimento.

RESUMO

As estruturas de aço utilizando perfis laminados são fundamentais na engenharia moderna, e seu dimensionamento é regido no Brasil pela norma ABNT NBR 8800, que recentemente passou por um processo de revisão, tendo sua última versão publicada em 02/10/2024. Contudo, a aplicação da norma pode ser didaticamente complexa e pouco intuitiva, dificultando seu estudo e uso prático. Este trabalho objetiva desenvolver uma ferramenta computacional, na forma de planilhas eletrônicas, para automatizar e facilitar o dimensionamento de perfis laminados I, U e cantoneiras (L) submetidos a esforços axiais de tração e compressão. A metodologia envolveu a criação de duas planilhas no MS Excel, implementando as rotinas de cálculo das seções 5.2 e 5.3 da NBR 8800, integrando catálogos de perfis adaptados do AISC Shapes Database. A validação da ferramenta foi realizada comparando seus resultados com exemplos da literatura técnica e modelos em CAD, demonstrando alta precisão com erros percentuais mínimos. Conclui-se que as planilhas desenvolvidas são uma ferramenta confiável e didática, otimizando o processo de dimensionamento e servindo como um recurso eficaz para fins acadêmicos e profissionais.

Palavras-chave: Dimensionamento de estruturas metálicas; Perfis Laminados; NBR 8800:2024

ABSTRACT

Hot-rolled steel structures are fundamental to modern engineering, and their design is governed in Brazil by the ABNT NBR 8800 standard, which recently underwent a revision process, with its latest version published on October 2, 2024. However, applying the standard can be didactically complex and unintuitive, hindering its study and practical use. This work aims to develop a computational tool, in the form of electronic spreadsheets, to automate and facilitate the design of hot-rolled I, channel, and angle profiles subjected to axial tensile and compressive forces. The methodology involved creating two spreadsheets in MS Excel, implementing the calculation routines from sections 5.2 and 5.3 of NBR 8800, integrating profile catalogs adapted from the AISC Shapes Database. The tool was validated by comparing its results with examples from the technical literature and CAD models, demonstrating high accuracy with minimal percentage errors. It is concluded that the developed spreadsheets are a reliable and didactic tool, optimizing the sizing process and serving as an effective resource for academic and professional purposes.

Keywords: Project of metal structures; Hot-rolled Profiles; NBR 8800:2024.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Geometria do perfil I | 18 |
| Figura 2.2 – Geometria da cantoneira | 18 |
| Figura 2.3 – Geometria do perfil U | 19 |
| Figura 2.4 – Variáveis s e g | 21 |
| Figura 2.5 – Exemplo de ec para cantoneiras | 23 |
| Figura 3.1 – Menu de navegação | 31 |
| Figura 3.2 – Seção de dados de entrada | 32 |
| Figura 3.3 – Seção de resumo dos resultados | 32 |
| Figura 3.4 – Seção de propriedades do material | 33 |
| Figura 3.5 – Seção de propriedades geométricas | 33 |
| Figura 3.6 – Subseção de cálculo da força axial de flambagem para perfis I | 35 |
| Figura 3.7 – Subseção de cálculo da força axial de flambagem para perfis U | 35 |
| Figura 3.8 – Subseção de cálculo da força axial de flambagem para cantoneiras | 36 |
| Figura 3.9 – Subseção do cálculo do índice de esbeltez reduzido | 36 |
| Figura 3.10 – Subseção de cálculo do fator de redução | 37 |
| Figura 3.11 – Utilização de células diferentes para o valor de λ_0 | 38 |
| Figura 3.12 – Subseção de cálculo de parâmetros auxiliares | 39 |
| Figura 3.13 – Subseção de cálculo da largura e área efetivas | 40 |
| Figura 3.14 – Subseção de cálculo da área efetiva do perfil I | 41 |
| Figura 3.15 – Subseção de cálculo da área efetiva do perfil U | 42 |
| Figura 3.16 – Seção de apresentação dos resultados | 43 |
| Figura 3.17 – Catálogo de perfis U - Adaptado de AISC Shapes Manual V16.0 | 43 |
| Figura 3.18 – Tabela 3 - Adaptado de NBR 8800:2024 | 44 |
| Figura 3.19 – Interface de configuração para furos simples | 45 |
| Figura 3.20 – Interface de configuração para furos em zigue-zague | 45 |
| Figura 3.21 – Configuração de um exemplo para furos simples | 46 |
| Figura 3.22 – Área líquida calculada para o exemplo proposto | 46 |
| Figura 3.23 – Esboço do perfil em CAD para o exemplo proposto | 47 |
| Figura 3.24 – Resultado do cálculo da área no <i>software</i> de CAD | 47 |
| Figura 3.25 – Seção de entrada de dados com configuração de colapso por rasgamento | 48 |
| Figura 3.26 – Seção de verificação de colapso por rasgamento | 48 |
| Figura 4.1 – Configuração do exemplo para perfil I na planilha | 49 |
| Figura 4.2 – Resultados do exemplo para perfil I na planilha | 50 |
| Figura 4.3 – Configuração do exemplo para compressão em cantoneira na planilha | 51 |
| Figura 4.4 – Resultados do exemplo para compressão em cantoneira na planilha | 51 |
| Figura 4.5 – Resultados da validação para compressão em perfis U | 52 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.6 – Configuração na planilha para tração do perfil U de exemplo | 53 |
| Figura 4.7 – Configuração de furos na interface para tração do perfil U de exemplo . | 53 |
| Figura 4.8 – Cálculo das áreas para o problema proposto de tração do perfil U . . . | 54 |
| Figura 4.9 – Resultado para o problema proposto de tração do perfil U | 54 |
| Figura 4.10–Configuração do problema proposto para tração em cantoneiras | 55 |
| Figura 4.11–Resultado do problema proposto para tração em cantoneiras - C_t . . . | 56 |
| Figura 4.12–Resultado do problema proposto para tração em cantoneiras - A_n . . . | 56 |
| Figura 4.13–Resultado do problema proposto para tração em cantoneiras - $N_{t,Rd}$. . | 56 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 – Aços de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural . . | 16 |
| Tabela 2.2 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências (γ_m) - NBR 8800:2024. | 17 |
| Tabela 2.3 – Valores de $((b/t)_{lim})$ | 27 |
| Tabela 2.4 – Fatores c_1 e c_2 para cálculo de flambagem local | 28 |
| Tabela 4.1 – Dados inseridos no catálogo para validação comparativa | 52 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AISC | American Institute of Steel Construction |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CAD | Computer Aided Design |
| CSN | Companhia Siderúrgica Nacional |
| FEM | Fábrica de Estruturas Metálicas |
| NBR | Norma Brasileira |
| TICs | Tecnologias de Informação e Comunicação |
| UFRJ | Universidade Federal do Rio de Janeiro |
| UFMG | Universidade Federal de Minas Gerais |
| UFU | Universidade Federal de Uberlândia |
| VBA | Visual Basic Application |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.1 | A norma ABNT 8800:2024 | 15 |
| 2.1.1 | Dimensionamento a tração de perfis I, U e cantoneiras | 17 |
| 2.1.2 | Escoamento da seção bruta | 20 |
| 2.1.3 | Ruptura da seção líquida | 20 |
| 2.1.4 | Cálculo da área líquida A_n | 21 |
| 2.1.5 | Cálculo do coeficiente de redução C_t | 22 |
| 2.1.6 | Área líquida efetiva A_e | 23 |
| 2.1.7 | Avaliação da força axial resistente de cálculo | 23 |
| 2.1.8 | Dimensionamento a compressão de perfis I, U e cantoneiras | 23 |
| 2.1.9 | Cálculo da força axial de flambagem para perfis I | 24 |
| 2.1.10 | Cálculo da força axial de flambagem para perfis U e cantoneiras | 25 |
| 2.1.11 | Cálculo da força axial de flambagem de cantoneiras simples conectadas por uma aba | 25 |
| 2.1.12 | Índice de esbeltez reduzido λ_0 | 26 |
| 2.1.13 | Fator de redução χ | 27 |
| 2.1.14 | Cálculo da área efetiva | 27 |
| 2.1.15 | Cálculo da força axial resistente de cálculo | 28 |
| 2.1.16 | Colapso por rasgamento | 29 |
| 2.2 | AISC Shapes Database V16.0 | 29 |
| 3 | DESENVOLVIMENTO | 31 |
| 3.1 | Planilha para dimensionamento à compressão | 31 |
| 3.1.1 | Menu de navegação | 31 |
| 3.1.2 | Seção de dados de entrada | 31 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.1.3 | Seção de resumo de resultados | 32 |
| 3.1.4 | Seção de propriedades do material | 33 |
| 3.1.5 | Seção de propriedades geométricas | 33 |
| 3.1.6 | Seção de memorial de cálculo | 34 |
| 3.1.7 | Abas para consulta das Tabelas A.2 e 3 | 43 |
| 3.2 | Planilha para dimensionamento à tração | 44 |
| 3.2.1 | Interface gráfica para configuração de furos | 44 |
| 3.2.2 | Validação da interface gráfica para configuração de furos | 45 |
| 3.2.3 | Seção de entrada de dados da planilha para tração | 47 |
| 4 | RESULTADOS | 49 |
| 4.1 | Validação para compressão de perfis I | 49 |
| 4.2 | Validação para compressão de cantoneiras | 50 |
| 4.3 | Validação para compressão de perfis U | 51 |
| 4.4 | Validação para tração de perfis I e U | 53 |
| 4.5 | Validação para tração de cantoneiras | 54 |
| 5 | CONCLUSÃO | 57 |
| | REFERÊNCIAS | 58 |
| | APÊNDICE A – FLUXOGRAMA PARA DIMENSIONAMENTO A TRA- ÇÃO | 60 |
| | APÊNDICE B – FLUXOGRAMA PARA DIMENSIONAMENTO A COM- PRESSÃO (PERFIS I) | 61 |
| | APÊNDICE C – FLUXOGRAMA PARA DIMENSIONAMENTO A COM- PRESSÃO (CANTONEIRAS) | 62 |
| | APÊNDICE D – FLUXOGRAMA PARA DIMENSIONAMENTO A COM- PRESSÃO (PERFIS U) | 63 |

1 INTRODUÇÃO

A utilização de metais para fabricação remete ao tempo em que o ser humano substituiu ferramentas produzidas com pedra e argila por materiais como o cobre e o bronze, por volta de 3500 a.C. No decorrer dos próximos milênios, as civilizações desenvolveram artefatos decorativos e utilitários como vasos e ferramentas de caça, até que dominaram a manipulação dos minérios de ferro presentes na superfície (NAVARRO, 2006).

Apesar de discussão entre os historiadores quanto à exatidão das datas propostas para o início e o fim da chamada Idade dos Metais, é fato que a metalurgia acompanha a história da humanidade, uma vez que a fabricação metálica possibilitou o desenvolvimento bélico e a expansão de civilizações, impondo domínio àquelas que ainda não haviam desenvolvido técnicas de metalurgia (NAVARRO, 2006).

Ainda que os registros arqueológicos datem a utilização de metais, incluindo o aço, há mais de 5000 anos, a grande revolução na metalurgia do aço aconteceu apenas em meados do século XIX, quando foi desenvolvida na Grã-Bretanha um método eficaz de reduzir o teor de carbono presente no ferro fundido em larga escala, formando assim o aço (MONFERRATO, 2025; PFEIL; PFEIL, 2009).

A partir dessa revolução o aço passou a ser empregado na construção civil, mas é a partir de 1930, com o avanço nas técnicas de soldagem, que verifica-se um aumento significativo da construção de estruturas metálicas. O aço estrutural apresenta como vantagens um peso próprio reduzido quando comparado com outras estruturas, a facilidade de transporte e uma elevada relação entre resistência e peso, com alta eficiência quando submetido à tração e à flexão (PEREIRA, 2019).

No Brasil, a produção de aço foi transformada com a inauguração da Companhia Siderurgica Nacional (CSN) em 1941. A criação da Fábrica de Estruturas Metálicas (FEM) pela CSN em 1953 permitiu a expansão da tecnologia de construção em aço no país, possibilitando a construção de importantes edifícios, atendendo a demanda do governo brasileiro pela modernização das grandes cidades e pela construção de Brasília. Por conta dessa expansão, o parque industrial brasileiro desenvolveu-se a ponto de colocar o Brasil como o maior produtor de aço da América Latina em 1966 (IMIANOWSKY; WALENDOWSKY, 2017).

Diante desse cenário, era imperativa a criação de normas que fornecessem uma base comum para fabricantes de aço, projetistas e engenheiros na construção de estruturas metálicas. Nesse contexto a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) desenvolveu

a NB-14 em 1958, que posteriormente seria substituída pela ABNT NBR 8800 em 1986 (FAKURY, 2007).

Atualmente, a construção é o maior mercado para o aço, correspondendo a um volume de vendas de 300 milhões de toneladas no ano de 2021, sendo os maiores produtores de aço em 2005 a China, o Japão e a Rússia (CIMM, s.d.).

Tendo em vista a importância do aço na sociedade atual e sua relevância histórica, o estudo deste material e suas particularidades é fundamental na formação do engenheiro. O estudo das estruturas metálicas compõe a grade curricular de cursos de engenharia em diversas universidades do país, como a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) (UFU, 2010), a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) (UFRJ, 2021) e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) (UFMG, s.d.), todas tendo como referência o estudo da Norma Brasileira (NBR) 8800.

A existência de obras renomadas como "Edifícios Industriais em Aço: Projeto e Cálculo" (BELLEI, 2024), e "Estruturas de aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008" (PFEIL; PFEIL, 2009) evidenciam a complexidade de interpretação, estudo e aplicação da norma, uma vez que foram publicadas com o objetivo de guiar a aplicação do texto normativo.

Nesse contexto, a utilização de ferramentas computacionais pode ser de grande valia para estudantes e projetistas no estudo e aplicação da NBR 8800. A presença de computadores em sala de aula é cada vez mais frequente, o que possibilita incrementar a aprendizagem tradicional. O ensino de engenharia tem sido influenciado pelas Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs), enriquecendo o processo de aprendizagem por meio da interação com *softwares*, a partir da experimentação em tempo real. O uso de planilhas eletrônicas apresenta grande versatilidade e a vantagem de já constituírem atualmente uma importante ferramenta na rotina do engenheiro (MORAIS; ARAÚJO, 2013).

De acordo com (CHAVES, 2007, p.3):

"O grande desenvolvimento dos *softwares* para projeto estrutural e a utilização maciça de computadores nos escritórios de engenharia aumentaram a velocidade e a eficiência da atividade de projeto".

Sendo assim, este trabalho objetiva apresentar de forma didática, por meio de uma planilha eletrônica desenvolvida no MS Excel[®], as etapas utilizadas para cálculo da força axial de tração resistente de cálculo ($N_{t,Rd}$) e da força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) para perfis I, U e cantoneiras (perfil L), servindo como ferramenta no estudo de estruturas de aço. Esse cálculo é parte do dimensionamento de elementos de

barras prismáticas de aço submetidas a forças axiais de tração ou compressão, prevista pela norma NBR 8800:2024.

Além disso, considerando a extensa utilização de estruturas em aço em aplicações industriais, as planilhas têm grande valia comercial para projetistas, uma vez que são pautadas estritamente nas rotinas de cálculo da NBR 8800:2024, utilizando como base de dados perfis comerciais. Portanto, este trabalho tem como objetivo também criar uma ferramenta de cálculo e validação confiável para utilização comercial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A NORMA ABNT 8800:2024

A ABNT NBR 8800, denominada “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações”, tem como escopo estabelecer, com base no método dos estados-limite,

“os requerimentos básicos de projeto, à temperatura ambiente, de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações, nas quais os perfis de aço sejam laminados ou soldados, ou de seção tubular com ou sem costura” (NBR 8800:2024, 2025, p. 1).

A norma não se aplica a elementos estruturais com perfis formados a frio, ficando estes a cargo da ABNT NBR 14762:2010.

Segundo Fakury (2007), a NBR 8800 surgiu da necessidade de criar uma norma brasileira que refletisse a realidade da construção civil no país e atualizasse o método de cálculo empregado. Até 1986, ano de criação da norma, a norma vigente no Brasil era a NB-14, de 1958, que era baseada na norma DIN 4114, de 1952. Com o tempo, essa norma foi ficando ultrapassada e não acompanhou as atualizações de normas internacionais, que substituíram o método das tensões admissíveis pelo método dos estados-limites. Já na sua primeira edição, a NBR 8800 implementou este método mais moderno, com bases probabilísticas, e desde então foram publicadas novas edições em 2008 e 2024.

Dentro dos requerimentos básicos de projeto, a NBR 8800 descreve recomendações, normativas e definições para temas como desenhos de projeto, fabricação e montagens, materiais, estados-limite, ações, determinação de esforços solicitantes e forças resistentes, soldas em elementos de estruturas de aço, entre outros. Este trabalho foca nos capítulos 5.2 e 5.3, especificamente para perfis com seção transversal I, U e cantoneiras. Esses elementos estruturais são aplicados em colunas e vigas, e junto com suas variações (W, HP, S, MC) constituem os principais produtos siderúrgicos laminados de aplicação estrutural (PFEIL; PFEIL, 2009)

A NBR 8800 também traz métodos de dimensionamento à flexão, flexocompressão e flexotração, mas este trabalho atém-se em dimensionar os perfis escolhidos à tração e compressão. Considerando o tempo estipulado para realização deste trabalho, não foi possível implementar os dimensionamentos para flexão e a combinação de esforços, que serão abordadas em trabalhos futuros. No entanto, a existência de uma ferramenta de dimensionamento para tração e compressão emerge como vantajosa no projeto de treliças,

já que esses são os únicos esforços necessários para dimensionamento. Além disso, as planilhas podem ser utilizadas para dimensionamento de contraventamentos (elementos tracionados) e colunas (elementos comprimidos).

Outras ferramentas que a norma disponibiliza e serão fundamentais para o dimensionamento são as Tabelas 2.1 e 2.2, que fornecem os valores dos coeficientes de ponderação γ_{a1} e γ_{a2} , utilizados para ponderar a resistência dos perfis em função das combinações últimas, e os aços de uso frequente especificados pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) para uso estrutural, além dos valores de f_y , resistência ao escoamento e f_u , resistência à ruptura.

Tabela 2.1 – Aços de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural

| Denominação | f_y (MPa) | f_u (MPa) |
|----------------|----------------|----------------|
| A36 | 250 | 400 |
| A500 - Grau A | 230 | 310 |
| A500 - Grau B | 230 | 310 |
| A572 - Grau 42 | 290 | 415 |
| A572 - Grau 50 | 345 | 450 |
| A572 - Grau 55 | 380 | 485 |
| A572 - Grau 60 | 415 | 520 |
| A572 - Grau 65 | 450 | 550 |
| A992 | 345 | 450 |
| A242 - Grupo 1 | 345 | 485 |
| A242 - Grupo 2 | 315 | 460 |
| A242 - Grupo 3 | 290 | 435 |
| A588 | 345 | 485 |
| A913 - Grau 50 | 345 | 450 |
| A913 - Grau 60 | 415 | 520 |
| A913 - Grau 65 | 450 | 550 |

Fonte: Adaptado de NBR 8800:2024.

Tabela 2.2 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências (γ_m) - NBR 8800:2024.

| Combinações últimas | Aço estrutural | |
|----------------------------|--|------------------------------|
| | Escoamento e instabilidade (γ_{a1}) | Ruptura (γ_{a2}) |
| Normais | 1,1 | 1,35 |
| Especiais ou de construção | 1,1 | 1,35 |
| Excepcionais | 1 | 1,15 |

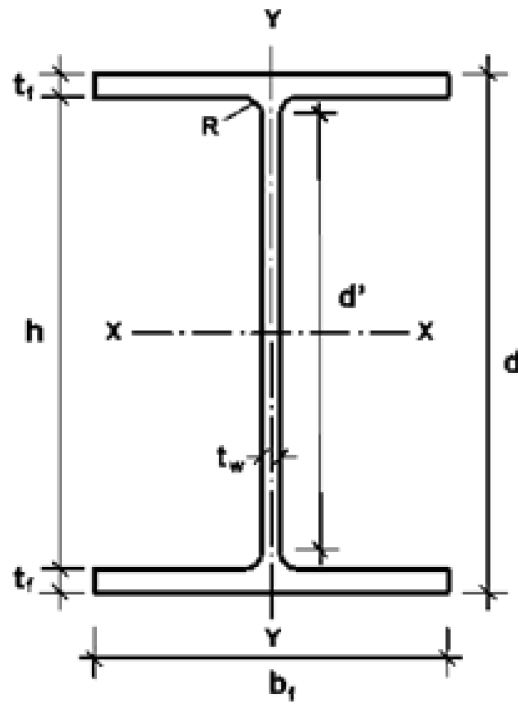
Fonte: Adaptado de NBR 8800:2024.

2.1.1 Dimensionamento a tração de perfis I, U e cantoneiras

A seção 5 da norma trata do dimensionamento dos elementos estruturais de aço submetidos a ações estáticas. De forma geral, esta seção inicia-se com definições que serão importantes para o desenvolvimento deste trabalho, em especial o item 5.1.2.2, que trata dos parâmetros de esbeltez. Aqui, é definida a largura característica b dos elementos AA (apoiado-apoiado), como as almas de seções I e U, e dos elementos AL (apoiado-livre), como as mesas de seções I e U e as mesas de cantoneiras.

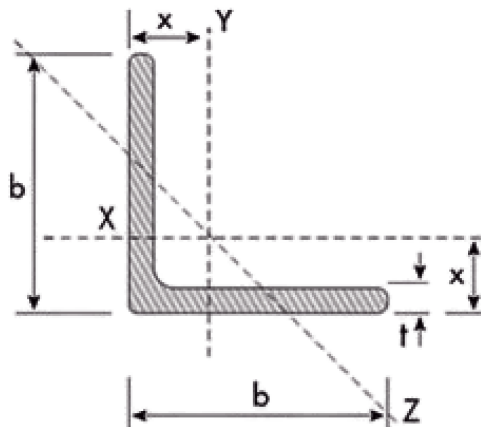
Para o primeiro caso, em ambos os perfis, a largura b corresponde à distância livre entre mesas subtraídos os dois raios de concordância entre a alma e as mesas. Já no segundo caso, para as mesas de seção I (Figura 2.1), a largura b é a metade da largura total e para as mesas de seções U e cantoneiras (Figuras 2.2 e ??), é a largura total do elemento. Essa definição é importante para o cálculo do parâmetro de esbeltez no decorrer do trabalho.

Figura 2.1 – Geometria do perfil I

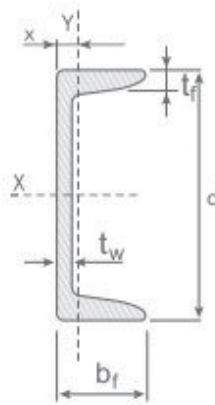


Fonte: AISC Manual (2011)

Figura 2.2 – Geometria da cantoneira



Fonte: Fábrica do projeto (2025)

Figura 2.3 – Geometria do perfil U

Fonte: Gerdau (2025)

A subseção 5.2 é aplicada em barras prismáticas submetidas a força axial de tração, um dos enfoques deste trabalho, portanto será detalhada a seguir. Essa subseção apresenta, ao longo dos itens, o procedimento para dimensionamento à tração de modo que primeiramente é evidenciada a condição a ser atendida, dada pela Eq. (1).

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (1)$$

onde:

- $N_{t,Sd}$ é a força axial de tração solicitante de cálculo;
- $N_{t,Rd}$ é a força axial de tração resistente de cálculo;

Na sequência, são apresentadas as equações utilizadas para determinar a força axial de tração resistente de cálculo, que por sua vez possui outras variáveis a serem determinadas e serão também equacionadas. Como é possível perceber, a norma traz uma ordem de dimensionamento que se inicia pela condição final e depois apresenta as ferramentas para avaliá-la. É uma abordagem tecnicamente eficiente, pois permite o rápido dimensionamento em caso de já haver as variáveis disponíveis, mas pode ser confusa didaticamente e menos eficiente caso o dimensionamento seja feito sem premissas, como já explicado anteriormente.

Por essa razão, foram desenvolvidos fluxogramas de dimensionamento para tração e compressão, disponíveis nos apêndices A, B, C e D. Esses fluxogramas invertem a ordem estabelecida pela norma, começando o dimensionamento pelas variáveis que são possíveis

obter diretamente a partir dos dados comumente encontrados em catálogos de fabricantes como a Gerdau e a ArcelorMittal e de órgãos técnicos como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a *American Institute of Steel Construction* (AISC), visando facilitar e tornar mais didático o entendimento da norma.

2.1.2 Escoamento da seção bruta

Seguindo a ordem dos fluxogramas, o dimensionamento de barras prismáticas submetidas a força axial de tração é comum aos três tipos de perfil e se inicia pela determinação da força axial resistente de cálculo para escoamento da seção bruta, $N_{t,Rd}$, definida pela Eq. (2).

$$N_{t,Rd,bruta} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2)$$

onde:

- A_g é área bruta, disponível pelo catálogo;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço, disponível na Tabela 2.1;
- γ_{a1} é o coeficiente de ponderação, disponível na Tabela 2.2;

2.1.3 Ruptura da seção líquida

Para ruptura da seção líquida, o cálculo se inicia pela área líquida da barra ou pelo coeficiente de redução da área líquida, pois são independentes e podem ser calculados paralelamente. Calculada a área líquida e seu coeficiente de redução, os valores de f_u e γ_{a2} estão disponíveis nas Tabelas 2.2 e 2.1 e a força axial resistente de cálculo para ruptura de seção líquida é determinada pela (Eq. 3).

$$N_{t,Rd,líquida} = \frac{A_{ef} f_u}{\gamma_{a2}} \quad (3)$$

onde:

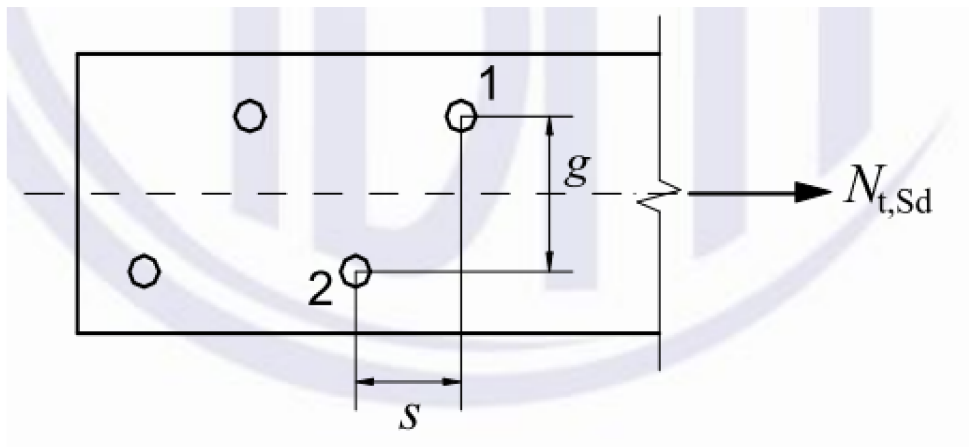
- A_{ef} é área líquida efetiva;
- f_u é a resistência do aço à ruptura, disponível na Tabela 2.1;
- γ_{a2} é o coeficiente de ponderação, disponível na Tabela 2.2;

2.1.4 Cálculo da área líquida A_n

De acordo com a seção 5.2.4, a área líquida deve ser calculada levando em consideração a presença de furos, sejam furos simples ou dispostos em zigue-zague.

A norma define a largura líquida de um elemento (mesa ou alma) deduzindo a largura de todos os furos em cadeia da largura bruta, e esse valor deve ser multiplicado pela espessura do elemento para obter a área líquida. A diferenciação se dá por conta do fator $\frac{s^2}{4g}$ (Figura 2.4), que deve ser adicionado no cálculo da largura líquida quando ocorre furação por zigue-zague.

Figura 2.4 – Variáveis s e g



Fonte: ABNT (2025)

O cálculo da área líquida varia com o perfil, por conta da geometria, e ainda leva em consideração a variação produzida pela disposição dos furos. Esse cálculo é detalhado na planilha, no memorial de cálculo.

Se não houver furos, a área líquida A_n é igual a área bruta A_g ; se houver furos em zigue-zague, a área líquida A_n é dada pela Eq. (4); se houver furos alinhados, a área líquida A_n é dada pela Eq. (5).

$$A_n = A_g - (D_{furos,alma} \cdot n_{furos,alma} \cdot t_w + \frac{s^2}{4g}) - (D_{furos,mesa} \cdot n_{furos,mesa} \cdot t_f + \frac{s^2}{4g}) \quad (4)$$

$$A_n = A_g - (D_{furos,alma} \cdot n_{furos,alma} \cdot t_w) - (D_{furos,mesa} \cdot n_{furos,mesa} \cdot t_f) \quad (5)$$

onde:

- A_n é a área líquida da seção;
- A_g é a área bruta da seção;
- $D_{furos,alma}$ é o diâmetro equivalente dos furos na alma;
- $n_{furos,alma}$ é o número de furos alinhados na alma;
- $D_{furos,mesa}$ é o diâmetro equivalente dos furos na mesa;
- $n_{furos,mesa}$ é o número de furos alinhados na mesa;
- s é o espaçamento longitudinal entre dois furos que produz a menor largura líquida;
- g é o espaçamento transversal entre dois furos que produz a menor largura líquida;
- t_w é a espessura da alma;
- t_f é a espessura da mesa.

2.1.5 Cálculo do coeficiente de redução C_t

De acordo com a seção 5.2.5 da ABNT 8800:2024, o coeficiente de redução para perfis I, U e cantoneiras é dependente do modo que a força de tração é transmitida para os elementos da seção: se a força for transmitida somente por parafusos ou soldas longitudinais, deve-se utilizar a Eq. (6); caso seja transmitida diretamente, utiliza-se a Eq. (7); se for exclusivamente por soldas transversais, utiliza-se a Eq. (8).

$$C_t = 1 - \frac{e_c}{l_c} \quad (6)$$

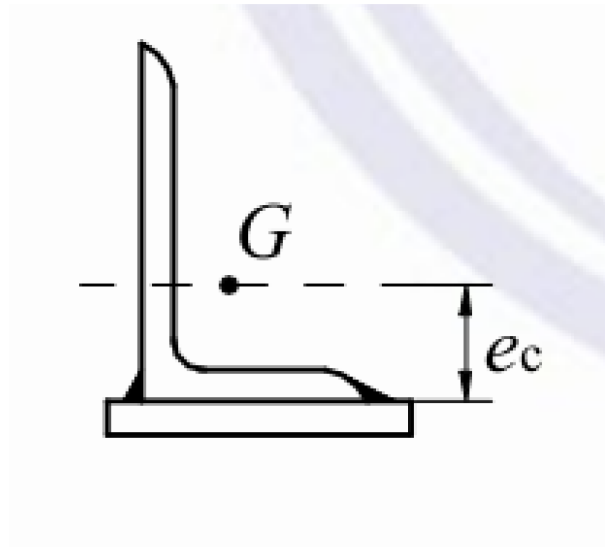
$$C_t = 1 \quad (7)$$

$$C_t = \frac{A_c}{A_g} \quad (8)$$

onde:

- e_c (Figura 2.5) é a excentricidade da ligação;
- l_c é o comprimento efetivo da ligação;
- A_c é a área da seção transversal dos elementos conectados;

Figura 2.5 – Exemplo de e_c para cantoneiras



2.1.6 Área líquida efetiva A_e

Calculados os valores de C_t e A_n , a área líquida efetiva é dada pela Eq. (9).

$$A_e = C_t A_n \quad (9)$$

2.1.7 Avaliação da força axial resistente de cálculo

A NBR 8800:2024 define que menor dentre os valores calculados pelas Equações 3 e 2 será adotado como a força axial resistente de cálculo a ser usada no dimensionamento (Eq. 10).

$$N_{t,Rd} = \min(N_{t,Rd,bruta}; N_{t,Rd,líquida}) \quad (10)$$

2.1.8 Dimensionamento a compressão de perfis I, U e cantoneiras

No dimensionamento a compressão, o procedimento diferencia-se para cada perfil apenas no cálculo da força axial de flambagem N_e , que é a menor carga (crítica) que causa a falha da seção, a depender se a seção possui dupla simetria (perfil I) ou é monossimétrica (perfil U e cantoneiras), ainda com a particularidade que em cantoneiras simples, existe uma seção exclusiva para cálculo de N_e , desde que essa cantoneira atenda a uma série de requisitos estabelecidos pela norma. Por esse motivo, os fluxogramas de compressão foram divididos em quatro folhas, como mostram os anexos A, B, C e D.

A seguir serão detalhados os procedimentos para cálculo de N_e para cada perfil, seguidos dos cálculos comuns a todos os perfis.

2.1.9 Cálculo da força axial de flambagem para perfis I

Para o cálculo da força axial de flambagem para perfis I, com dupla simetria, todas as variáveis necessárias são obtidas a partir do catálogo da AISC, das Tabelas 2.1 e 2.2 ou são inerentes ao projeto, quais sejam:

- L_x - Comprimento destravado associado à flexão em X-X;
- I_x - Momento de inércia em relação ao eixo X-X;
- L_y - Comprimento destravado associado à flexão em Y-Y;
- I_y - Momento de inércia em relação ao eixo Y-Y;
- L_z - Comprimento destravado associado à torção;
- E - Módulo de elasticidade do aço;
- C_w - Constante de empenamento da seção transversal;
- G - Módulo de elasticidade transversal do aço;
- J - Constante de torção da seção transversal
- r_0 - Raio de giração polar em relação ao centro de cisalhamento, calculado pela Eq. (11).

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2} \quad (11)$$

onde:

r_x e r_y são os raios de giração e x_0 e y_0 são as coordenadas do centro de cisalhamento em relação ao centro geométrico da seção. Para perfis com dupla simetria, como os perfis I, $x_0 = y_0 = 0$

Uma vez extraídos do catálogo ou calculados esses dados, o menor dos três valores calculados pelas Equações 12 a 14 será adotado como a força axial de flambagem N_e .

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{L_x^2} \quad (12)$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_y^2} \quad (13)$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{L_z^2} + GJ \right] \quad (14)$$

2.1.10 Cálculo da força axial de flambagem para perfis U e cantoneiras

Considerando perfis U e cantoneiras, monossimétricos em relação ao eixo x, exceto o caso de cantoneiras simples conforme o item 5.3.5.4 da NBR 8800:2024, todas as variáveis necessárias foram listadas no item 2.1.9. O cálculo de N_{ez} e N_{ex} também é necessário conforme a Eq. (14) e a Eq. (12), mas como variáveis auxiliares que comporão a Eq. (15), utilizada para obtenção da força axial de flambagem por flexo-torção, N_{exz} .

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2 \left[1 - \left(\frac{x_o}{r_o} \right)^2 \right]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez} \left[1 - \left(\frac{x_o}{r_o} \right)^2 \right]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] \quad (15)$$

O valor encontrado para N_{exz} deve ser comparado ao valor de N_{ey} , dado pela (Eq. 13), e o menor dentre eles deve ser adotado como a força axial de flambagem, N_e .

2.1.11 Cálculo da força axial de flambagem de cantoneiras simples conectadas por uma aba

A ABNT 8800:2024 traz uma seção que trata de um caso particular de cantoneiras simples conectadas por uma aba, que devem cumprir a seis requisitos:

- ser carregada nas extremidades através da mesma aba;
- ser conectada em cada extremidade por solda ou por pelo menos dois parafusos na direção da solicitação
- não ser solicitada por ações transversais intermediárias;
- não ter relação $L_{x1,eq}/r_{x1}$ (índice de esbeltez) que exceda 200;
- não ter relação entre a largura da aba maior e da aba menor que exceda 1,7;
- não ter relação b/t (largura característica por espessura) que exceda $0,71\sqrt{E/f_y}$

O comprimento destravado equivalente, $L_{x1,eq}$, é determinada pelas Equações 16 ou 17.

$$L_{x1,eq} = 72r_{x1} + 0,75L_{x1}, \text{ se } L_{x1}/r_{x1} \leq 80; \quad (16)$$

$$L_{x1,eq} = 32r_{x1} + 1,25L_{x1}, \text{ se } L_{x1}/r_{x1} > 80; \quad (17)$$

onde:

- L_{x1} é o comprimento da cantoneira, considerado entre os pontos de trabalho situados nos eixos longitudinais das cordas da treliça;
- r_{x1} é o raio de giração da seção transversal em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico e é paralelo à aba conectada.

Uma vez que essa cantoneira cumpra esses requisitos, a força axial de flambagem não deve ser calculada pelas Equações 15 ou 13, mas sim pela Eq. (18)

$$N_e = \frac{\pi^2 EI_{x1}}{L_{x1,eq}^2} \quad (18)$$

onde:

- $L_{x1,eq}$ é o comprimento destravado equivalente;
- I_{x1} é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo paralelo a aba conectada.

Cabe ao projetista avaliar se o dimensionamento enquadra-se nestes itens, mas, uma vez confirmado, o cálculo torna-se simples. Caso não haja enquadramento, o dimensionamento é feito conforme item 2.1.10.

2.1.12 Índice de esbeltez reduzido λ_0

As variáveis que serão calculadas a seguir têm procedimentos semelhantes, portanto os três perfis serão abordados simultaneamente, iniciando pelo índice de esbeltez reduzido λ_0 , que depende de N_e , sendo encontrado pela Eq. (19).

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g f_y}{N_e}} \quad (19)$$

2.1.13 Fator de redução χ

O fator de redução associado à resistência à compressão, que minora a resistência do material, leva em consideração a instabilidade gerada pela flambagem e, portanto, depende do índice de esbeltez reduzido λ_0 , sendo calculado pelas Equações 20 ou 21.

$$\chi = 0,658\lambda_0^2, \text{ para } \lambda_0 \leq 1,5 \quad (20)$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}, \text{ para } \lambda_0 > 1,5 \quad (21)$$

2.1.14 Cálculo da área efetiva

O próximo passo é calcular a área efetiva da seção transversal, considerando os fatores anteriormente calculados, de acordo com o item 5.3.4 da NBR 8800:2024. De forma semelhante ao cálculo equivalente no dimensionamento à tração, é necessário avaliar a geometria do perfil e utilizar corretamente as variáveis anteriormente definidas como b na seção 2.1.4 deste trabalho.

Diferentemente da tração, onde os furos eram levados em consideração, na compressão a particularidade é a utilização de $(b/t)_{lim}$, como mostrado na Tabela 2.3, adaptada da NBR 8800:2024.

Tabela 2.3 – Valores de $(b/t)_{lim}$

| Descrição dos elementos | $(b/t)_{lim}$ |
|------------------------------|----------------------------|
| Almas de seções I, H ou U | $1,49\sqrt{\frac{E}{f_y}}$ |
| Mesas de seções I, H ou U | $0,56\sqrt{\frac{E}{f_y}}$ |
| mesas de cantoneiras simples | $0,45\sqrt{\frac{E}{f_y}}$ |

Fonte: Adaptado de NBR 8800:2024

Primeiramente, deve ser feita uma comparação considerando a relação entre a largura e a espessura de cada elemento da seção. Se todos os elementos enquadram-se na relação descrita pela Eq. (22), então a área efetiva da seção transversal, A_{ef} , deve ser considerada igual à área bruta A_g , dada na tabela do fabricante.

$$\text{para } \frac{b}{t} \leq \frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}}, b_{ef} = b \quad (22)$$

Caso contrário, a Eq. (23) deve ser aplicada para calcular a largura efetiva b_{ef} de cada elemento que não satisfaz a Eq. (22). Posteriormente, a largura efetiva deve ser multiplicada pela espessura do elemento (t para cantoneiras, t_w ou t_f para perfis I e U) para obter-se a área efetiva do elemento. Soma-se as áreas efetivas de cada elemento para determinar a área efetiva da seção transversal A_{ef} .

$$\text{para } \frac{b}{t} > \frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}}, b_{ef} = b \left(1 - c_1 \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}} \right) \left(\sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}} \right) \quad (23)$$

A tensão de flambagem local, σ_{el} , pode ser calculada pela Eq. (24) ou por análise de estabilidade.

$$\sigma_{el} = \left(c_2 \frac{(b/t)_{lim}}{b/t} \right)^2 f_y \quad (24)$$

E os fatores c_1 e c_2 são dados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Fatores c_1 e c_2 para cálculo de flambagem local

| Elementos | c_1 | c_2 |
|------------------------------|-------|-------|
| Almas de seções I, H ou U | 0,18 | 1,31 |
| Mesas de seções I, H ou U | 0,22 | 1,49 |
| mesas de cantoneiras simples | 0,22 | 1,49 |

Fonte: Adaptado de NBR 8800:2024

2.1.15 Cálculo da força axial resistente de cálculo

Obtidos os valores de fator de redução e área efetiva, a força axial resistente de cálculo deve ser determinada pela Eq. (25).

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma_{a1}} \quad (25)$$

De forma semelhante ao dimensionamento para tração, o perfil selecionado estará dimensionado se atender a condição estabelecida pela Eq. (26).

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (26)$$

onde:

- $N_{c,Rd}$ é a força axial resistente de cálculo;
- $N_{c,Sd}$ é a força axial solicitante de cálculo.

2.1.16 Colapso por rasgamento

No caso de perfis submetidos a tração, a norma traz o dimensionamento de estado-limite de colapso por rasgamento, que ocorre quando há cisalhamento da seção transversal com furos (linhas de falha). A força resistente de cálculo ao colapso por rasgamento (Eq. 27) deve ser calculada e o menor valor deve ser utilizado, caso seja menor que os valores calculados para escoamento da seção líquida e da bruta.

$$F_{r,Rd} = \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60f_uA_{nv} + C_{ts}f_uA_{nt}) \leq \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60f_yA_{gv} + C_{ts}f_uA_{nt}) \quad (27)$$

onde:

- A_{gv} é a área bruta sujeita a cisalhamento;
- A_{nv} é a área líquida sujeita a cisalhamento;
- A_{nt} é a área líquida sujeita a tração;
- C_{ts} é igual a 1,0 quando a tensão de tração na área líquida for uniforme e igual a 0,5 quando for não uniforme.

2.2 AISC SHAPES DATABASE V16.0

O *American Institute of Steel Construction* (AISC) surgiu em novembro de 1917, nos Estados Unidos, com o intuito de simplificar o design e a construção de estruturas metálicas, estabelecendo especificações e manuais que serviriam de base para projetistas, fabricantes, construtores, arquitetos e engenheiros (AISC, c2025)).

Dentre as publicações da entidade, a AISC Shapes Database foi utilizada neste trabalho como fonte para todas as propriedades e dimensões dos perfis escolhidos. Trata-se

de uma planilha do MS Excel[®] consistente com as variáveis estabelecidas pelo AISC *Steel Construction Manual*, um documento que encapsula as etapas de projeto e recomendações para dimensionamentos de vigas, placas, parafusos e solda. (AISC, 2011).

A planilha conta com 2300 perfis estruturais comercialmente utilizados, incluindo perfis U, I, T, cantoneiras e tubos.

3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo detalha a metodologia utilizada para aplicação das etapas de cálculo da força axial de tração resistente de cálculo ($N_{t,Sd}$) e da força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$), à luz da NBR 8800, especificamente para barras metálicas de perfis I, U e cantoneiras.

Para atingir os objetivos citados, foram criadas duas planilhas, uma para o dimensionamento à compressão e outra à tração. A seguir, serão evidenciadas suas abas, seções e lógica de programação, iniciando pela planilha de dimensionamento à compressão.

3.1 PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO À COMPRESSÃO

A planilha de compressão é composta por 8 abas: dimensionamento I; dimensionamento U; dimensionamento cantoneira; catálogo I; catálogo U; catálogo cantoneiras; Tabela A.2; Tabela 3. O dimensionamento foi separado de acordo com o perfil escolhido devido às particularidades que cada uma apresenta no cálculo da força axial de flambagem N_e . A seção 5.3.5.1 da NBR 8800:2024 é aplicada à perfis I, a 5.3.5.2 à perfis U e a 5.3.5.4 a cantoneiras.

3.1.1 Menu de navegação

Em cada uma das abas referentes aos dimensionamentos, a estrutura das seções é semelhante. No topo, um menu permite a fácil navegação entre as abas da planilha, como ilustra a Figura 3.1.

Figura 3.1 – Menu de navegação

| DIMENSIONAMENTO À COMPRESSÃO - PERFIL U | | | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|--------------------------|
| Dimensionamento I | Dimensionamento U | Dimensionamento L | Catálogo I - AISC | Catálogo U - AISC | Catálogo L - AISC | Tabela A.2 - NBR 8800:2024 | Tabela 3 - NBR 8800:2024 |

3.1.2 Seção de dados de entrada

Abaixo do menu de navegação, há uma seção de dados de entrada (Figura 3.2), na qual o usuário deve informar os valores de comprimento destravado dos elementos (L_x , L_y , L_z) em cm, a força solicitante de cálculo ($N_{c,Rd}$), o material do elemento de acordo com a tabela A.2 da NBR 8800:2024, a combinação última de acordo com a tabela 3 da NBR 8800:2024, o tipo de apoio segundo a ANSI/AISC 360, a geometria básica do perfil de acordo com o catálogo fornecido, adaptado do AISC Shapes Database V16.0 e,

no caso do dimensionamento de cantoneiras, existem campos adicionais por conta das particularidades impostas pelo item 5.3.5.4 da NBR 8800:2024. Essa seção da norma é aplicada no caso dos itens da seção 2.1.11 serem atendidos, alterando o cálculo da força axial de flambagem, trazendo ainda recomendações e limitações a respeito do projeto.

Na seleção do material e do perfil, foi utilizado o recurso de lista suspensa, nativa do MS Excel[®], que limita as opções de escolha do usuário a uma lista restrita, no caso referenciada a partir da aba “Tabela A.2” e da aba referente aos catálogos dos perfis, respectivamente.

Figura 3.2 – Seção de dados de entrada

| Dados de Entrada | | | |
|--|---------------|---|---------|
| Selecione o material | A36 | Comprimento destravado em relação X-X (Lx) | 300 cm |
| Selecione o perfil | W150X37.1 | Comprimento destravado em relação Y-Y (Ly) | 300 cm |
| Selecione a combinação conforme tabela 3 | Normais | Comprimento destravado em relação a torção (Lz) | 0,00 cm |
| Tipo de apoio | Bi-Articulado | Força Solicitante de cálculo (Nc,Sd) | 0 kN |

3.1.3 Seção de resumo de resultados

Na sequência, os resultados são apresentados em uma seção que contém a validação quanto a limitação do índice de esbeltez (Figura 3.3), conforme item 5.3.7.1 da NBR 8800:2024, um resumo da força axial resistente e solicitante e a comparação entre as duas, exibindo uma mensagem que varia de acordo com a validade do perfil em suportar a força solicitante. As mensagens de validação do índice de esbeltez e de dimensionamento do perfil têm preenchimento de célula variável, exibindo um fundo verde em caso positivo e vermelho em caso negativo. Esses recursos foram implementados utilizando a função "se" e a funcionalidade de formatação condicional.

Figura 3.3 – Seção de resumo dos resultados

| Resumo dos resultados | | | | |
|---|-------|--------|----------------------|----------|
| λ_x | 43,73 | < | 200 | |
| λ_y | 77,72 | < | 200 | |
| Perfil dentro da limitação do índice de esbeltez conforme item 5.3.7.1 da NBR 8800:2024 | | | | |
| Perfil dentro da limitação do índice de esbeltez conforme item 5.3.7.1 da NBR 8800:2024 | | | | |
| Nc,Sd | | 0 kN | Nc,Rd | 784,1 kN |
| 0 | ≤ | 784,13 | Perfil dimensionado! | |

| Resumo dos resultados | | | | |
|---|-------|--------|--|----------|
| λ_x | 218,7 | > | 200 | |
| λ_y | 259,1 | > | 200 | |
| Reduza o comprimento destravado em x ou altere o perfil | | | | |
| Reduza o comprimento destravado em x ou altere o perfil | | | | |
| Nc,Sd | | 200 kN | Nc,Rd | 112,1 kN |
| 200 | > | 112,05 | Perfil não dimensionado. Selecione outro perfil. | |

3.1.4 Seção de propriedades do material

Há uma seção que resume as propriedades do material escolhido (Figura 3.4), de acordo com a Tabela A.2 da NBR 8800:2024, apresentando a classificação do material, os valores de limite de escoamento e resistência a tração, módulo de elasticidade e módulo de elasticidade transversal, em MPa e $\frac{kN}{cm^2}$. Também exibe os coeficientes de ponderação das resistências à escoamento e instabilidade (γ_{a1}) e à ruptura (γ_{a2}).

Figura 3.4 – Seção de propriedades do material

| Propriedades do material | | |
|--|---|--------------|
| Classificação | Aços de baixa liga e alta resistência mecânica à corrosão atmosférica | |
| Limite de escoamento do aço (fy) | 250 Mpa | 25 kN/cm² |
| Limite de resistência a tração (fu) | 400 Mpa | 40 kN/cm² |
| Módulo de elasticidade (E) | 200000 Mpa | 20000 kN/cm² |
| Módulo de elasticidade transversal (G) | 77000 Mpa | 7700 kN/cm² |
| Coeficiente de ponderação das resistências (γ_{a1}) | 1,1 | |
| Coeficiente de ponderação das resistências (γ_{a2}) | 1,35 | |

3.1.5 Seção de propriedades geométricas

A próxima seção exibe as propriedades geométricas do perfil selecionado (Figura 3.5), que variam de acordo com a aba da planilha. À esquerda, é exibida uma imagem com algumas dimensões padronizadas do perfil e, logo abaixo, a nomenclatura padrão AISC. Todos os dados são obtidos de outras células do projeto utilizando a função *procv*.

A escolha das propriedades exibidas varia de acordo com a escolha do perfil, uma vez que os dimensionamentos variam de acordo com a simetria do perfil, como já visto na revisão bibliográfica da NBR 8800:2024.

Figura 3.5 – Seção de propriedades geométricas

W150X37.1

Propriedades Geométricas do Perfil I

| | | |
|----------------|------------------------------------|--------------------------|
| W | Massa | 37,10 kg/m |
| d | Altura total | 16,20 cm |
| b _f | Largura da mesa | 15,40 cm |
| t _w | Espessura da alma | 0,79 cm |
| t _f | Espessura da mesa | 1,11 cm |
| h | Altura da alma | 13,98 cm |
| d' | Altura reta da alma | 11,40 cm |
| A _g | Área bruta | 47,40 cm ² |
| I _x | Momento de inércia X-X | 2220,00 cm ⁴ |
| W _x | Módulo de resistência elástica | 274,00 cm ³ |
| r _x | Raio de giração X-X | 6,86 cm |
| I _y | Momento de inércia Y-Y | 712,00 cm ⁴ |
| W _y | Módulo de resistência elástica Y-Y | 91,90 cm ³ |
| r _y | Raio de giração Y-Y | 3,86 cm |
| k _e | Coeficiente de comprimento efetivo | 1,00 |
| J | Constante torcional | 19,20 cm ⁴ |
| C _w | Constante de empenamento | 40300,00 cm ⁶ |
| r _o | Raio de giração polar | 7,87 cm |

Para os perfis monossimétricos ou com simetria em relação a um ponto (U e cantoneira) o dimensionamento exige os valores de x_0 (distância do centro de gravidade ao centro de cisalhamento).

Essa dimensão é calculada nos perfis U a partir de x (distância do centro de gravidade à extremidade da mesa) e e_0 (distância do centro de cisalhamento à extremidade da mesa).

Para cantoneiras, x_0 é calculado a partir de x_0 e t (espessura), uma vez que o centro de cisalhamento está posicionado na linha média da aba.

A escolha varia também de acordo com as informações fornecidas pelo catálogo. No caso dos perfis I, por exemplo, está disponível o valor de h , altura reta da alma, que é conveniente para o cálculo da área efetiva, facilitando a implementação computacional.

Apesar dessas dimensões distintas entre os perfis (altura da alma, altura reta da alma para perfis I; momento de inércia, módulo de resistência elástica e raio de giração em Z para cantoneiras), existem propriedades e dimensões que são evidenciadas nas três abas, mas não são estritamente correspondentes. Por isso, é importante exibir a imagem do perfil ao lado como legenda e é recomendada a consulta ao AISC Shapes Database, no qual foi disponibilizado o significado para as variáveis utilizadas.

3.1.6 Seção de memorial de cálculo

A quarta seção traz de um memorial de cálculo em que todas as etapas são detalhadas, tanto para atingir o objetivo do trabalho de criar uma ferramenta didática, quanto para conferência da rotina de cálculo em caso de utilização comercial. Essa seção possui subdivisões para evidenciar cada cálculo realizado, seguindo os fluxogramas citados previamente. Cabe ressaltar que todas as células que exibem valores numéricos foram programadas para ficarem vazias enquanto nenhum perfil foi selecionado, evitando que uma mensagem de erro seja exibida antes do usuário iniciar o dimensionamento.

3.1.6.1 Subseção de cálculo da força axial de flambagem

A primeira subseção do memorial de cálculo (Figuras 3.6 e 3.7) é a única que se diferencia, novamente pelo fato da força axial de flambagem possuir formulações diferentes a depender da simetria do perfil. No caso do dimensionamento para perfis I, a planilha exibe um texto referenciando o item 5.3.2.1 da NBR 8800:2024 e para as planilhas de perfis I e cantoneiras, o texto referencia o item 5.3.5.2 da NBR 8800:2024. Aqui, todos os dados são extraídos dos catálogos e da Tabela A.2, disponíveis nas seções anteriores, com exceção do x_0 .

Figura 3.6 – Subseção de cálculo da força axial de flambagem para perfis I

| Memorial de cálculo | | |
|---|---------|--------------------|
| 1. Cálculo da força axial de flambagem (N _e) conforme item 5.3.5.1 da NBR 8800:2024 | | |
| N _e é o menor valor dos três valores dados a seguir: | | |
| $N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{L_x^2}$ | 4869,00 | kN/cm ² |
| $N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_y^2}$ | 1561,59 | kN/cm ² |
| $N_{ez} = \frac{1}{r_o^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{L_z^2} + GJ \right]$ | 3812,63 | kN/cm ² |
| N _e | 1561,59 | kN/cm ² |

Figura 3.7 – Subseção de cálculo da força axial de flambagem para perfis U

| 1. Cálculo da força axial de flambagem (N _e) conforme item 5.3.5.2 da NBR 8800:2024 | | |
|---|---------|--------------------|
| N _{ez} e N _{ex} são calculados como parâmetros auxiliares para calcular N _{exz} | | |
| $N_{ez} = \frac{1}{r_o^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{L_z^2} + GJ \right]$ | 1372,34 | kN/cm ² |
| $N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{L_x^2}$ | 4046,54 | kN/cm ² |
| N _e é o menor valor dos dois valores dados a seguir: | | |
| $N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(L_y)^2}$ | 188,53 | kN/cm ² |
| $N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_o / r_o)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_o / r_o)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right]$ | 1338,42 | kN/cm ² |
| N _e | 188,53 | kN/cm ² |

Especialmente para as cantoneiras, essa seção também traz o dimensionamento pelo item 5.3.5.4 da NBR 8800:2024 (Figura 3.8), que depende das informações fornecidas pelo usuário. A planilha efetua o cálculo da força axial de flambagem para ambos os casos, mas uma fórmula condicional diferencia qual dos dois será utilizado.

Figura 3.8 – Subseção de cálculo da força axial de flambagem para cantoneiras

| Caso do item 5.3.5.2 - N_{ez} e N_{ex} são calculados como parâmetros auxiliares para calcular N_{exz} | | |
|---|--------------|--------------------------|
| $N_{ez} = \frac{1}{r_o^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{L_z^2} + GJ \right]$ | 2986,25 | kN/cm ² |
| $N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{L_x^2}$ | 165,15 | kN/cm ² |
| N_e é o menor valor dos dois valores dados a seguir: | | |
| $N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(L_y)^2}$ | 70,84 | kN/cm ² |
| $N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_o / r_o)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_o / r_o)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right]$ | 161,18 | kN/cm ² |
| N_e 5.3.5.2 | 70,84 | kN/cm² |

| Caso do item 5.3.5.4 - Cantoneiras simples conectadas por uma aba | | |
|---|-------|----|
| L_{x1} | 70,00 | cm |
| r_{x1} | 1,86 | cm |

3.1.6.2 Subseção de cálculo do índice de esbeltez reduzido

A segunda subseção é compartilhada entre as três abas: trata-se do cálculo do índice de esbeltez reduzido, conforme item 5.3.3.1 da NBR 8800:2024 (Figura 3.9), utilizando os valores de área efetiva e limite de escoamento, tabelados, e a força axial de flambagem, calculada na subseção anterior.

Figura 3.9 – Subseção do cálculo do índice de esbeltez reduzido

| 2. Cálculo do índice de esbeltez reduzido (λ_0) conforme item 5.3.3.1 da NBR 8800:2024 | | |
|--|------|--|
| λ_0 é calculado pela seguinte equação: | | |
| $\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g f_y}{N_e}}$ | 1,61 | |

3.1.6.3 Subseção de cálculo do fator de redução

Na sequência, um outro item comum às três abas é calculado: o fator de redução associado à resistência à compressão (Equações 21 e 20). Aqui, tendo em vista que o equacionamento depende do valor do índice de esbeltez reduzido, foi desenvolvido um arranjo em que, utilizando funções condicionais aninhadas, apenas o valor que será utilizado é mostrado, com preenchimento verde (Figura 3.10).

Figura 3.10 – Subseção de cálculo do fator de redução

| 3. Cálculo do fator de redução (χ) | | |
|---|------|--|
| O fator de redução associado à resistência à compressão (χ) é calculado pela seguinte equação: | | |
| para $\lambda_0 \leq 1,5$: | | |
| $\chi = 0,658\lambda_0^2$ | | |
| para $\lambda_0 > 1,5$: | | |
| $\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$ | 0,34 | |

Uma vez que o índice de esbeltez reduzido é maior que 1,5, a parte inferior da tabela será utilizada (Figura 3.11). Isso influenciará a lógica de programação das células subsequentes, já que toda equação que utiliza o valor do fator de redução precisará verificar em código qual das duas células está preenchida, e utilizar esse valor. Por esse motivo, como será evidenciado posteriormente, o cálculo dos parâmetros previstos do item 5.3.4.2 da norma serão realizados passo-a-passo em células separadas, com o intuito de otimizar e facilitar a lógica de programação.

Por exemplo, no cálculo de $\frac{(\frac{b}{t})_{lim}}{\sqrt{\chi}}$ a célula que efetua o cálculo deverá fazer uma verificação do valor de χ disponível. A lógica utilizada foi:

“se(não(R148=);L165/raiz(R148);L165/raiz(R151))”

ou seja, se a célula R148 (onde está armazenado o valor de χ caso $\lambda_0 \leq 1,5$) não está vazia, esse é o valor que deve ser utilizado, caso contrário, a equação deve utilizar o valor da outra célula. Esse foi o procedimento utilizado para equacionar todas as células que dependem do valor do fator de redução.

Figura 3.11 – Utilização de células diferentes para o valor de λ_0

| 2. Cálculo do índice de esbeltez reduzido (λ_0) conforme item 5.3.3.1 da NBR 8800:2024 | | |
|---|------|--|
| λ_0 é calculado pela seguinte equação: | | |
| $\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g f_y}{N_e}}$ | 1,00 | |
| | | |
| 3. Cálculo do fator de redução (χ) | | |
| O fator de redução associado à resistência à compressão (χ) é calculado pela seguinte equação: | | |
| para $\lambda_0 \leq 1,5$: | 0,43 | |
| $\chi = 0,658 \lambda_0^2$ | | |
| para $\lambda_0 > 1,5$: | | |
| $\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$ | | |

3.1.6.4 Subseção de cálculo da área efetiva

A quarta subseção do memorial de cálculo (Figuras 3.12 e 3.13) é a mais extensa e a primeira que leva em consideração cálculos que não são explicitados pela norma: da área efetiva da mesa e alma para perfis I e U e a área efetiva das mesas para cantoneiras. Por esse motivo, essa subseção foi ainda dividida em 3 partes, que serão mostradas a seguir.

Seguindo o fluxograma adaptado da NBR 8800:2024, previamente ao cálculo da área efetiva, a largura efetiva deve ser calculada, e esta depende de uma comparação entre a razão de largura por espessura do elemento e o coeficiente de redução, portanto a planilha exibe uma tabela em que esses dois parâmetros são calculados. Caso a razão de largura por espessura seja menor que a raiz quadrada do coeficiente de redução, a largura efetiva é igual à largura do elemento; caso contrário, outros três parâmetros devem ser utilizados para cálculo da largura efetiva: c_1 e c_2 , fatores dados na Tabela 5 da NBR 8800:2024 e a tensão de flambagem local, calculada pela Eq. (24).

A planilha exibe apenas os valores que estão sendo utilizados, em mecanismo semelhante ao do cálculo do fator de redução. Cabe ressaltar que existe uma diferenciação entre as abas da planilha, uma vez que para os perfis I e U é necessário efetuar separadamente o procedimento para alma e mesas.

Para perfis I, a largura utilizada para cálculo é a metade do comprimento da mesa ou a altura reta da alma; para perfis U, é o comprimento da mesa e a altura reta da alma; para cantoneiras, é o comprimento. Todos os dados são obtidos a partir dos catálogos adaptados, exceto a largura reta do perfil U, que foi calculada subtraindo duas vezes a

espessura das mesas da altura total.

Figura 3.12 – Subseção de cálculo de parâmetros auxiliares

| 4.1 Cálculo de parâmetros auxiliares ao cálculo da largura efetiva dos elementos da seção | | |
|---|-----------|-----------|
| | Aba maior | Aba menor |
| b/t | 14,00 | 10,00 |
| $(b/t)_{lim}$ <small>Tabela 4 da NBR 8800:2024</small> | 12,73 | |
| $\frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}}$ | 19,34 | |
| c_1 <small>Tabela 5 da NBR 8800:2024</small> | | |
| c_2 <small>Tabela 5 da NBR 8800:2024</small> | | |
| $\sigma_{el} = \left(c_2 \frac{(b/t)_{lim}}{b/t}\right)^2 f_y$ | | |
| $\sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}}$ | | |

Figura 3.13 – Subseção de cálculo da largura e área efetivas

| 4.2 Cálculo da largura efetiva dos elementos da seção | | | | |
|--|-----------|---|-----------|-----------------|
| A largura efetiva dos elementos é calculada conforme a seguir: | | | | |
| | Aba maior | | Aba menor | |
| para $\frac{b}{t} \leq \frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}}$, $b_{ef} = b$ | b_ef | = | 8,89 | b_ef = 6,35 cm |
| para $\frac{b}{t} > \frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}}$, $b_{ef} = b \left(1 - c_1 \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}}$ | | | | cm |
| 4.3 Cálculo da área efetiva dos elementos da seção e do perfil | | | | |
| A área efetiva aproximada do perfil é calculada conforme a seguir: | | | | |
| $A_{ef} = (b_{ef,M} + b_{ef,m}) t$ | A_ef | ≈ | 9,35 | cm ² |
| Com erro em relação à área bruta, associado a simplificação da área dos filetes: | | | | |
| $\varepsilon = \left(1 - \frac{A_{ef,perfil}}{A_g} \right) * 100$ | ε | = | 0,00 | % |

A terceira divisão dessa subseção é referente ao cálculo da área efetiva da seção, última etapa antes de calcular a força resistente. Como esse passo não é estritamente referenciado pela norma e varia de acordo com a geometria do perfil, a seguir os cálculos de área efetiva serão aprofundados.

O catálogo AISC Shapes Database disponibiliza para perfis I (Figura 2.1) a altura da alma (h), a largura da mesa (b_f) e as espessuras de alma e mesa (t_f, t_w), mas não o raio de concordância entre a alma e a mesa (R).

A área efetiva de cada mesa é dada pela Eq. (28).

$$A_{ef,mesa} = 2 b_{ef,mesa} t_f \quad (28)$$

Cabe ressaltar que a NBR 8800:2024 define a variável “b” como metade do comprimento da mesa, conforme definido na revisão bibliográfica, por isso o comprimento efetivo é calculado com base nessa variável. Sendo assim, a área efetiva compensa essa questão ao dobrar a largura efetiva.

Já a área efetiva da alma é calculada pela Eq. (29).

$$A_{ef,alma} = b_{ef,alma} t_w \quad (29)$$

Por fim, a área total da seção transversal é dada pela Eq. (30).

$$A_{ef,perfil} = A_{ef,alma} + 2 A_{ef,mesa} \quad (30)$$

Como a área é calculada sem levar em consideração o raio de concordância entre a alma e a mesa, existe um erro de cálculo associado em relação à área disponibilizada pelo catálogo, que é calculado e exibido na planilha (Figura 3.14).

Figura 3.14 – Subseção de cálculo da área efetiva do perfil I

| 4.3 Cálculo da área efetiva dos elementos da seção e do perfil | | | | |
|--|------|---|-------|-----------------|
| A área efetiva dos elementos é calculada conforme a seguir: | | | | |
| | Mesa | | | |
| $A_{ef,mesa} = 2 b_{ef,mesa} t_f$ | A_ef | = | 17,09 | cm ² |
| | Alma | | | |
| $A_{ef,alma} = b_{ef,alma} t_w$ | A_ef | = | 11,10 | cm ² |
| A área efetiva aproximada do perfil é calculada conforme a seguir: | | | | |
| $A_{ef,perfil} = A_{ef,alma} + 2 A_{ef,mesa}$ | A_ef | ≈ | 47,40 | cm ² |
| Com erro em relação à área bruta, associado a simplificação da área dos filetes: | | | | |
| $\varepsilon = \left(1 - \frac{A_{ef,perfil}}{A_g}\right) * 100$ | ε | = | 0,00 | % |

Para o perfil U (Figura 2.3), o catálogo contém a altura total (d), o comprimento das mesas (b_f), e as espessuras da alma e das mesas (t_w, t_f).

O equacionamento é semelhante ao do perfil I, com exceção da variável utilizada como “ b ”, que no caso do perfil U é a largura da mesa (Figura 3.15).

Figura 3.15 – Subseção de cálculo da área efetiva do perfil U

| 4.3 Cálculo da área efetiva dos elementos da seção e do perfil | | | | |
|--|------|---|-------|-----------------|
| A área efetiva dos elementos é calculada conforme a seguir: | | | | |
| | Mesa | | | |
| $A_{ef,mesa} = 2 b_{ef,mesa} t_f$ | A_ef | = | 7,73 | cm ² |
| | Alma | | | |
| $A_{ef,alma} = (b_{ef} - 2 t_f) t_w$ | A_ef | = | 22,32 | cm ² |
| A área efetiva aproximada do perfil é calculada conforme a seguir: | | | | |
| $A_{ef,perfil} = A_{ef,alma} + 2 A_{ef,mesa}$ | A_ef | ≈ | 37,90 | cm ² |
| Com erro em relação à área bruta, associado a simplificação da área dos filetes: | | | | |
| $\varepsilon = \left(1 - \frac{A_{ef,perfil}}{A_g}\right) * 100$ | ε | = | 0,00 | % |

As dimensões disponíveis para a cantoneira (Figura 2.2) são a espessura (t) e as larguras das duas mesas (d , b). Para a maioria das cantoneiras, as duas mesas têm largura igual, mas como alguns perfis do catálogo têm mesas desiguais, o cálculo foi generalizado.

A Eq. (31) é utilizada para cálculo da área efetiva da cantoneira.

$$A_{ef} = (b_{ef,M} + b_{ef,m}) t \quad (31)$$

onde:

- $b_{ef,M}$ é o comprimento da mesa maior
- $b_{ef,m}$ é o comprimento da mesa menor

3.1.6.5 Apresentação final dos resultados

A última seção das abas de dimensionamento (Figura 3.16) trata da apresentação dos resultados, muito parecida com a segunda seção, e exibe a força axial resistente de cálculo, o critério de dimensionamento e uma mensagem a respeito da aceitação ou não do perfil selecionado, dadas as entradas do usuário.

Figura 3.16 – Seção de apresentação dos resultados

| Apresentação dos resultados | | | | | |
|--|-------------------|---|--------|----|--|
| Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo (N _{c,Rd}) conforme item 5.3.2 da NBR 8800:2024 | | | | | |
| N _{c,Rd} deve ser determinada pela equação: | | | | | |
| $N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma_{a1}}$ | N _{c,Rd} | = | 150,31 | kN | |
| No dimensionamento de barras prismáticas submetidas a força axial de compressão, deve ser atendida a condição: | | | | | |
| $N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$ | 31,018 | ≤ | 150,31 | kN | |
| Perfil dimensionado! | | | | | |

3.1.6.6 Catálogos

As abas de catálogo (Figura 3.17), adaptadas da AISC Shapes Database, são comuns entre as planilhas de compressão e tração. Todas trazem o menu para navegação e, logo abaixo, todas as propriedades necessárias para o dimensionamento.

Figura 3.17 – Catálogo de perfis U - Adaptado de AISC Shapes Manual V16.0

| Catálogo de perfis U - AISC SHAPES DATABASE V16.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------|---------|--------|-------------------|---------|---------|-------------------|-------------------|---------|-------------------|----------|---------|----------------------------|------|----------------|----------------|----------|---------|----------------|
| amento I | Dimensionamento U | | | Dimensionamento L | | | Catálogo I - AISC | Catálogo U - AISC | | Catálogo L - AISC | | | Tabela A.2 - NBR 8800:2024 | | | Tabela 3 - NBR | | | |
| Catálogo de perfis U - AISC SHAPES DATABASE V16.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Classificação | W (kg/m) | A (cm²) | d (cm) | tw (cm) | bf (cm) | tf (cm) | Ix (cm⁴) | Wx (cm³) | rx (cm) | Iy (cm⁴) | Wy (cm³) | ry (cm) | x (cm) | b/t | e _o | h/tw | Cw (cm⁶) | J (cm⁴) | r _o |
| C75X8,9 | 8,90 | 11,40 | 7,62 | 0,90 | 4,06 | 0,69 | 86,20 | 22,60 | 2,77 | 12,50 | 4,31 | 1,05 | 1,16 | 5,86 | 0,82 | 5,03 | 124,00 | 3,02 | 3,56 |

3.1.7 Abas para consulta das Tabelas A.2 e 3

As abas referentes às Tabelas 2.1 e 2.2 adaptadas da ABNT 8800:2024, de forma semelhante, também são comuns às duas planilhas e trazem o menu de navegação e as informações correspondentes logo abaixo, com o nome das abas referenciando a numeração das tabelas pela norma (Figura 3.18).

Figura 3.18 – Tabela 3 - Adaptado de NBR 8800:2024

Tabela 3 - Valores dos coeficientes de ponderação das resistências (γm) - NBR 8800:2024

| | | | | | | |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|--------------------------|
| Dimensionamento U | Dimensionamento L | Catálogo I - AISC | Catálogo U - AISC | Catálogo I - AISC | Tabela A.2 - NBR 8800:2024 | Tabela 3 - NBR 8800:2024 |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|--------------------------|

Tabela 3 - Valores dos coeficientes de ponderação das resistências (γm) - NBR 8800:2024

| Combinações últimas | Aço estrutural | |
|----------------------------|----------------------------------|---------------|
| | Escoamento e instabilidade (γa1) | Ruptura (γa2) |
| Normais | 1,1 | 1,35 |
| Especiais ou de construção | 1,1 | 1,35 |
| Excepcionais | 1 | 1,15 |

Fonte: Adaptado de NBR 8800:2024

3.2 PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO À TRAÇÃO

Na planilha para dimensionamento de barras prismáticas à esforços de tração, a estrutura é semelhante, com menu de navegação, resumo dos resultados, propriedades do material e do perfil selecionado e memorial de cálculo contendo todas as informações requisitadas pela NBR 8800:2024, com cálculo do coeficiente de redução de área líquida (C_t), área líquida efetiva e apresentação dos resultados.

3.2.1 Interface gráfica para configuração de furos

A diferenciação fica por conta da particularidade previamente mencionada a respeito do impacto da furação no dimensionamento. Como há uma gama de possibilidades para o usuário configurar o tipo de furação, o diâmetro dos furos e seu posicionamento na alma ou mesa, a implementação direta utilizando apenas as fórmulas do MS Excel[®] é trabalhosa e pouco eficiente, resultando em muitas células utilizadas para essa configuração, podendo ainda ter disposição e fluxo confusos para o usuário.

Por conta disso, foi desenvolvida uma interface para configuração de furos simples (Figura 3.19) e em zigue-zague (Figura 3.20) utilizando Visual Basic Application (VBA) nativamente na planilha.

Ainda nos dados de entrada, ao definir qual o tipo de furação empregada dentre três opções (sem furos, furos simples, furos em zigue-zague) é mostrada ao usuário a interface, com todas as informações necessárias para um correto dimensionamento conforme a NBR 8800:2024.

Figura 3.19 – Interface de configuração para furos simples

Quantidade transversal de furos nas mesas

Dimensão máxima do(s) furo(s) nas mesas [mm] (Tabela 14)

Quantidade transversal de furos na alma

Dimensão máxima do(s) furo(s) na alma [mm] (Tabela 14)

Insira 0 se não houver furos no elemento

Furo feito com broca? ☐ Sim ☐ Não

Tabela 14 – Dimensões máximas de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas

| Unidades | Diâmetro do parafuso ou barra redonda rosqueada d_b | Diâmetro do furo-padrão | Diâmetro do furo alargado | Dimensões do furo pouco alongado | Dimensões do furo muito alongado |
|------------|---|-------------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| polegadas | 1/2 | 9/16 | 5/8 | 9/16 × 11/16 | 9/16 × 1 1/4 |
| | 5/8 | 11/16 | 13/16 | 11/16 × 7/8 | 11/16 × 1 9/16 |
| | 3/4 | 13/16 | 15/16 | 13/16 × 1 | 13/16 × 1 7/8 |
| | 7/8 | 15/16 | 1 1/16 | 15/16 × 1 1/8 | 15/16 × 2 3/16 |
| | 1 | 1 1/8 | 1 1/4 | 1 1/8 × 1 5/16 | 1 1/8 × 2 1/2 |
| | ≥ 1 1/8 | $d_b + 1/8$ | $d_b + 5/16$ | $(d_b + 1/8) × (d_b + 3/8)$ | $(d_b + 1/8) × 2,5 d_b$ |
| milímetros | 16 | 18 | 20 | 18 × 22 | 18 × 40 |
| | 20 | 22 | 24 | 22 × 26 | 22 × 50 |
| | 22 | 24 | 28 | 24 × 30 | 24 × 55 |
| | 24 | 27 | 30 | 27 × 32 | 27 × 60 |
| | 27 | 30 | 35 | 30 × 37 | 30 × 67 |
| | 30 | 33 | 38 | 33 × 40 | 33 × 75 |
| | ≥ 36 | $d_b + 3$ | $d_b + 8$ | $(d_b + 3) × (d_b + 10)$ | $(d_b + 3) × 2,5 d_b$ |

Figura 3.20 – Interface de configuração para furos em zigue-zague

Configurar furos em zigue-zague ✕

Mesas

Quantidade de furos

s [mm]

g [mm]

Diâmetro dos furos [mm]

Alma

Quantidade de furos

s [mm]

g [mm]

Diâmetro dos furos [mm]

Insira 0 se não houver furos no elemento

De acordo com o item 5.2.4.1 b) da NBR 8800:2024

Os dados coletados são armazenados em uma aba de dados auxiliares, para que possam ser aproveitados ao longo da implementação de fórmulas a partir de fluxos condicionais.

3.2.2 Validação da interface gráfica para configuração de furos

Outra particularidade da planilha de dimensionamento à tração é o cálculo da área líquida. Assim como no caso do dimensionamento à compressão, esse cálculo não é

estritamente definido pela norma. Isso, somado a variação da presença ou não de furos, tanto na mesa quanto na alma, torna a formulação complexa e altamente suscetível a erros. Por esse motivo, essa seção foi cuidadosamente projetada e posteriormente validada a partir de um modelo 3D no *software* de *Computer Aided Design* (CAD) OnShape[®], no qual foi replicado um perfil W250X67 com furos simples na mesa e na alma, feitos com broca.

Para esse exemplo, foram configurados na interface quatro furos de 18 mm na mesa e um furo de 20 mm na alma (Figura 3.21).

Figura 3.21 – Configuração de um exemplo para furos simples

Quantidade transversal de furos nas mesas

Dimensão máxima do(s) furo(s) nas mesas [mm] (Tabela 14)

Quantidade transversal de furos na alma

Dimensão máxima do(s) furo(s) na alma [mm] (Tabela 14)

Insira 0 se não houver furos no elemento

Furo feito com broca?

Sim

Não

OK

Cancelar

Tabela 14 – Dimensões máximas de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas

| Unidades | Diâmetro do parafuso ou barra redonda rosqueada d_b | Diâmetro do furo-padrão | Diâmetro do furo alargado | Dimensões do furo pouco alongado | Dimensões do furo muito alongado |
|------------|---|-------------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| polegadas | 1/2 | 9/16 | 5/8 | 9/16 × 11/16 | 9/16 × 1 1/4 |
| | 5/8 | 11/16 | 13/16 | 11/16 × 7/8 | 11/16 × 1 9/16 |
| | 3/4 | 13/16 | 15/16 | 13/16 × 1 | 13/16 × 1 7/8 |
| | 7/8 | 15/16 | 1 1/16 | 15/16 × 1 1/8 | 15/16 × 2 3/16 |
| | 1 | 1 1/8 | 1 1/4 | 1 1/8 × 1 5/16 | 1 1/8 × 2 1/2 |
| | ≥ 1 1/8 | $d_b + 1/8$ | $d_b + 5/16$ | $(d_b + 1/8) × (d_b + 3/8)$ | $(d_b + 1/8) × 2,5 d_b$ |
| milímetros | 16 | 18 | 20 | 18 × 22 | 18 × 40 |
| | 20 | 22 | 24 | 22 × 26 | 22 × 50 |
| | 22 | 24 | 28 | 24 × 30 | 24 × 55 |
| | 24 | 27 | 30 | 27 × 32 | 27 × 60 |
| | 27 | 30 | 35 | 30 × 37 | 30 × 67 |
| | 30 | 33 | 38 | 33 × 40 | 33 × 75 |
| | ≥ 36 | $d_b + 3$ | $d_b + 8$ | $(d_b + 3) × (d_b + 10)$ | $(d_b + 3) × 2,5 d_b$ |

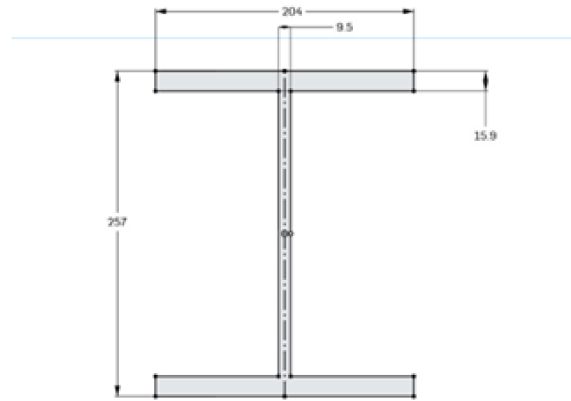
Considerando a combinação do perfil escolhido com a furação configurada, a área líquida resultou em $72,45 \text{ cm}^2$ pelos cálculos da planilha (Figura 3.22).

Figura 3.22 – Área líquida calculada para o exemplo proposto

| 2. Cálculo da área líquida (An) conforme item 5.2.4 da NBR 8800:2024 | | |
|---|-------------------|-----|
| Em regiões com furos, a área líquida, An, de uma barra é calculada conforme a seguir: | | |
| $A_n = A_g - (D_{furos,alma} \cdot n_{furos,alma} \cdot t_w) - (D_{furos,mesa} \cdot n_{furos,mesa} \cdot t_f)$ | Furos simples | |
| $A_n = A_g - \left(D_{furos,alma} \cdot n_{furos,alma} \cdot t_w + \frac{s^2}{4g} \right) - \left(D_{furos,mesa} \cdot n_{furos,mesa} \cdot t_f + \frac{s^2}{4g} \right)$ | Furos zigue-zague | |
| $A_n = A_g$ | Sem furos | |
| Em que s, g são obtidos conforme Figura 3 da NBR 8800:2024; D, n são diâmetro dos furos e quantidade de furos, respectivamente, na mesa e na alma | | |
| An | 72,45 | cm² |

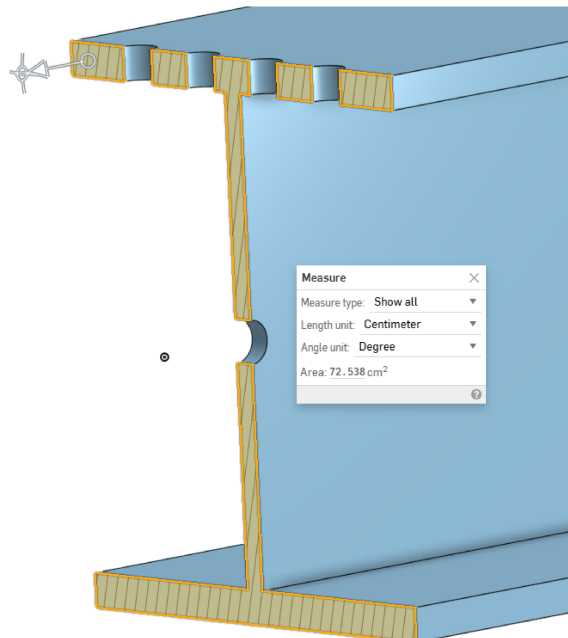
O perfil foi esboçado em CAD (Figura 3.23) utilizando os dados disponíveis no catálogo da planilha: 204 mm de largura das mesas, 257 mm de altura total, 9,5 mm de espessura da alma e 15,9 mm de espessura das mesas.

Figura 3.23 – Esboço do perfil em CAD para o exemplo proposto



Configurados os furos nas mesas e alma, foi avaliada a área da seção transversal utilizando ferramenta do próprio *software*, que resultou em $72,53 \text{ cm}^2$, um erro de 0,11 %, validando assim os cálculos implementados na planilha (Figura 3.24).

Figura 3.24 – Resultado do cálculo da área no *software* de CAD



3.2.3 Seção de entrada de dados da planilha para tração

Além da configuração de furos, a planilha para dimensionamento à tração permite ao usuário inserir dados para verificação de ruptura por rasgamento (cisalhamento de

bloco) de acordo com o item 6.5.6 da norma (Figura 3.25). Essa condição é verificada antes de mostrar ao usuário a força axial resistente de cálculo. As variáveis A_{gv} , A_{nv} , A_{nt} e C_{ts} são requisitadas como dados de entrada e utilizadas diretamente para cálculo de acordo com a Eq. (27), ficando a cargo do usuário calculá-las previamente (Figura 3.26). Se for menor, a força resistente desta é exibida ao invés das calculadas para escoamento da seção bruta e líquida.

Figura 3.25 – Seção de entrada de dados com configuração de colapso por rasgamento

| Dados de Entrada | | | |
|--|----------------|--|-----------------|
| Selecione o material | A572 - Grau 50 | Comprimento destravado em relação X-X (Lx) | 300 cm |
| Selecione o perfil | L64X64X6,4 | Comprimento destravado em relação Y-Y (Ly) | 300 cm |
| Selecione a combinação conforme tabela 3 | Normais | Comprimento destravado em relação a torção (Lz) | 70,71 cm |
| Tipo de furação | Furos simples | Força Solicitante de cálculo (Nt,Sd) | 380 kN |
| Forma de transmissão da força de tração | | Somente por soldas longitudinais ou parafusos, Combinações de soldas | |
| Excentricidade da ligação (ec) - 5.2.5 ABNT 8800:2024 | 1,8 cm | Comprimento efetivo da ligação (lc) - 5.2.5 ABNT 8800:2024 | 16 cm |
| Insira as variáveis para cálculo de estado-limite de colapso por rasgamento, se aplicável De acordo com item 6.5.6 da NBR 8800:2024 | Agv | 11,66 | cm ² |
| | Anv | 7,06 | cm ² |
| | Ant | 1,32 | cm ² |
| | Cts | 1 | |

Figura 3.26 – Seção de verificação de colapso por rasgamento

| Verificação de colapso por rasgamento | | | |
|--|------------------------|--------|----|
| $F_{r,Rd} = \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60 f_u A_{nv} + C_{ts} f_u A_{nt})$ | Colapso por rasgamento | 185,20 | kN |
| $F_{r,Rd} = \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60 f_y A_{gv} + C_{ts} f_u A_{nt})$ | Colapso por rasgamento | 225,38 | kN |
| Nt,Rd | | 185,20 | kN |

4 RESULTADOS

Para a validação das planilhas, elas foram utilizadas na resolução de 5 problemas cujos resultados já eram conhecidos. Uma vez que a planilha de compressão diferencia os três perfis em três abas distintas, três dos cinco exercícios escolhidos são referentes ao dimensionamento de barras prismáticas a esforços de compressão de perfis I, U e cantoneiras. Já a planilha de dimensionamento à tração dedica uma aba às cantoneiras e outra aba compartilhada para perfis I e U, logo há um exercício para perfis I e outro para cantoneiras.

4.1 VALIDAÇÃO PARA COMPRESSÃO DE PERFIS I

O exemplo selecionado para validar a aba de compressão para perfis I foi o problema resolvido 5.8.1 do livro "Estruturas de aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008".

Determinar a resistência de cálculo à compressão do perfil W 150 X 37,1 kg/m de aço ASTM A36 com comprimento de 3 m, sabendo-se que suas extremidades são rotuladas e que há contenção lateral impedindo a flambagem em torno do eixo y. Comparar com o resultado obtido para uma peça sem contenção lateral, podendo flambar em torno do eixo y-y (PFEIL; PFEIL, 2009, p. 138)

Configurando os parâmetros do exercício na planilha obtem-se (Figura 4.1):

Figura 4.1 – Configuração do exemplo para perfil I na planilha

| Dados de Entrada | | | |
|--|---------------|---|--------|
| Selecione o material | A36 | Comprimento destravado em relação X-X (Lx) | 300 cm |
| Selecione o perfil | W150X37.1 | Comprimento destravado em relação Y-Y (Ly) | 300 cm |
| Selecione a combinação conforme tabela 3 | Normais | Comprimento destravado em relação a torção (Lz) | 0 cm |
| Tipo de apoio | Bi-Articulado | Força Solicitante de cálculo (Nc,Sd) | 0 kN |

Aqui, a configuração foi realizada já considerando a segunda parte do exercício, em que não há contenção lateral, portanto existe a possibilidade de flambagem no eixo Y.

No livro, o autor calcula $\lambda_x = 43,80$, $\lambda_y = 78,1$, $\lambda_0 = 0,88$ e $N_{c,Rd} = 786 \text{ kN}$. Como o texto foi escrito em 2009, a versão da norma utilizada pelo autor não contem as atualizações da NBR 8800:2024. Por isso, o cálculo de não inclui o fator χ , mas de forma indireta calcula f_c , tensão nominal resistente, que considera o fator de redução χ .

Na planilha, obtém-se os valores de $\lambda_x = 43,73$, $\lambda_y = 77,2$, $\lambda_0 = 0,87$ e $N_{c,Rd} = 784,13 \text{ kN}$, que tem erro máximo de 1,02 %. Em especial, o valor de $N_{c,Rd}$ varia em apenas 0,24 %, validando os processos empregados no trabalho. Essa variação se dá por conta dos valores disponíveis no catálogo utilizado, que diferem ligeiramente dos valores de (PFEIL; PFEIL, 2009) (Figura 4.2).

Figura 4.2 – Resultados do exemplo para perfil I na planilha

| Resumo dos resultados | | | | | |
|-----------------------|-------|--------|----------------------|---|-----------|
| λ_x | 43,73 | < | 200 | Perfil dentro da limitação do índice de esbeltez conforme item 5.3.7.1 da NBR 8800:2024 | |
| λ_y | 77,72 | < | 200 | Perfil dentro da limitação do índice de esbeltez conforme item 5.3.7.1 da NBR 8800:2024 | |
| Nc,Sd | | 0 kN | | Nc,Rd | 784,13 kN |
| 0 | ≤ | 784,13 | Perfil dimensionado! | | |

4.2 VALIDAÇÃO PARA COMPRESSÃO DE CANTONEIRAS

Para validar a aba dedicada a cantoneiras, foi selecionado o problema resolvido 5.8.6 do mesmo livro utilizado no exemplo resolvido da seção anterior.

Calcular o esforço de compressão resistente de projeto de duas cantoneiras 203(8") X102(4") X 55,66 kg/m trabalhando isoladamente [...]. Admitir $l_{fl} = 300 \text{ cm}$ nos dois planos de flambagem e aço MR250. (PFEIL, 2009, p. 145)

Ainda que a Tabela A.2 da NBR 8800:2024 não disponibilize os valores de f_u e f_y para o aço MR250, Pfeill explica na introdução de seu livro que utiliza a especificação ABNT NBR 7007:

Segundo a especificação NBR 7007 [...] os aços podem ser enquadrados nas seguintes categorias, designadas a partir do limite de escoamento de aço f_y (ver Seção 1.5):
MR250, aço de média resistência ($f_y = 250 \text{ MPa}$; $f_u = 400 \text{ MPa}$). (PFEILL, 2009, p.11)

Percebe-se que o aço MR250 tem limite de escoamento e limite de resistência a tração equivalentes ao aço A36 da tabela A.2, logo este será utilizado na configuração (Figura 4.3). Além disso, o perfil utilizado pelo autor não está listado no catálogo utilizado, portanto foi adicionado para realização do exercício:

Figura 4.3 – Configuração do exemplo para compressão em cantoneira na planilha

| Dados de Entrada | | | |
|--|----------------------------|---|--------|
| Selecione o material | A36 | Comprimento destravado em relação X-X (L_x) | 300 cm |
| Selecione o perfil | L203x102x55,66 (exercício) | Comprimento destravado em relação Y-Y (L_y) | 300 cm |
| Selecione a combinação conforme tabela 3 | Normais | Comprimento destravado em relação a torção (L_z) | 300 cm |
| Tipo de apoio | Bi-Articulado | Força Solicitante de cálculo (N_c, S_d) | 0 kN |
| A cantoneira atende a todos os quesitos do item 5.3.5.4? | Não | Verifique as exigências do item 5.3.5.4.1 da NBR 8800:2024! | |

No livro, o autor calcula $\lambda_z = 139$, $\lambda_0 = 1,57$ e $N_{c,Rd} = 1148 \text{ kN}$ para duas cantoneiras.

Na planilha, obtém-se os valores de $\lambda_z = 138,9$, $\lambda_0 = 1,57$ e $N_{c,Rd} = 573,88 \text{ kN}$ por cantoneira, ou seja, 1147,76 kN para duas cantoneiras. O valor de $N_{c,Rd}$ varia em apenas 0,02 %, validando os processos empregados no trabalho (Figura 4.4).

Figura 4.4 – Resultados do exemplo para compressão em cantoneira na planilha

| Resumo dos resultados | | | |
|---|-------|-----------|----------------------|
| λ_x | 47,02 | < | 200 |
| λ_y | 114,5 | < | 200 |
| λ_z | 138,9 | < | 200 |
| Perfil dentro da limitação do índice de esbeltez conforme item 5.3.7.1 da NBR 8800:2024 | | | |
| Perfil dentro da limitação do índice de esbeltez conforme item 5.3.7.1 da NBR 8800:2024 | | | |
| Perfil dentro da limitação do índice de esbeltez conforme item 5.3.7.1 da NBR 8800:2024 | | | |
| N_c, S_d | | 0 kN | |
| N_c, R_d | | 573,88 kN | |
| 0 | ≤ | 573,88 | Perfil dimensionado! |

4.3 VALIDAÇÃO PARA COMPRESSÃO DE PERFIS U

Na validação de compressão de perfis U, foi selecionado um exemplo apresentado pelo professor Ricardo Humberto de Oliveira Filho na disciplina de Estruturas Metálicas do curso de graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Ao decorrer da disciplina, o professor propõe o projeto de um galpão em estrutura de aço como forma de aplicar os conhecimentos adquiridos a respeito da NBR 8800:2024 e da NBR 14762:2010. Nesse contexto, uma das passagens do projeto é o dimensionamento do banzo superior da treliça das tesouras à compressão.

Nesse exemplo, o professor seleciona o perfil U 76,2x6,11 baseado em uma estimativa da área efetiva mínima de um perfil submetido a compressão com $\lambda_0 = 0,5$ com comprimentos destravados $L_x = L_y = L_z = 185,6 \text{ cm}$. (OLIVEIRA FILHO, 2025a)

Embora o perfil C75X6.1 disponível na aba de catálogo da planilha em muito se aproxime do perfil selecionado pelo professor, foi inserida uma nova entrada no catálogo com os dados do perfil selecionado na aula, para minimizar os erros que seriam causados pela diferença de valores nas propriedades geométricas e facilitar a identificação de erros inerentes a formulação da planilha. As propriedades inseridas manualmente constam na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados inseridos no catálogo para validação comparativa

| r_0 (cm) | A (cm ²) | d (cm) | t_w (cm) | t_f (cm) | b_f (cm) |
|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 3,88 | 7,78 | 7,62 | 4,32 | 6,93 | 35,8 |
| xCG (cm) | I _x (cm ⁴) | W _x (cm ³) | r _x (cm) | I _y (cm ⁴) | W _y (cm ³) |
| 11,10 | 68,90 | 18,10 | 2,98 | 21,3 | 8,20 |
| r _y (cm) | b/t | e _o (cm) | h/t _w | C _w (cm ⁶) | J (cm ⁶) |
| 1,03 | 2,60 | 2,26 | 14,44 | 64,00 | 1,00 |

Fonte: Adaptado de Oliveira Filho, 2025

Os cálculos do professor resultam em $\lambda_x = 62,3$, $\lambda_y = 180,2$, $N_{ex} = 394,25 \text{ kN}$, $N_{ey} = 47 \text{ kN}$, $N_{exz} = 284,7 \text{ kN}$. $\lambda_0 = 2,03$, $\chi = 0,213$ e $N_{c,Rd} = 37,66 \text{ kN}$.

A configuração do problema proposto resulta em $\lambda_x = 62,28$, $\lambda_y = 180,2$, $N_{ex} = 394,81 \text{ kN}$, $N_{ey} = 46,99 \text{ kN}$, $N_{exz} = 284,7 \text{ kN}$. $\lambda_0 = 2,03$, $\chi = 0,212$ e $N_{c,Rd} = 37,46 \text{ kN}$, validando o procedimento utilizado na planilha apesar de pequenas variações de no máximo 0,5 % (Figura 4.5).

Figura 4.5 – Resultados da validação para compressão em perfis U

| Dados de Entrada | | | | | |
|--|----------------|--|--|-----------|--|
| Selecione o material | A36 | | Comprimento destravado em relação X-X (L _x) | 185,6 cm | |
| Selecione o perfil | C 76x6,1 (ex.) | | Comprimento destravado em relação Y-Y (L _y) | 185,6 cm | |
| Selecione a combinação conforme tabela 3 | Normais | | Comprimento destravado em relação a torção (L _z) | 185,6 cm | |
| Tipo de apoio | Bi-Articulado | | Força Solicitante de cálculo (N _c ,S _d) | 31,018 kN | |

| Resumo dos resultados | | | | | |
|--------------------------------|-------|-----------|-----|---|--|
| λ_x | 62,28 | < | 200 | Perfil dentro da limitação do índice de esbeltez conforme item 5.3.7.1 da NBR 8800:2024 | |
| λ_y | 180,2 | < | 200 | Perfil dentro da limitação do índice de esbeltez conforme item 5.3.7.1 da NBR 8800:2024 | |
| N _c ,S _d | | 31,018 kN | | N _c ,R _d | |
| 31,018 | | ≤ | | 37,46 | |
| Perfil dimensionado! | | | | | |

4.4 VALIDAÇÃO PARA TRAÇÃO DE PERFIS I E U

A validação para tração de perfis I e U será realizada levando em consideração o problema 2.3.7, proposto por Pfeil, que trata de um perfil U 381x50,4 em aço MR250, com $b_f = 86,4 \text{ mm}$, $d = 381 \text{ mm}$, 4 furos simples alinhados na mesma seção transversal, de diâmetro 25,5 mm, $e_c = 2 \text{ cm}$, $l_c = 7,5 \text{ cm}$, $A_{gv} = 30,6 \text{ cm}^2$, $A_{nv} = 22,8 \text{ cm}^2$, $A_{nt} = 18,2 \text{ cm}^2$, $f_y = 250 \text{ MPa}$ e $f_u = 450 \text{ MPa}$. Esse perfil é equivalente ao C380x50,4 que consta no catálogo utilizado.

Configura-se os dados do problema na seção de entrada de dados (Figura 4.6) e na interface de configuração de furos (Figura 4.7):

Figura 4.6 – Configuração na planilha para tração do perfil U de exemplo

| Dados de Entrada | | | |
|--|---------------|--|-----------------|
| Selecione o material | A36 | Comprimento destravado em relação X-X (Lx) | 300 cm |
| Selecione o perfil | C380X50,4 | Comprimento destravado em relação Y-Y (Ly) | 300 cm |
| Selecione a combinação conforme tabela 3 | Normais | Comprimento destravado em relação a torção (Lz) | 300 cm |
| Tipo de furação | Furos simples | Força Solicitante de cálculo (Nt,Sd) | 300 kN |
| Forma de transmissão da força de tração | | Somente por soldas longitudinais ou parafusos, Combinações de soldas | |
| Excentricidade da ligação (ec) - 5.2.5 ABNT 8800:2024 | 2 cm | Comprimento efetivo da ligação (lc) - 5.2.5 ABNT 8800:2024 | 7,5 cm |
| Insira as variáveis para cálculo de estado-limite de colapso por rasgamento, se aplicável De acordo com item 6.5.6 da NBR 8800:2024 | Agv | 30,6 | cm ² |
| | Anv | 22,8 | cm ² |
| | Ant | 18,2 | cm ² |
| | Cts | 1 | |

Figura 4.7 – Configuração de furos na interface para tração do perfil U de exemplo

Configurar Ligação Parafusada Simples

Quantidade transversal de furos na mesa: 4

Dimensão máxima do(s) furo(s) na mesa [mm] (Tabela 14): 25,5

Quantidade transversal de furos na alma: 0

Dimensão máxima do(s) furo(s) na alma [mm] (Tabela 14): 0

Insira 0 se não houver furos no elemento

Furo feito com broca? ☒ Sim ☐ Não

OK Cancelar

| Unidades | Diâmetro do parafuso ou barra redonda rosqueada d_b | Diâmetro do furo-padrão | Diâmetro do furo alargado | Dimensões do furo pouco alongado | Dimensões do furo muito alongado |
|-----------|---|-------------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| polegadas | 1/2 | 9/16 | 5/8 | 9/16 × 11/16 | 9/16 × 1 1/4 |
| | 5/8 | 11/16 | 13/16 | 11/16 × 7/8 | 11/16 × 1 9/16 |
| | 3/4 | 13/16 | 15/16 | 13/16 × 1 | 13/16 × 1 7/8 |
| | 7/8 | 15/16 | 1 1/16 | 15/16 × 1 1/8 | 15/16 × 2 3/16 |
| | 1 | 1 1/8 | 1 1/4 | 1 1/8 × 1 5/16 | 1 1/8 × 2 1/2 |
| | ≥ 1 1/8 | $d_b + 1/8$ | $d_b + 5/16$ | $(d_b + 1/8) \times (d_b + 3/8)$ | $(d_b + 1/8) \times 2,5 d_b$ |
| | milímetros | 16 | 18 | 20 | 18 × 22 |
| 20 | | 22 | 24 | 22 × 26 | 22 × 50 |
| 22 | | 24 | 28 | 24 × 30 | 24 × 55 |
| 24 | | 27 | 30 | 27 × 32 | 27 × 60 |
| 27 | | 30 | 35 | 30 × 37 | 30 × 67 |
| 30 | | 33 | 38 | 33 × 40 | 33 × 75 |
| ≥ 36 | | $d_b + 3$ | $d_b + 8$ | $(d_b + 3) \times (d_b + 10)$ | $(d_b + 3) \times 2,5 d_b$ |

O autor calcula os três valores para a força resistente: por escoamento da seção

bruta, com valor de 1459 *kN*, por ruptura da seção líquida, com valor de 1169 *kN* e por ruptura de cisalhamento de bloco, com valor de 879 *kN*, que é utilizado.

Para comparação, a área líquida efetiva calculada pelo autor foi de 39,4 *cm*² e a área líquida foi de 53,8 *cm*².

A área líquida efetiva calculada pela planilha foi de 39,46 *cm*² e a área líquida foi de 53,91 *cm*² (Figura 4.8).

Figura 4.8 – Cálculo das áreas para o problema proposto de tração do perfil U

| | | |
|----|-------|-----|
| An | 53,81 | cm² |
|----|-------|-----|

| | | | |
|--|-------|-----|-----|
| 2. Cálculo da área líquida efetiva (Ae) conforme item 5.2.3 da NBR 8800:2024 | | | |
| A área líquida efetiva de uma barra, Ae, é calculada conforme a seguir | | | |
| $A_e = C_t A_n$ | | | cm² |
| Ae | 39,46 | cm² | |

Verifica-se que as forças axiais de tração resistentes de cálculo foram calculadas corretamente, validando o processo empregado nessa seção do trabalho (Figura 4.9).

Figura 4.9 – Resultado para o problema proposto de tração do perfil U

| | | | |
|--|-----------------------------|---------|----|
| Cálculo da força axial de tração resistente de cálculo (N _{t,Rd}) conforme item 5.3.2 da NBR 8800:2024 e verificação de colapso por rasgamento | | | |
| A força axial de tração resistente de calculo N _{t,Rd} é o menor dos valores obtidos a seguir: | | | |
| $N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}}$ | Escoamento da seção bruta | 1465,91 | kN |
| $N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}}$ | Escoamento da seção líquida | 1169,16 | kN |
| Verificação de colapso por rasgamento | | | |
| $F_{t,Rd} = \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60 f_u A_{nv} + C_{ts} f_u A_{nt})$ | Colapso por rasgamento | 944,59 | kN |
| $F_{t,Rd} = \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60 f_y A_{gv} + C_{ts} f_u A_{nt})$ | Colapso por rasgamento | 879,26 | kN |
| N _{t,Rd} | | 879,26 | kN |

4.5 VALIDAÇÃO PARA TRAÇÃO DE CANTONEIRAS

Para validar a aba de tração de cantoneiras, novamente foi selecionado um exemplo ministrado pelo professor Ricardo Humberto de Oliveira Filho na disciplina de Estruturas

Metálicas da UFU.

Neste exemplo, o professor propõe avaliar a segurança de duas cantoneiras 64x6,3 mm, com um furo de diâmetro equivalente 1,62 cm, $A_g = 7,68 \text{ cm}^2$, $f_y = 35 \text{ kN/cm}^2$, $f_u = 45 \text{ kN/cm}^2$, combinação última normal, $e_c = 1,8 \text{ mm}$, $l_c = 16 \text{ mm}$, $A_{gv} = 11,66 \text{ cm}^2$, $A_{nv} = 7,06 \text{ cm}^2$, $A_{nt} = 1,32 \text{ cm}^2$, sujeitas a um esforço de 380 kN de tração axial (OLIVEIRA FILHO, 2025b).

Ao configurar os requisitos do problema, alterando manualmente os valores de f_y e f_u , obtém-se os valores apresentados (Figura 4.10).

Figura 4.10 – Configuração do problema proposto para tração em cantoneiras

| Dados de Entrada | | | | | |
|---|---------------|-------|--|-------|----|
| Selecione o material | A36 | | Comprimento destravado em relação X-X (Lx) | 300 | cm |
| Selecione o perfil | L64X64X6,4 | | Comprimento destravado em relação Y-Y (Ly) | 300 | cm |
| Selecione a combinação conforme tabela 3 | Normais | | Comprimento destravado em relação a torção (Lz) | 70,71 | cm |
| Tipo de furação | Furos simples | | Força Solicitante de cálculo (Nt,Sd) | 380 | kN |
| Forma de transmissão da força de tração | | | Somente por soldas longitudinais ou parafusos, Combinações de soldas | | |
| Excentricidade da ligação (ec) - 5.2.5 ABNT 8800:2024 | 1,8 | cm | Comprimento efetivo da ligação (lc) - 5.2.5 ABNT 8800:2024 | 16 | cm |
| Insira as variáveis para cálculo de estado-limite de colapso por rasgamento, se aplicável <small>De acordo com Item 6.5.5 da NBR 8800:2024</small> | Agv | 11,66 | cm ² | | |
| | Anv | 7,06 | cm ² | | |
| | Ant | 1,32 | cm ² | | |
| | Cts | 1 | | | |

Para comparação, os cálculos do professor resultaram em $C_t = 0,89$, $A_n = 6,66 \text{ cm}^2$, $N_{t,Rd} = 488,73 \text{ kN}$ para escoamento da seção bruta, $N_{t,Rd} = 395,16 \text{ kN}$ para escoamento da seção líquida e $N_{t,Rd} = 370,40 \text{ kN}$ para cisalhamento de bloco.

Ao avaliar pela planilha, calculam-se os valores de $C_t = 0,89$ (Figura 4.11), $A_n = 6,65 \text{ cm}^2$ (Figura 4.12), $N_{t,Rd} = 244,36 \text{ kN}$ para escoamento da seção bruta, $N_{t,Rd} = 196,77 \text{ kN}$ para escoamento da seção líquida e $N_{t,Rd} = 185,20 \text{ kN}$ para cisalhamento de bloco (Figura 4.13).

Esses valores são referentes a uma cantoneira. Multiplicando esse valor pelo número de cantoneiras, o resultado é de $N_{t,Rd} = 488,72 \text{ kN}$ para escoamento da seção bruta, $N_{t,Rd} = 393,54 \text{ kN}$ para escoamento da seção líquida e $N_{t,Rd} = 370,40 \text{ kN}$ para cisalhamento de bloco, condizentes com o resultado do problema resolvido .

Figura 4.11 – Resultado do problema proposto para tração em cantoneiras - C_t

| 1. Cálculo do coeficiente de redução da área líquida (C_t) conforme item 5.2.5 da NBR 8800:2024 | |
|---|---|
| O coeficiente de redução da área líquida, C_t , tem os seguintes valores: | |
| $C_t = 1$, quando a força de tração for transmitida diretamente para a seção transversal | |
| $C_t = \frac{A_c}{A_g}$ | Quando a força de tração for transmitida somente por soldas transversais |
| $C_t = 1 - \frac{e_c}{\ell_c}$ | Quando a força de tração for transmitida somente por parafusos ou somente por soldas longitudinais ou ainda por uma combinação de soldas longitudinais e transversais |
| C_t | 0,89 |

Figura 4.12 – Resultado do problema proposto para tração em cantoneiras - A_n

| 2. Cálculo da área líquida (A_n) conforme item 5.2.4 da NBR 8800:2024 | |
|---|----------------------|
| Em regiões com furos, a área líquida, A_n , de uma barra é calculada conforme a seguir: | |
| $A_n = A_g - (D_{furos,alma} \cdot n_{furos,alma} \cdot t_w) - (D_{furos,mesa} \cdot n_{furos,mesa} \cdot t_f)$ | Furos simples |
| $A_n = A_g - \left(D_{furos,alma} \cdot n_{furos,alma} \cdot t_w + \frac{s^2}{4g} \right) - \left(D_{furos,mesa} \cdot n_{furos,mesa} \cdot t_f + \frac{s^2}{4g} \right)$ | Furos zigue-zague |
| $A_n = A_g$ | Sem furos |
| Em que s, g são obtidos conforme Figura 3 da NBR 8800:2024; D, n são diâmetro dos furos e quantidade de furos, respectivamente, na mesa e na alma | |
| A_n | 6,65 cm ² |

Figura 4.13 – Resultado do problema proposto para tração em cantoneiras - $N_{t,Rd}$

| Cálculo da força axial de compressão resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) conforme item 5.3.2 da NBR 8800:2024 | | | |
|--|-----------------------------|--------|----|
| A força axial de tração resistente de cálculo $N_{t,Rd}$ é o menor dos valores obtidos a seguir: | | | |
| $N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}}$ | Escoamento da seção bruta | 244,36 | kN |
| $N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}}$ | Escoamento da seção líquida | 196,77 | kN |
| Verificação de colapso por rasgamento | | | |
| $F_{r,Rd} = \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60 f_u A_{nv} + C_{ts} f_u A_{nt})$ | Colapso por rasgamento | 185,20 | kN |
| $F_{r,Rd} = \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60 f_y A_{gv} + C_{ts} f_u A_{nt})$ | Colapso por rasgamento | 225,38 | kN |
| $N_{t,Rd}$ | | 185,20 | kN |

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma ferramenta didática e prática para o dimensionamento de perfis de aço I, U e cantoneiras submetidos a esforços de tração e compressão, à luz da norma ABNT NBR 8800:2024. Esse objetivo foi atingido com a elaboração de duas planilhas eletrônicas, uma para cada tipo de esforço, que permitem ao usuário dimensionar rapidamente e também acompanhar de forma detalhada as etapas de cálculo.

A metodologia empregada envolveu a criação e implementação de fluxogramas de cálculo que invertem a ordem apresentada pela norma, partindo das propriedades do material e valores conhecidos para chegar à força resistente, uma abordagem mais intuitiva e didática.

As planilhas foram alimentadas por catálogos de perfis comerciais compilados pela AISC, uma entidade referência no contexto de estruturas metálicas e construção civil, dando embasamento inicial aos resultados apresentados. A validação da ferramenta, descrita no capítulo de resultados, completou o embasamento às planilhas, demonstrando sua precisão ao comparar os resultados com exemplos de referências da literatura, obtendo erros percentuais mínimos na validação da correta implementação dos procedimentos da NBR 8800:2024.

Apesar da eficácia demonstrada para os casos propostos, a ferramenta possui limitações. O escopo deste trabalho, pelos motivos citados anteriormente, limita-se a esforços axiais de tração e compressão. O dimensionamento à flexão, ao cisalhamento e a esforços combinados é um ponto de melhoria para versões futuras da ferramenta, que, uma vez funcional, pode facilmente ter recursos adicionados ou ser replicada para atender outras demandas.

Também é satisfatório, futuramente, incluir funcionalidades de personalização por parte do usuário, como a inclusão de perfis manualmente, além de ser importante cogitar a possibilidade de migrar a ferramenta para uma aplicação web ou um aplicativo, a fim de torná-la mais acessível e independente de *softwares* proprietários.

Assim, conclui-se que a ferramenta atingiu os objetivos propostos ao oferecer uma solução prática e rápida para a dificuldade didática identificada na interpretação e aplicação da NBR 8800:2024. Esse trabalho entrega planilhas validadas e de uso simples que podem ser empregadas pelo aluno durante seus estudos e pelo professor durante as aulas, bem como o uso profissional para verificações e pré-dimensionamentos.

REFERÊNCIAS

AISC. **Steel Construction Manual 6.** ed. [S.l.]: AISC, 2011.

AISC. **Foundations of AISC.** c2025. Disponível em: <<https://www.aisc.org/legacy/foundations-of-aisc/>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800:2024 - Projeto de Estruturas de aço e de estruturas mistas aço concreto.** Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

BELLEI, I. H. **Edifícios Industriais em Aço: Projeto e Cálculo.** 7. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2024.

CHAVES, M. R. **Avaliação do desempenho de soluções estruturais para galpões industriais leves.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

CIMM. **Introdução - Crescimento e vantagens do uso do aço na Construção Civil.** s.d. <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6334#.VdTJSflVikp>. Accessed: 2025-9-4.

FAKURY, R. H. Sobre a revisão da norma brasileira de projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto, a NBR 8800. **REM: R. Esc. Minas**, p. 233–239, 2007.

FÁBRICA DO PROJETO. **Tabela de Cantoneira de Abas Iguais.** 2025. Disponível em: <<https://www.fabricadoprojeto.com.br/tabelas-de-laminados-trefilados-e-itens-comerciais/tabela-de-cantoneira-de-abas-iguais/>>. Acesso em: 07 set. 2025.

GERDAU. **Perfil U Gerdau.** 2025. Disponível em: <<https://gsn.gerdau.com/pt-br/produtos/perfil-u-gerdau>>. Acesso em: 07 set. 2025.

IMIANOWSKY, G. W.; WALENDOWSKY, M. A. Os principais aços carbono utilizados na construção civil. **CREA-SC**, jul. 2017.

MONFERRATO. **A História do Aço e suas Aplicações.** 2025. <<https://monferrato.com.br/a-historia-do-aco-e-suas-aplicacoes/>>. Accessed: 2025-9-4.

MORAIS, C. G. B.; ARAÚJO, P. H. Utilização de planilhas eletrônicas no ensino de resistência dos materiais. **Nuevas Ideas en Informática Educativa**, p. 613–616, 2013.

NAVARRO, R. F. A evolução dos materiais. parte 1: da pré-história ao início da era moderna. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, p. 1–11, fev. 2006.

OLIVEIRA FILHO, R. H. **Estruturas Metálicas: Dimensionamento de Elementos de Aço Submetidos a Esforços de Compressão.** Notas de aula da disciplina Estruturas Metálicas. Uberlândia: UFU, 2025.

OLIVEIRA FILHO, R. H. **Estruturas Metálicas: PROJETO DE UM GALPÃO - TRELIÇA DAS COLUNAS.** Notas de aula da disciplina Estruturas Metálicas. Uberlândia: UFU, 2025.

PEREIRA, S. C. N. **Dimensionamento otimizado de perfis metálicos reconstituídos sólidos**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2019.

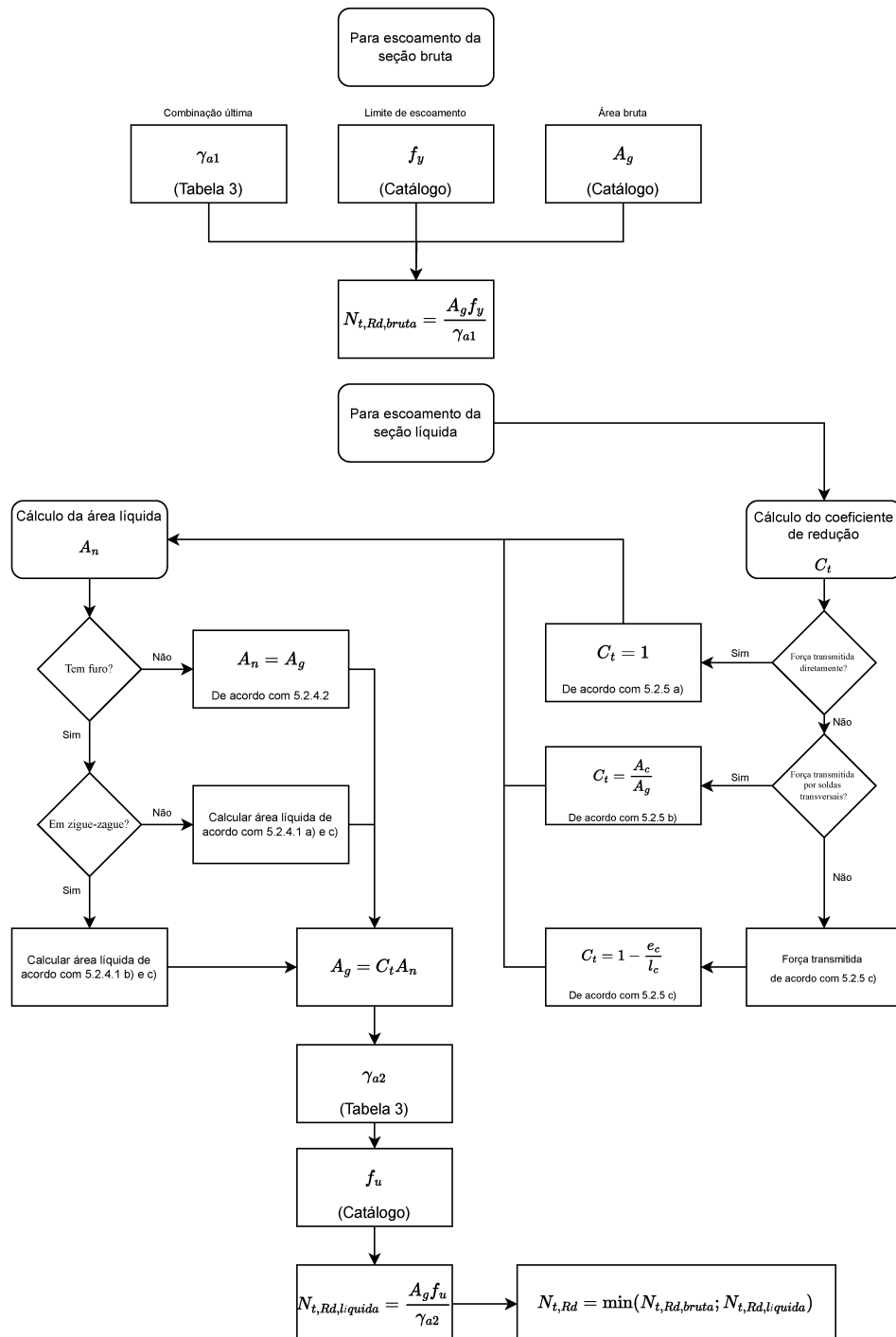
PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

UFMG. **Ementa da disciplina Estruturas de Aço**. s.d. Disponível em: <<https://www2.ufmg.br/engmecanica/content/download/25769/173633/file/Estruturas%20de%20A%C3%A7o.pdf>>.

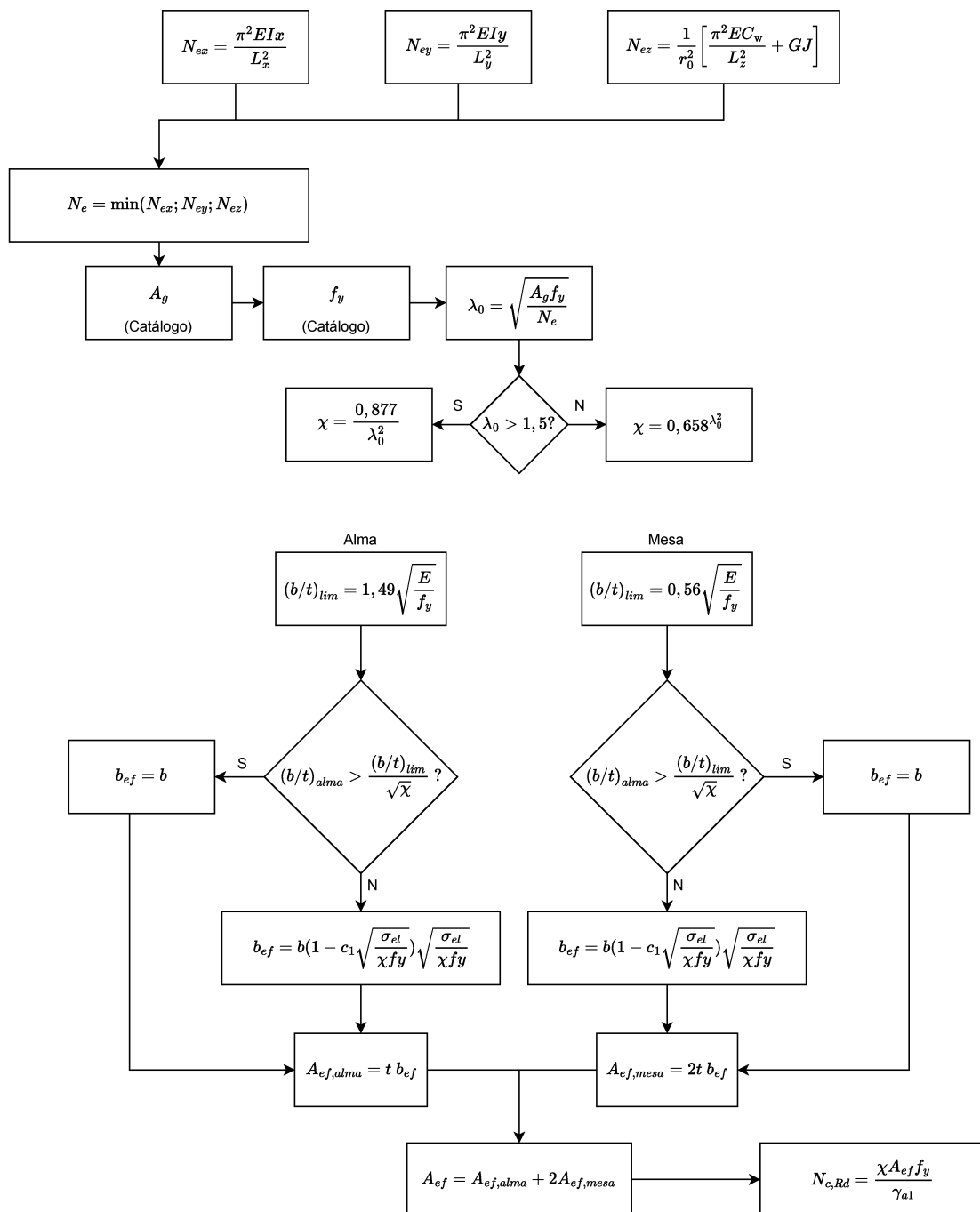
UFRJ. **CURSO DE ENGENHARIA CIVIL: Estruturas Metálicas I**. 2021. 1-3 p. Disponível em: <https://engenharias.maca.ufrj.br/images/Programas_das_Disciplinas/Programas_Eng_Civil/8.pdf>.

UFU. **Ementa da disciplina Estruturas Metálicas**. 2010. Disponível em: <https://www.femec.ufu.br/system/files/conteudo/femec41081_estruturas_metalicas.pdf>.

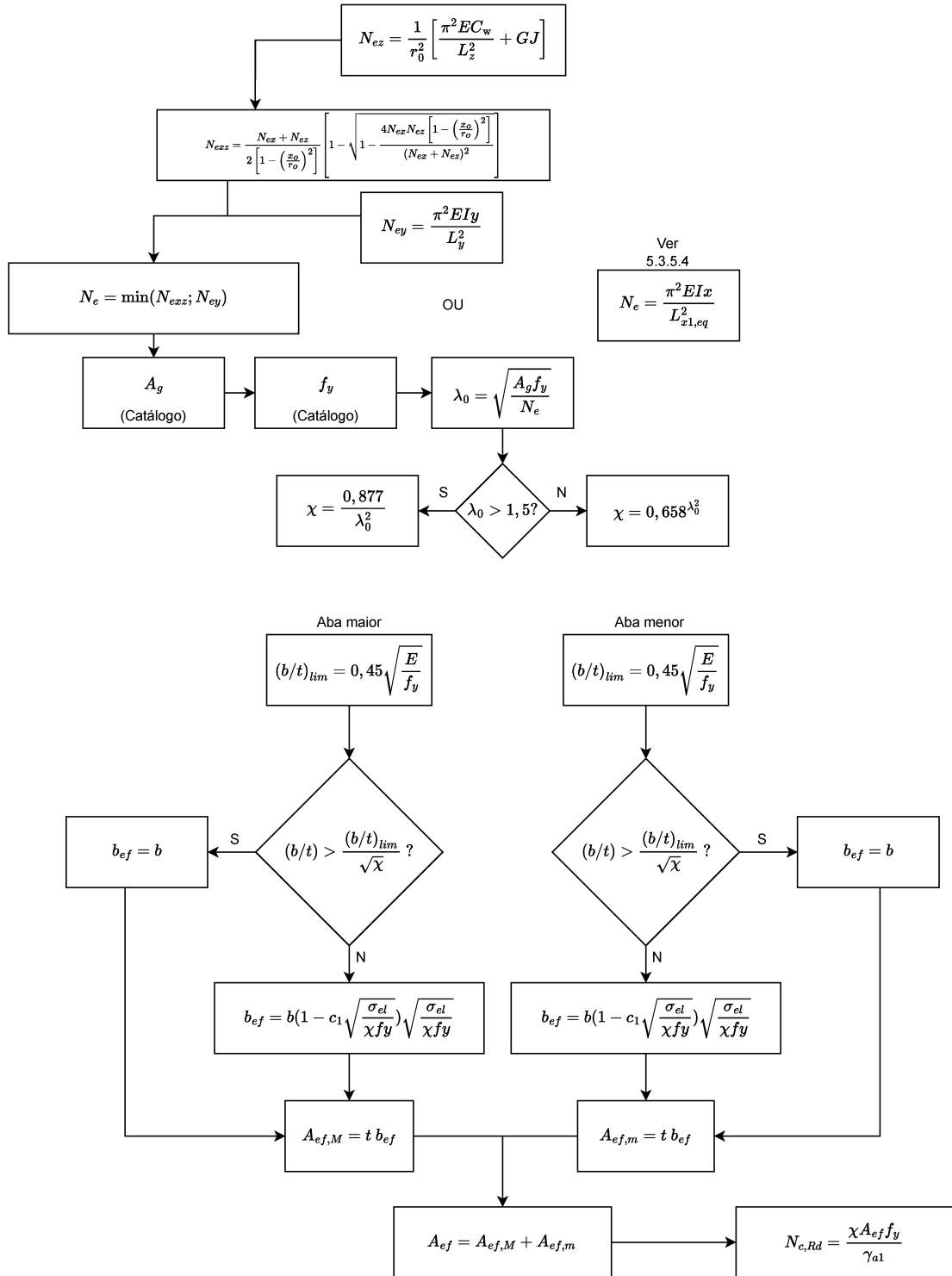
APÊNDICE A – FLUXOGRAMA PARA DIMENSIONAMENTO A TRAÇÃO



APÊNDICE B – FLUXOGRAMA PARA DIMENSIONAMENTO A COMPRESSÃO (PERFIS I)



APÊNDICE C – FLUXOGRAMA PARA DIMENSIONAMENTO A COMPRESSÃO (CANTONEIRAS)



APÊNDICE D – FLUXOGRAMA PARA DIMENSIONAMENTO A COMPRESSÃO (PERFIS U)

