

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**



**Eduardo Bezerra Robalinho Dantas da Gama**

**AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO DE LIGAÇÕES EM  
ESTRUTURAS DE AÇO COM APLICAÇÕES NA  
ENGENHARIA CIVIL**

Trabalho de Graduação  
2025

**Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica**

**Eduardo Bezerra Robalinho Dantas da Gama**

**AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO DE LIGAÇÕES EM  
ESTRUTURAS DE AÇO COM APLICAÇÕES NA  
ENGENHARIA CIVIL**

Orientador

Prof. Dr. Igor Charles Siqueira Leite (ITA)

**ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA**

**SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

**Divisão de Informação e Documentação**

Bezerra Robalinho Dantas da Gama, Eduardo  
AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO DE LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE AÇO COM  
APLICAÇÕES NA ENGENHARIA CIVIL / Eduardo Bezerra Robalinho Dantas da Gama.  
São José dos Campos, 2025.  
70f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica– Instituto Tecnológico de Aeronáutica,  
2025. Orientador: Prof. Dr. Igor Charlles Siqueira Leite.

1. Estruturas de aço. 2. Ligas metálicas. 3. Estruturas metálicas. 4. Automação; Python (linguagem de  
programação). 5. Engenharia civil. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

**REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

BEZERRA ROBALINHO DANTAS DA GAMA, Eduardo. **AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO DE LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE AÇO COM APLICAÇÕES NA ENGENHARIA CIVIL**. 2025. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

**CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Eduardo Bezerra Robalinho Dantas da Gama  
TÍTULO DO TRABALHO: AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO DE LIGAÇÕES EM  
ESTRUTURAS DE AÇO COM APLICAÇÕES NA ENGENHARIA CIVIL.  
TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2025

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

---

Eduardo Bezerra Robalinho Dantas da Gama  
Rua do H8B, Ap. 216  
12228-461 – São José dos Campos, SP

# **AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO DE LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE AÇO COM APLICAÇÕES NA ENGENHARIA CIVIL**

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

---

Eduardo Bezerra Robalinho Dantas da Gama

Autor

---

Igor Charles Siqueira Leite (ITA)

Orientador

São José dos Campos, 10 de Novembro de 2025.

*A todos aqueles que residiram comigo na  
Rua de Apipucos, n° 420.*

# Agradecimentos

Primeiramente, a quem mais devo agradecimentos é a Ti, meu Deus, criador do céu e da terra, Vós que sois a Santíssima trindade: O Pai, O Nosso Senhor Jesus Cristo e O Espírito Santo; "Até aqui o Senhor nos ajudou"(1 Samuel 7:12) e que a ti, meu Deus, seja útil este diploma de engenheiro que tanto me ajudaste a conseguir. A Sua Igreja, Católica Apostólica Romana, também devo um grande agradecimento, por todos os sacramentos, missas, enfim, todas as graças que me destes para chegar até o fim dessa graduação. A minha querida *Mainha do céu*, Nossa Senhora, também devo grandes agradecimentos e profunda devoção.

A minha querida e tão amada mãe, Aviani Maria Bezerra Robalinho, que, sem nenhuma sombra de dúvidas, foi a pessoa que mais me ajudou a chegar até aqui, falar de todo apoio, ligações, idas ao cursinho, é pouco para descrever o quanto me ajudaste, *Mainha*; ao meu querido pai, Amadeu Robalinho Dantas da Gama Filho (*In memoriam*), que a 11 anos já está nos braços do Pai, vocês dois são os maiores exemplos de Engenheiros Civis que eu poderia ter, me alegro por poder alcunhar este mesmo título. A minha querida Vó, Quitéria Venâncio, que na sua grande simplicidade e conhecimento de vida, é um exemplo de coração enorme e humilde.

Aos meus amigos mais próximos da minha cidade natal, Recife. Amizades que duram mais de 10 anos, aos quais me apoiaram nas conquistas e nas lutas, que fizeram ensino médio, cursinho e que até hoje, mantemos contato, mais do que amigos, mas como irmãos: João Campos, Mateus Filipe, Davi Mendes e Lucas Acioly.

Aos meus colegas de turma, veteranos e bixos, que compartilharam comigo essa experiência digna de cinematografia, que é o ITA. Especialmente aos que dividiram apartamento algum momento comigo: Guilherme Peres, Raphael Rosendo, Nathan Tavares, João Santos, Renan Almeida, Matheus Moreira e Victor Wakugawa. Aqueles que fizeram comigo os inúmeros trabalhos, palestras, apresentações na civil e viraram noites estudando e trabalhando (especialmente no longuíssimo projeto de concreto estrutural): Guilherme Ernando, Matheus Vilela, Diogo Longo, Hermiro Junior, Felipe Mello, Ana Carolina e Juliana Baptista.

Aos meus colegas da igreja, que participam comigo da nossa querida Obra: Pe. André, Gabriel Gobi, Diego Barreto, Enzo Said, Erick Tenório, Alcides Vilar, Vinícius Menezes, Vinícius Camelo, Andrei Albani, Marcelo Hippolyto, João Spíndola e Caio Régis.

Institucionalmente, agradeço a Força Aérea por ter me permitido trilhar a etapa profissional da minha faculdade, como Aspirante a Oficial, possibilitando valorosos estágios para meu desenvolvimento profissional. Especialmente a organização Militar CEPE, na pessoa do seu Chefe: Cel Frank, que agradeço a possibilidade que me forneceu de estagiar e trabalhar, meses no aplicativo apresentado nesse trabalho.

Academicamente agradeço ao meu orientador Capitão Igor, que primeiro me mostrou a ideia desse trabalho e me ajudou em diversas etapas de sua elaboração, tanto quanto estágio quanto trabalho de conclusão de curso, Aos professores de Engenharia Civil-Aeronáutica do ITA, devo profundo respeito e admiração, por através de infindáveis trabalhos, projetos, seminários e provas, me possibilitaram academicamente, trilhar o caminho para virar engenheiro Civil.

*“Quem faz bem feito,  
só faz uma vez.”*  
— AMADEU R. FILHO

# Resumo

O dimensionamento e o detalhamento de ligações em estruturas de aço constituem uma etapa crítica e dispendiosa do projeto executivo, cuja complexidade frequentemente exige o uso de softwares comerciais de alto custo. Esta dependência representa um desafio para escritórios de pequeno e médio porte e para organizações militares, como a Força Aérea Brasileira (FAB). Este trabalho apresenta o desenvolvimento da aplicação computacional STCAD (Structural Connections for CAD), que visa automatizar o cálculo e a geração de desenhos de ligações viga-pilar, em total conformidade com a norma brasileira ABNT NBR 8800. A ferramenta foi desenvolvida na linguagem Python, empregando a metodologia de programação orientada a objetos (POO) para modelar os componentes estruturais e utilizando bibliotecas para a construção da interface gráfica (GUI) e para a criação de arquivos de desenho nos formatos .dwg e .dxf. O software resultante possui uma interface intuitiva que permite ao usuário dimensionar seis diferentes tipologias de ligações rígidas e flexíveis, gerando como saída os parâmetros da ligação e uma sugestão de detalhamento. A validação dos resultados, realizada por meio de um exemplo da literatura técnica, demonstrou a precisão do motor de cálculo. O STCAD se consolida como uma solução funcional e economicamente acessível, contribuindo para a otimização de projetos de estruturas metálicas com aplicabilidade direta nas demandas da engenharia civil e da FAB.

# Abstract

The design and detailing of connections in steel structures constitute a critical and costly stage of the executive design phase, where complexity often demands the use of high-cost commercial software. This dependency poses a challenge for small to medium-sized engineering firms and military organizations, such as the Brazilian Air Force (FAB). This work presents the development of the STCAD (Structural Connections for CAD) computational application, which aims to automate the calculation and drawing generation of beam-column connections, in full compliance with the Brazilian standard ABNT NBR 8800. The tool was developed in the Python language, employing object-oriented programming (OOP) methodology to model the structural components and utilizing libraries for building the graphical user interface (GUI) and for creating drawing files in .dwg and .dxf formats. The resulting software features an intuitive interface that allows the user to design six different types of rigid and flexible connections, generating the connection parameters and a detailing suggestion as output. The validation of the results, performed through an example from the technical literature, demonstrated the accuracy of the calculation engine. STCAD establishes itself as a functional and economically accessible solution, contributing to the optimization of steel structure projects with direct applicability to the demands of civil engineering and the FAB.

# Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 2.1 – Edifício Avenida Central nos anos 1960. . . . .   | 20 |
| FIGURA 2.2 – Tipos de ligações conforme a capacidade de rotação frente ao momento fletor. . . . .                      | 24 |
| FIGURA 2.3 – Exemplo de ligações conforme a capacidade de rotação frente ao momento fletor. . . . .                    | 24 |
| FIGURA 3.1 – Ligações que o programa dimensiona segundo a rigidez . . . . .  | 28 |
| FIGURA 3.2 – Classe Aço: heranças e propriedades . . . . .   | 29 |
| FIGURA 3.3 – Classe Chapa: heranças e propriedades . . . . .   | 30 |
| FIGURA 3.4 – Classe Cantoneira: propriedades . . . . .   | 30 |
| FIGURA 3.5 – Classe Perfil: propriedades geométricas e método de cálculo de inércia . . . . .                          | 31 |
| FIGURA 3.6 – Seção retangular submetida a um momento fletor e a altura da linha neutra $y_{LN}$ . . . . .              | 35 |
| FIGURA 3.7 – Geometria para o efeito alavanca . . . . .  | 38 |
| FIGURA 3.8 – Nomenclatura para os tipos de área de influência a depender do contorno. . . . .                          | 39 |
| FIGURA 3.9 – Grafo mostrando o esquema de funcionamento do aplicativo para calcular a ligação chapa de cabeça. . . . . | 42 |
| FIGURA 3.10 – Dimensões de parafusos tipo bolt para parafusos ASTM. . . . .  | 43 |
| FIGURA 3.11 – Cotagem das dimensões do tipo de cantoneira utilizado. . . . .   | 43 |
| FIGURA 3.12 – Cotagem das dimensões do tipo de perfil I (W) utilizado. . . . .   | 44 |
| FIGURA 3.13 – Grafo explicativo sobre o processo de salvamento do desenho. . . . .                                     | 45 |
| FIGURA 3.14 – Fluxo de funcionamento da seção de escolha e gerenciamento de materiais. . . . .                         | 46 |
| FIGURA 4.1 – Tela de carregamento do aplicativo STCAD . . . . .  | 47 |
| FIGURA 4.2 – Tela principal do software STCAD . . . . .  | 48 |

---

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 4.3 – Tela de Ajuda do software STCAD . . . . .  | 49 |
| FIGURA 4.4 – Tela sobre o desenvolvimento e funcionamento do software STCAD . . .   | 49 |
| FIGURA 4.5 – Tela para a escolha das unidades utilizadas no software . . . . .  | 50 |
| FIGURA 4.6 – Tela para a configuração do software AutoCAD . . . . .   | 50 |
| FIGURA 4.7 – Tela de escolha de materiais . . . . .   | 51 |
| FIGURA 4.8 – Tela de Debug para desenvolvedores . . . . .   | 51 |
| FIGURA 4.9 – Tela para o dimensionamento de uma ligação Rígida via chapa de cabeça  | 52 |
| FIGURA 4.10 – Tela para o dimensionamento de uma ligação Rígida via chapa de cabeça<br>com o Menu de opções avançadas . . . . . | 52 |
| FIGURA 4.11 – Tela para o dimensionamento de uma ligação flexível por uma cantoneira<br>parafusada-soldada . . . . .            | 53 |
| FIGURA 4.12 – Tela com o resultado do dimensionamento . . . . .   | 54 |
| FIGURA 4.13 – Txt gerado com o dimensionamento com uma breve sugestão sobre lo-<br>cais de aplicação da solda. . . . .          | 54 |
| FIGURA 4.14 – Tela com o a marcha de todos os cálculos realizados para o dimensiona-<br>mento da ligação . . . . .              | 55 |
| FIGURA 4.15 – Tela que permite ao usuário escolher se deseja salvar em .dxf ou .dwg .   | 55 |
| FIGURA 4.16 – Tela com a possibilidade de salvar o desenho da ligação em formato .dxf   | 56 |
| FIGURA 4.17 – Tela do aplicativo AutoCAD mostrando o detalhamento sugerido, em<br>arquivo .dwg . . . . .                        | 56 |
| FIGURA 4.18 – Figura com a questão proposta como exemplo de cálculo de ligação rígida   | 57 |
| FIGURA 4.19 – Tela mostrando a adição do aço USI CIVIL 350 na base de dados do<br>STCAD . . . . .                               | 58 |
| FIGURA 4.20 – Entrada de dados no STCAD para dimensionamento do problema proposto   | 59 |
| FIGURA 4.21 – Dimensionamento com as considerações mínimas para que a ligação<br>agente a s solicitações descritas . . . . .    | 59 |
| FIGURA 4.22 – Sugestão de detalhamento feito com base nos resultados encontrados em<br>4.21. . . . .                            | 60 |

# Lista de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| TABELA 3.1 – Diâmetro padrão de furo para parafusos ou barras rosqueadas . . . . .                         | 32 |
| TABELA 3.2 – Distância mínima do centro de um furo-padrão à borda . . . . .                                | 32 |
| TABELA 3.3 – Tamanho mínimo da perna de uma solda de filete em função da espessura do metal-base . . . . . | 32 |
| TABELA 4.1 – Parâmetros físico-mecânicos para dimensionamento de ligação rígida testada no MWE. . . . .    | 54 |
| TABELA 4.2 – Parâmetros comuns atualizados conforme a descrição do problema. . . . .                       | 58 |
| TABELA A.1 – Dimensões de perfis W. . . . .  | 66 |
| TABELA A.1 – Dimensões de perfis W. . . . .  | 67 |
| TABELA A.2 – Propriedades Físico-mecânicas da base de Materiais do aplicativo . . . . .                    | 67 |
| TABELA A.3 – Diâmetros comerciais de parafusos estruturais do tipo Bolt . . . . .                          | 67 |
| TABELA A.4 – Dimensões padronizadas de cantoneiras Gerdau . . . . .  | 68 |
| TABELA A.5 – Razão $a/b$ e $\eta$ para os diferentes tipos de vinculação . . . . .                         | 69 |

# Lista de Abreviaturas e Siglas

|        |  |
|--------|--|
| COMGAP | Comando Geral de Apoio                     |
| STCAD  | Structural Connections for CAD             |
| ABNT   | Associação Brasileira de Normas Técnicas   |
| ASTM   | American Society of Testing Materials      |
| CEPE   | Centro de Estudos e Projetos de Engenharia |
| CSN    | Compainha Siderúgica Nacional              |
| ETP    | Estudo Técnico Preliminar                  |
| FAB    | Força Aérea Brasileira                     |
| FEM    | Fábrica de Estruturas Metálicas            |
| GUI    | Graphical User Interface                   |
| MWE    | Minimal Working Example                    |
| NBR    | Norma Brasileira de Regulamentação         |
| POO    | Programação Orientada a Objetos            |

# Lista de Símbolos

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| $M$                                | Momento fletor solicitante de cálculo (Usado em $kN \cdot mm$ ) |
| $V$                                | Esforço cortante solicitante de cálculo (Usado em $kN$ )        |
| $T$                                | Esforço normal solicitante de cálculo (Usado em $kN$ )          |
| $N$                                | Número de Parafusos na ligação                                  |
| $f_u$                              | resistência de ruptura do parafuso                              |
| $f_{uw}$                           | resistência de ruptura da solda                                 |
| $d_p$                              | diâmetro do parafuso  |
| $A_g = 0,25 \cdot \pi \cdot d_b^2$ | área bruta da seção transversal do parafuso                     |
| $\gamma_{a1} = 1,1$                | coeficiente de ponderação de resistência última                 |
| $\gamma_{a2} = 1,35$               | coeficiente de ponderação de resistência a escoamento           |
| $n$                                | número de planos de corte existentes no parafuso                |
| $g$                                | distância vertical entre dois furos consecutivos                |
| $d_{f,p}$                          | diâmetro do furo padrão   |

# Sumário

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | INTRODUÇÃO . . . . .  | 17 |
| 1.1   | Contexto e Problemática chave . . . . .                           | 17 |
| 1.2   | Objetivos de estudo . . . . .                                     | 18 |
| 1.3   | Estrutura do texto . . . . .                                      | 18 |
| 2     | REVISÃO DE LITERATURA . . . . .                                   | 19 |
| 2.1   | As Estruturas em aço . . . . .                                    | 19 |
| 2.1.1 | A construção em aço na sociedade humana . . . . .                 | 19 |
| 2.1.2 | A construção em aço no Brasil . . . . .                           | 20 |
| 2.2   | O projeto estrutural . . . . .                                    | 21 |
| 2.2.1 | O caderno de necessidades e o estudo técnico preliminar . . . . . | 21 |
| 2.2.2 | O Anteprojeto . . . . .   | 21 |
| 2.2.3 | O projeto básico . . . . .  | 22 |
| 2.2.4 | O projeto executivo . . . . .                                     | 22 |
| 2.3   | As ligações metálicas . . . . .                                   | 22 |
| 2.3.1 | Os esforços nas ligações . . . . .                                | 23 |
| 2.3.2 | A classificação das ligações . . . . .                            | 23 |
| 2.4   | A programação na engenharia de estruturas . . . . .               | 24 |
| 2.4.1 | O <i>Python</i> . . . . .   | 25 |
| 2.4.2 | As bibliotecas do <i>Python</i> . . . . .                         | 25 |
| 3     | METODOLOGIA . . . . .   | 28 |
| 3.1   | Estruturação do programa: <i>back-end</i> . . . . .               | 29 |
| 3.1.1 | Classes e objetos . . . . .                                       | 29 |

---

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 3.1.2      | Critérios de equacionamento . . . . .                 | 31        |
| 3.1.3      | Procedimento de cálculo . . . . .                     | 41        |
| 3.1.4      | Procedimento de desenho . . . . .                     | 42        |
| <b>3.2</b> | <b>Estruturação do programa: <i>GUI</i></b> . . . . . | <b>44</b> |
| 3.2.1      | Uso do <i>Autocad</i> . . . . .                       | 44        |
| 3.2.2      | Escolha dos materiais . . . . .                       | 45        |
| 3.2.3      | Escolha das unidades . . . . .                        | 46        |
| <b>4</b>   | <b>APLICATIVO: STCAD</b> . . . . .                    | <b>47</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Tela principal</b> . . . . .                       | <b>47</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Menu e configurações</b> . . . . .                 | <b>48</b> |
| 4.2.1      | Menu . . . . .  | 48        |
| 4.2.2      | Configurações . . . . .                               | 49        |
| <b>4.3</b> | <b>Dimensionamento e detalhamento</b> . . . . .       | <b>51</b> |
| 4.3.1      | Ligação Rígida . . . . .                              | 51        |
| 4.3.2      | Ligação Flexível . . . . .                            | 53        |
| 4.3.3      | Resultados do Dimensionamento . . . . .               | 53        |
| <b>4.4</b> | <b>Exemplo resolvido</b> . . . . .                    | <b>56</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> . . . . .                 | <b>61</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Sugestões para Trabalhos Futuros</b> . . . . .     | <b>62</b> |
|            | REFERÊNCIAS . . . . .                                 | 64        |
|            | ANEXO A – TABELAS INFORMATIVAS . . . . .              | 66        |
|            | GLOSSÁRIO . . . . .                                   | 70        |

# 1 Introdução

## 1.1 Contexto e Problemática chave

As estruturas metálicas, cada mais vem desempenhando um papel importante na construção e vida dos brasileiros, devido a sua fácil adaptabilidade as diversas situações, fácil montagem e etapas padronizadas de construção, o conceito de *Steel Building* é algo pujante no mercado, no qual inclui também as organizações públicas que trabalham para a defesa nacional. Nesse contexto, a FAB com a missão de "Manter a soberania do espaço Aéreo e integrar o território Nacional, com vistas à defesa da pátria" conforme Comando da Aeronáutica (2018), procura através de suas organizações trabalhar para que tais métodos construtivos possam ser utilizados quando necessário.

Assim, a organização militar CEPE, pertencente ao COMGAP, um dos grandes comandos da aeronáutica, ao qual projeta as grandes obras de infraestrutura da FAB, calcula, dimensiona e detalha diversas instalações metálicas. O intuito desse trabalho é caracterizar o desenvolvimento e o funcionamento de um aplicativo computacional destinado a apoiar engenheiros e projetistas no cálculo e dimensionamento de ligações metálicas do tipo viga-pilar em estruturas de aço, atendendo aos critérios normativos brasileiros. Visando a disponibilidade ao projetista utilizar sem necessidade de softwares terceirizados para os desenhos assistidos pelo computador, o aplicativo integra métodos de cálculo e geração de arquivos CAD (.dwg e .dxf) para detalhamento das ligações, proporcionando maior agilidade nos projetos de estruturas metálicas.

Nessa perspectiva, há as soluções similares disponíveis no mercado destacam-se o SDS2, voltado ao detalhamento e fabricação de estruturas de aço com modelagem 3D integrada; o Tekla Structures, plataforma BIM especializada em modelagem e detalhamento de estruturas metálicas; o IDEA StatiCa, software dedicado ao cálculo e verificação de ligações metálicas e elementos estruturais complexos e o MCalc Lig, aplicativo que pode ser encarado como uma calculadora de ligações onde escolhe-se o tipo de ligação e as solicitações de cálculo e o programa verifica todos os itens dessa ligação gerando a memória de cálculo. Entretanto, diferentemente desses softwares de amplo uso comercial que apresentam alto custo de aquisição e manutenção o aplicativo a ser descrito e proposto além de atender às normas nacionais, representa uma alternativa economicamente mais acessível a escritórios de pequeno e médio porte,

além das organizações militares da FAB para ao qual foi feito.

## 1.2 Objetivos de estudo

Os objetos de estudo desse texto, consistem em detalhar o desenvolvimento do aplicativo, quais procedimentos de cálculo foram utilizados para desenvolvê-lo e as ferramentas utilizadas para detalhar as ligações, assim como foi feito o desenvolvimento da GUI, para por fim mostrar os resultados e uma breve explicação sobre o funcionamento do aplicativo.

- Apresentar o referencial teórico utilizado para desenvolvimento do aplicativo;
- Desenvolver a técnica de cálculo utilizada como "motor de cálculo" do aplicativo;
- Relatar as etapas de cálculo a partir dos dados considerados e obtidos do cálculo;
- Desenvolvimento e criação de uma sugestão de detalhamento para a ligação metálica.

## 1.3 Estrutura do texto

Os capítulos desse estudo foram divididos nos seguintes tópicos:

- **Capítulo 1: Introdução**

Descrição de onde o problema se enquadra numa perspectiva de estruturas em aço, no âmbito da força área brasileira, elencando quais os intuídos do aplicativo descrito no texto.

- **Capítulo 2: Revisão de Literatura**

Revisão de conteúdos relacionados ao desenvolvimento do tema do trabalho, citando as principais fontes, breve desenvolvimento histórico das estruturas metálicas e eventuais considerações técnicas e científicas para justificar o escopo do trabalho.

- **Capítulo 3: Metodologia**

Descrição detalhada dos procedimentos matemáticos e computacionais, para o desenvolvimento do aplicativo.

- **Capítulo 4: Aplicativo STCAD**

Texto injuntivo apresentando passo a passo de como funciona o aplicativo, eventuais dúvidas e exemplo de funcionamento.

- **Capítulo 5: Considerações Finais**

Considerações sobre eventuais aprimoramentos que podem ser feitos no aplicativo, linhas de pesquisa e futuros estudos.

## 2 Revisão de Literatura

Este capítulo apresenta uma revisão de literatura sequencial e estruturada sobre um breve histórico das estruturas de aço, as etapas realização de um projeto estrutural, noções gerais sobre o funcionamento e categorização de ligações metálicas e as ferramentas de programação computacional utilizadas para o desenvolvimento do *software* proposto.

### 2.1 As Estruturas em aço

#### 2.1.1 A construção em aço na sociedade humana

Segundo Figueiredo (2010) a palavra estrutura pode ser definida como a disposição especial das partes de um todo, considerando suas relações recíprocas; especificamente no âmbito das ciências da natureza, é comum a consideração de que uma estrutura possui a qualidade de suportar, a medida da disposição de suas partes, peso. Nesse contexto, ao longo da história evolutiva da humanidade, diversos materiais direta ou indiretamente encontrados na natureza foram utilizados, com diversas finalidades, para a montagem de estruturas. Entretanto, todos necessitaram uma certa técnica de manuseio, a exemplo, Santos (1977) cita que até a primitiva madeira precisa ser arrancada da árvore e trabalhada a fim de que se transforme em algo de forma utilizável. Ainda na perspectiva de materiais da natureza, alguns minérios encontrados abundantemente na crosta terrestre, como a Hematita  $Fe_2O_3$  e a Magnetita  $Fe_3O_4$ , possibilitaram a obtenção do Ferro, produto o qual, além de nomear uma das idades da arqueologia humana, foi um dos grandes responsáveis pelo surgimento das primeiras grandes civilizações humanas.

Durante muitos séculos, a ciência de se trabalhar com o ferro, a metalurgia, foi realizada artesanalmente. Tendo inicialmente uma maior utilização na produção de ferramentas e armamentos, como machados, arados e ferraduras; só a partir do século XVIII, que a produção, primeiramente do ferro fundido, alcançou um fator de escala relevante, porém estruturalmente o material ainda se mostrava com pouca dureza e elasticidade. Nessa perspectiva, a partir dos estudos da composição de diversos materiais que utilizaram ferro, que o cientista francês René-Antoine Réaumur (1683-1757), concluiu que o aço era ferro que tinha como componente uma quantidade pequena, porém significativa de oxigênio, verificando que o mesmo podia ser ob-

tido, fundindo ferro fundido e ferro forjado, esse resultado mostrou-se de suma importância, por possibilitar a obtenção de um derivado do ferro que compensasse as fraquezas estruturais do ferro fundido.

Conforme Santos (1977), os resultados de Réaumur, apesar de serem publicados, só tiveram um significativo impacto na indústria de produção de aço, quase um século depois. Porém, abriu as portas para que a partir da metade do século XIX, fosse iniciado a era dos grandes edifícios metálicos explica Bellei (2008). O palácio de cristal, construído em 1851, na cidade de Londres e o primeiro edifício de múltiplos andares em aço, a fábrica de chocolates Noisel-Sur-Name, construída em 1872 perto de Paris, anteciparam alguns dos elementos estruturais das modernas construções com aço.

### 2.1.2 A construção em aço no Brasil

Com uma indústria metalúrgica praticamente inexistente até o início do século XX, o Brasil, sofreu grandes mudanças com a primeira guerra mundial (1914-1918) devido a dificuldade de importar ferro bruto. A partir da década de 20 com a criação da Companhia Siderúrgica Belgo Mineira iniciou-se um desenvolvimento, ainda incipiente da indústria siderúrgica nacional. Aproximadamente vinte anos mais tarde, com o projeto de nacional desenvolvimentismo do governo brasileiro foi criada a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). Segundo Bellei (2008), foi a CSN que objetivando a difundir o uso de aço na construção no Brasil, que um dos seus departamentos a Fábrica de Estruturas Metálicas (FEM), iniciou a formação de mão-de-obra capacitada possibilitando que fossem criados a exemplo, o Edifício Garagem América, construído na cidade de São Paulo, em 1957, e o Edifício Avenida Central, construído na cidade do Rio de Janeiro, em 1961, que possuindo 34 andares, na época era considerado um dos maiores edifícios do Brasil, uma do edifício, quando recém construído, pode ser vista na Figura 2.1.

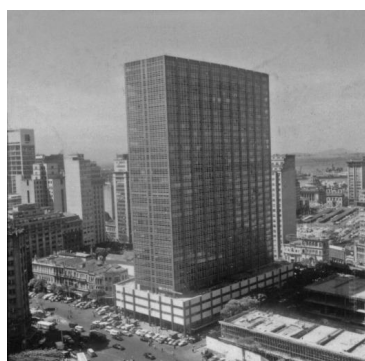


FIGURA 2.1 – Edifício Avenida Central nos anos 1960.

Fonte: Diário do Rio apud Memórias (2022)

Nesse processo, o aço estrutural teve um impacto fundamental na verticalização que ocorreu nos últimos 60 anos no Brasil. As vantagens da utilização do mesmo em projetos estruturais são:

o menor prazo de execução da obra, a possibilidade de reaproveitamento de material, possuir uma produção controlada e a possibilidade de modularização para não haver produção *in loco*, etc. As vantagens também refletem, conforme Bellei (2008), nos preços das fundações pela estrutura ter um peso final menor em relação a similares de concreto, porém financeiramente, devido ao maior valor agregado do aço, a edificação metálica requisitará recursos financeiros a depender da finalidade do edifício.

## **2.2 O projeto estrutural**

No geral, cada projeto de estrutura metálica, tem suas particularidades que se traduzem em problemas bastantes específicos para o seu completo desenvolvimento, porém a fim de se criar um encadeamento lógico de cada etapa e quais aspectos do projeto à construção são abordados naquele momento, existe o costume de se dividir o projeto estrutural nas seguintes etapas: caderno de necessidades, estudo técnico preliminar, anteprojeto, projeto básico e projeto executivo. O objetivo é que através dessas etapas, ocorra uma conceituação e modelagem do que o cliente requisita até em como cada detalhe da estrutura será realizado.

### **2.2.1 O caderno de necessidades e o estudo técnico preliminar**

As primeiras duas etapas do projeto, no geral, dizem a respeito do que está sendo requisitado. O caderno de necessidades é a expressão de forma leiga do que se deseja que haja em alguma construção, a exemplo de um edifício poderia-se dizer, o número de andares, quantidade de apartamentos, quartos, sanitários, entre todas as qualidades que o cliente almeja que haja em sua edificação. Nesse contexto, o estudo técnico preliminar (ETP), consiste em verificar a viabilidade técnica e econômica do projeto, sugerindo quais opções para o desenvolvimento do projeto são possíveis de serem realizadas. Ao se tratar de órgãos públicos, o ETP possui significância legal, aos termos da lei nº 14.133/2021 Brasil (2021), que regulamenta as contratações públicas e estabelece regras para elaboração do ETP.

### **2.2.2 O Anteprojeto**

A etapa intermediária, o anteprojeto, é dentre as possibilidades sugeridas no estudo técnico preliminar, a elaboração da disposição física dos equipamentos e itens que haverão na edificação assim como dos materiais que serão utilizados, Santos (1977) cita que essa etapa é feita por profissionais com reconhecida experiência no tipo de obra a se fazer a fim de que possa começar a escrever um memorial descrevendo o que será necessário para a construção (o memorial descritivo).

### 2.2.3 O projeto básico

O Projeto básico, consiste em obter as dimensões dos elementos físicos que se fazem necessários, para a segurança e o funcionamento da edificação. No geral, o projeto básico possui respaldo normativo pela associação brasileira de normas técnicas (ABNT) no qual através das normas brasileiras de regulamentação (NBR) sugerem métodos de cálculo comprovados para diversas situações em que a estrutura deve ser calculada. Para estruturas metálicas no Brasil são amplamente utilizadas as normas NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2025) e NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2024), em alguns casos a norma europeia Eurocode 3 (ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, 2007) também pode ser aplicada. Costuma-se no final do projeto básico, elaborar um memorial de cálculo, narrando quais hipóteses e considerações foram tomadas para calcular as dimensões da estrutura.

### 2.2.4 O projeto executivo

A última etapa do projeto estrutural consiste no projeto executivo. Nessa etapa, ocorre o detalhamento de como cada parte da estrutura é montada, processo de ligação entre elas e detalha procedimentos que devem ser empregados para a manutenção da estrutura. Nesse contexto, ocorre o desenho de diversas pranchas que venham a ser utilizadas na execução estrutural, geralmente é a etapa mais demorada do projeto, devido ao grau de detalhamento que deve ser passado para quem está executando a obra. Segundo Bellei (2008), o custo da etapa de projeto executivo está longe de ser o mais caro numa construção em aço, porém é quase o dobro do preço do projeto básico.

## 2.3 As ligações metálicas

Conforme discutido em 2.1, uma estrutura para ser produzida, deve surgir da disposição funcional das suas partes para carregar peso, assim é necessário que haja uma forma de conectar as partes da estrutura. A priori, a suposição de uma estrutura metálica monolítica é inviável, Santos (1977) comenta a inviabilidade a partir da resistência dos materiais, pois como a resistência dos elementos estruturais diminui a medida em que se aumenta o tamanho dos componentes, a construção de uma estrutura metálica rígida totalmente monolítica, não só seria de extrema dificuldade para ser produzida, mas também teria associada a si uma resistência baixíssima.

Nesse contexto, é necessário que exista uma conexão entre os vários membros de uma estrutura para que ocorra o equilíbrio de cargas entre as peças, direcionando corretamente as cargas para as fundações da estrutura. Na hipótese de que as partes as serem conectadas já estão bem dimensionadas para as cargas as quais estão sendo submetidas, é simples a consideração de que

os ligantes, precisam no mínimo ter uma resistência a ruptura maior do que as partes conectadas. No geral, as conexões são feitas de materiais com maior valor agregado e calculadas no projeto executivo, quando as partes ligadas já estão plenamente dimensionadas.

A respeito do processo de dimensionar essas conexões, Bowles (1980) indica que é necessário que a conexão produza uma ligação segura, econômica (a fim de que poder reproduzi-la em escala) e de fácil construção. Assim, historicamente, três tipos de ligações já foram utilizadas nas estruturas metálicas: as ligações parafusadas, as ligações rebitadas e as ligações soldadas. Nos dias atuais as ligações rebitadas são raramente utilizadas, Santos (1977) cita diversos motivos, dentre eles o desenvolvimento de técnicas de soldagem e a criação dos parafusos de alta resistência.

### 2.3.1 Os esforços nas ligações

Para transmitir os esforços as quais estão sendo solicitadas, as ligações devem obedecer a segunda Lei de Newton para movimento de translação (e a depender da classificação da ligação, ao movimento de rotação) das partes conectadas. Na hipótese de que o problema é estático, não haverá aceleração resultante advinda dos esforços sobre a qual a ligação está submetida, logo todos os esforços devem se anular. Em termos de mecânica das estruturas, todas os esforços solicitantes na ligação devem se equilibrar com os esforços resistentes.

$$\sum_{resultantes} \vec{F} = m \cdot \vec{a} = \vec{0} \longrightarrow \sum \vec{F}_{res} = \sum \vec{F}_{sol} \quad (2.1)$$

No geral, os esforços fisicamente terão unidade de grandeza de força (kgf ou kN) quando forem de translação ou unidade de grandeza de momento (kgf.m ou kN.m) quando forem de rotação. Entretanto, conforme a característica que eles imprimem no material, os esforços podem ter a natureza de: cisalhamento, caso criem no material a tendência de cortá-lo; tração, caso crie a tendência de tracioná-lo ou comprimi-lo e flexão, caso crie a tendência de fleti-lo. Esforços que criem tendências adversas a essas no material, como torção, não serão considerados, nesse trabalho, como esforços nas ligações.

### 2.3.2 A classificação das ligações

As ligações metálicas podem ser classificadas quanto ao processo de instalação e quanto a funcionalidade estrutural. A respeito do processo de instalação, para as ligações soldadas existem variações quanto ao tipo (fabricação) da solda e a resistência da solda, entretanto para as parafusadas, a conexão pode variar a respeito da resistência dos parafusos e se os mesmos serão pré tensionados. As ligações parafusadas pré tensionadas, conforme comenta Santos (1977), possibilita o conhecimento do atrito que haverá entre as partes conectadas a partir da tensão que

é colocada via um aperto controlado da porca do parafuso, sendo esse atrito responsável por sustentar a carga que tende a cisalhar o parafuso. Já a ligação parafusada do tipo apoio, a carga de cisalhamento é sustentada pela resistência do corpo do parafuso.

As ligações também podem ser classificadas conforme os esforços que transmitem. Segundo Bowles (1980), as ligações rígidas são aquelas que possuem a capacidade de transmitir entre as partes o momento fletor solicitado, além dos esforços de cisalhamento e de tração, por causa disso essa ligação mantém o ângulo entre as partes conectas constante (ou seja caso haja rotação, aquela parte do corpo rotacionará como corpo rígido), as ligações flexíveis são aquelas que não há transmissão (com ordem de grandeza relevante) de momento, logo há uma mudança de ângulo considerável entre as partes da ligação, por fim existem as ligações semirrígidas que são aquelas que transmite uma parcela do momento solicitado, as Figuras 2.2 e 2.3 tipificam e exemplificam, respectivamente, o comportamento das ligações frente ao momento fletor.

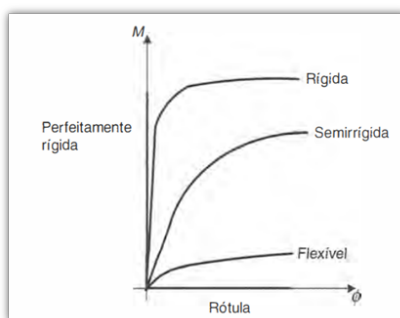


FIGURA 2.2 – Tipos de ligações conforme a capacidade de rotação frente ao momento fletor.

Fonte: (PFEIL; PFEIL, 2021)

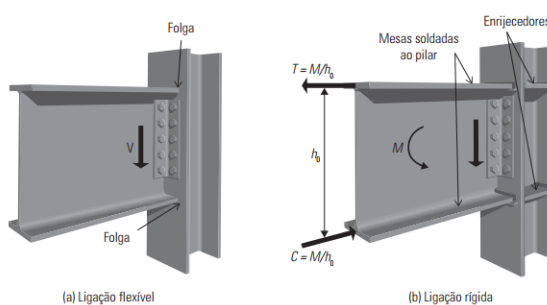


FIGURA 2.3 – Exemplo de ligações conforme a capacidade de rotação frente ao momento fletor.

Fonte: (FAKURY; SILVA; CALDAS, 2016)

## 2.4 A programação na engenharia de estruturas

Historicamente, o método mais conhecido de se realizar os cálculos para dimensionamento de estruturas no *lato sensu* da engenharia civil é através de marchas de cálculo, tabelas e ábacos.

A exemplo, a conhecida obra ROCHA (1972) do Professor Doutor Aderson Moreira da Rocha (1911-1996) é culturalmente uma das grandes referências para dimensionamento de estruturas de concreto armado conforme citado em (NOBRE, 2012). Entretanto, esses métodos, apesar de serem consagrados pelo tempo, são arcaicos frente a capacidade de processamento de dados dos meios computacionais do século XXI. Nesse contexto, a possibilidade da solução exata do tipo de problema estrutural a ser desenvolvido e adaptabilidade do mesmo para outras situações indicam claramente a utilidade de linguagens de programação na engenharia.

### 2.4.1 O Python

O Python é uma linguagem de programação criada em 1991 pelo programador holandês Guido van Rossum. Inicialmente foi criada a partir de metodologias de programação da linguagem ABC, com o decorrer dos anos se tornou uma das linguagens de programação mais populares conforme indica a pesquisa popular (PYPL, 2025). Uma das principais vantagens do Python consiste no fácil aprendizado e decorrente uso, pois trata-se uma linguagem de programação interpretada, que possibilita o uso de programação orientada a objetos e de alto nível. Nesse contexto, a existência de diversas bibliotecas, um ecossistema ativo de usuários e a flexibilidade quanto ao uso permite o seu uso nas diversas áreas das ciências inclusive para o cálculo de ligações em estruturas metálicas.

### 2.4.2 As bibliotecas do Python

Dentro das bibliotecas do Python possíveis de serem utilizadas para fazer um aplicativo de ligações metálicas, as que são mais convenientes devem possuir as características de serem bem desenvolvidas, bastante utilizadas (pois existe uma base muito maior de pesquisa em fóruns da internet) e que sejam possíveis de serem compiladas em um arquivo de executável para o sistema Windows. Nesse contexto, destacam-se as seguintes bibliotecas:

#### 2.4.2.1 NumPy

A biblioteca NumPy é fundamental para aplicações de computação científica em Python. Ela oferece suporte a vetores multidimensionais e uma ampla gama de funções matemáticas otimizadas, tornando-se uma ferramenta central no âmbito dos cálculos de quaisquer grau de sofisticação como análise numérica e processamento de sinais. A documentação NUMPY DEVELOPERS (2024) abrange como utilizar cada função da biblioteca, no geral, apesar dos cálculos relativos a dimensionamento de ligações metálicas não serem muito complexos, a utilização da NumPy permite uma boa segmentação do código quanto ao seu funcionamento.

### 2.4.2.2 Pandas

A biblioteca *Pandas* foi criada em 2008 com o objetivo de fornecer estruturas de dados de alto desempenho e fáceis de usar para a linguagem *Python*. Seu nome é uma abreviação de “Python Data Analysis Library” e possui uma extensa documentação em (PANDAS DEVELOPMENT TEAM, 2024). Atualmente, é mantida por uma comunidade ativa e utilizada em aplicações de ciência de dados, finanças, engenharia, entre outras áreas. A estrutura principal da biblioteca é o *DataFrame*, que permite trabalhar com tabelas de dados de forma eficiente. Nesse contexto, a biblioteca *Pandas* é uma ferramenta por excelência para realizar cálculos relativos a geometria das estruturas, visto que possibilita a obtenção via geometria analítica de quaisquer valores de propriedades geométricas das ligações.

### 2.4.2.3 PyAutoCAD

A biblioteca *pyautocad* permite a automação de tarefas no aplicativo AutoCAD utilizando códigos em *Python*. Por meio da interface COM (Component Object Model), o *Python* consegue se comunicar diretamente com instâncias ativas do AutoCAD, possibilitando a criação e modificação de entidades gráficas de forma automatizada, o repositório RECLOSEDEV (2024), discorre sobre as funcionalidades que a biblioteca fornece. Nesse contexto, é uma biblioteca que permite a partir dos dados já salvos em dataframes do *Pandas*, desenhar em 2D ou 3D a ligação ou as partes principais da ligação metálica que foi dimensionada, por fazer a conexão da linguagem de programação com um software privado o AutoCAD, o completo uso da biblioteca necessita eventuais licenças para o aplicativo de desenho.

### 2.4.2.4 Ezdxf

A biblioteca *ezdxf* oferece uma alternativa *open-source* para criação e manipulação de arquivos DXF (*Drawing Exchange Format*), formato nativo utilizado pelo AutoCAD. Diferente de soluções que dependem de interfaces COM, esta biblioteca opera diretamente nos arquivos de desenho através de programação *Python*, gerando documentos vetoriais 2D/3D sem necessidade de licença do AutoCAD. Conforme documentação oficial (MOZMAN, 2023), suas funcionalidades incluem: criação de entidades geométricas, manipulação de *layers*, leitura/edição de metadados e exportação para formatos como PDF e SVG.

### 2.4.2.5 PySide6

O *PySide6* é o conjunto de *bindings* oficiais da biblioteca Qt 6 para *Python*, mantido pela *The Qt Company*. Ele permite o desenvolvimento de interfaces gráficas modernas, multiplataforma e de alto desempenho diretamente em *Python*, com acesso a recursos avançados de design e

---

interatividade. A interface gráfica do usuário (*GUI*) pode ser desenvolvida totalmente a partir da documentação oficial da biblioteca THE QT COMPANY (2024), porém foi utilizado auxílio de inteligência artificial para construí-la visto o melhor aproveitamento do *back-end* do código para uma interface de fácil utilização para o usuário.

### 3 Metodologia

Este capítulo expõe de maneira sistemática o procedimento computacional utilizado para desenvolvimento do *software* STCAD. Primeiramente discorre-se sobre a utilização da biblioteca Pandas e metodologia de programação orientada a objetos para a estruturação das coordenadas geométricas das ligações, depois sobre os critérios de dimensionamento utilizados pela norma ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025) e pelo manual de ligações da Gerdau S.A Filho, Silva e Queiroz (2014) para cada uma das 6 ligações propostas conforme a figura 3.1, por fim sobre a criação do desenho através das bibliotecas Pyautocad e Ezdxf além da implementação da *GUI* via PySide6.

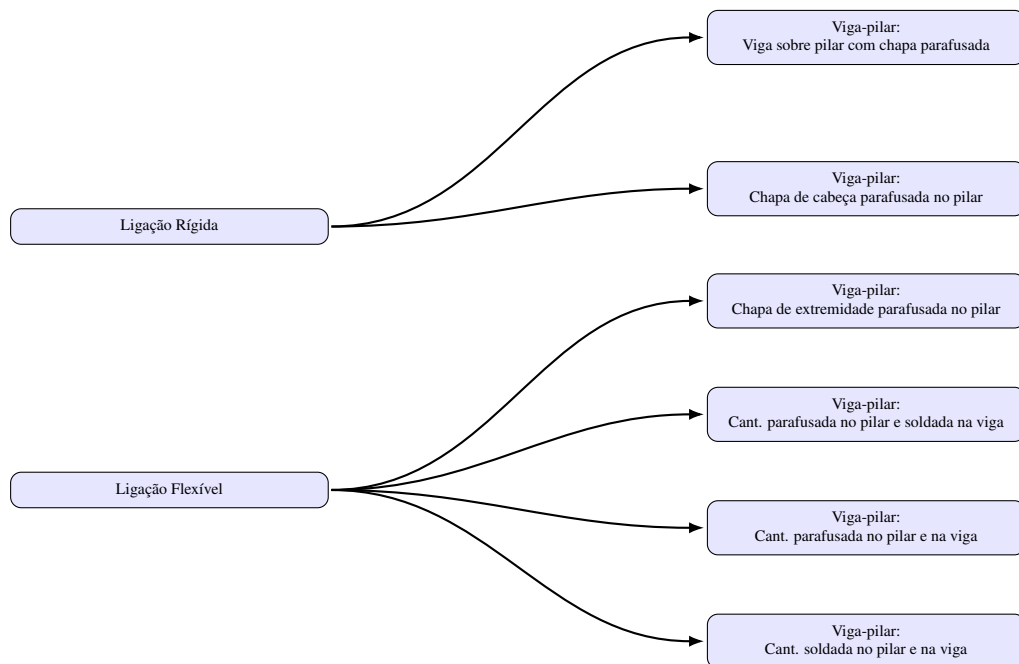


FIGURA 3.1 – Ligações que o programa dimensiona segundo a rigidez

Fonte: O autor (2025).

## 3.1 Estruturação do programa: *back-end*

### 3.1.1 Classes e objetos

Tendo em vista a repetição de padrões no cálculo de verificações, utilizou-se a metodologia de programação orientada a objetos (POO) para desenvolvimento do *software*, foram criadas as Classes (com letra maiúscula): Aço, Chapa, Perfil, Cantoneira, Parafuso, Solda. O objetivo dessas classes é ter como atributos propriedades únicas que as caracterizam assim como métodos que calculam propriedades físicas e geométricas importante para o cálculo das ligações.

A Classe Aço cria objetos com as características dos Aços comercialmente distribuídos, como: resistência nominal ao escoamento  $f_y$  em *MPa*, resistência nominal a ruptura  $f_u$  em *MPa*, módulo de elasticidade  $E$  em *GPa* e a densidade em  $kg/m^3$ . Por meio de propriedades em comum entre as classes foi passada a Classe Aço associada as classes Chapa e Cantoneira, conforme mostrado na 3.2

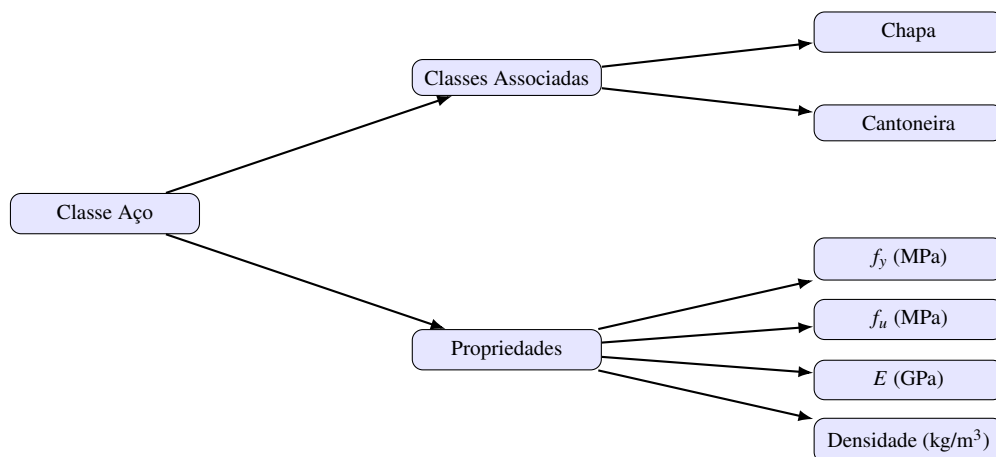


FIGURA 3.2 – Classe Aço: heranças e propriedades

Fonte: O autor (2025).

A Classe Chapa tem como propriedades, todas as dimensões em *mm*, a largura da chapa  $B$ , a altura da chapa  $h$ , a distância do centro do parafuso a borda, na vertical, em relação a base da chapa  $a$ , o *dataframe* (criado a partir da biblioteca Pandas)  $df$  e como atributo, um vetor com as espessuras comercialmente disponíveis para as chapas em polegadas, o grafo 3.3 representa as heranças e propriedades da Classe. O *dataframe*  $df$  indica os cinco vértices (o primeiro sendo igual ao último) da chapa, os valores dos vértices dos *dataframe* foi feito em função das propriedades da chapa. A Classe chapa é utilizada nas ligações, viga sobre pilar, chapa na extremidade e chapa na cabeça, nesse quesito, foi criado duas sub-classes, na qual a mãe é a Classe Chapa, essas sendo ChapaCabeça e ChapaExtremidade, as quais passa as funções que calcula os vértices dos respectivos dataframes.

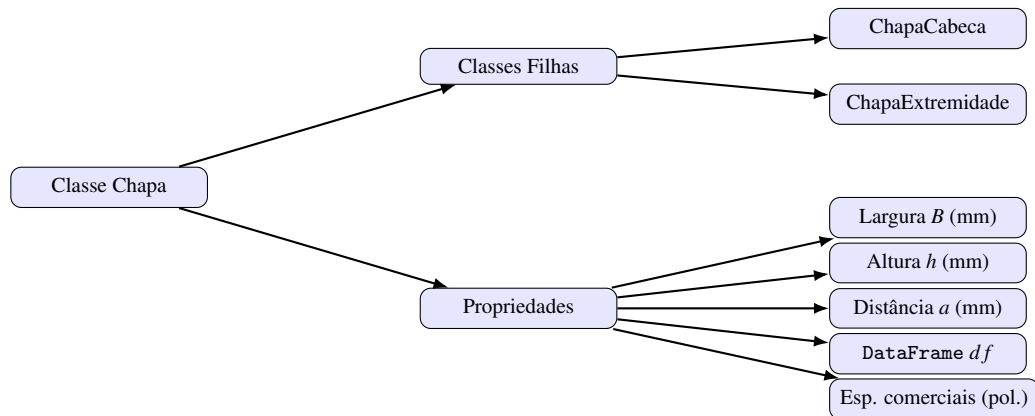


FIGURA 3.3 – Classe Chapa: heranças e propriedades

Fonte: O autor (2025).

A Classe cantoneira tem como propriedades, todas em milímetro (mm): a aba  $b$  (foi só considerada cantoneiras de abas iguais), a espessura  $t$ , a curvatura da cantoneira  $R_{conc}$ , sendo tabelada como  $10\text{ mm}$ , a distância  $f_b$  da linha de furação do parafuso a borda, a distância  $f_f$  entre furos de uma linha de furação e a distância  $f_l$  da linha de furação a face externa da outra aba da cantoneira, uma variável chamada nome foi criada como  $L_{(b \text{ em pol.}) \times (t \text{ em pol.})}$ , foi criado também, depois para ser preenchido depois de ter sido a cantoneira, o comprimento (altura) da cantoneira e a disposição dos parafusos. Como método, foi criado o método *vertices\_chapa* que calcula a partir das propriedades da cantoneira os 8 vértices de uma seção transversal da cantoneira. O grafo 3.4 representa as heranças e propriedades da Classe.

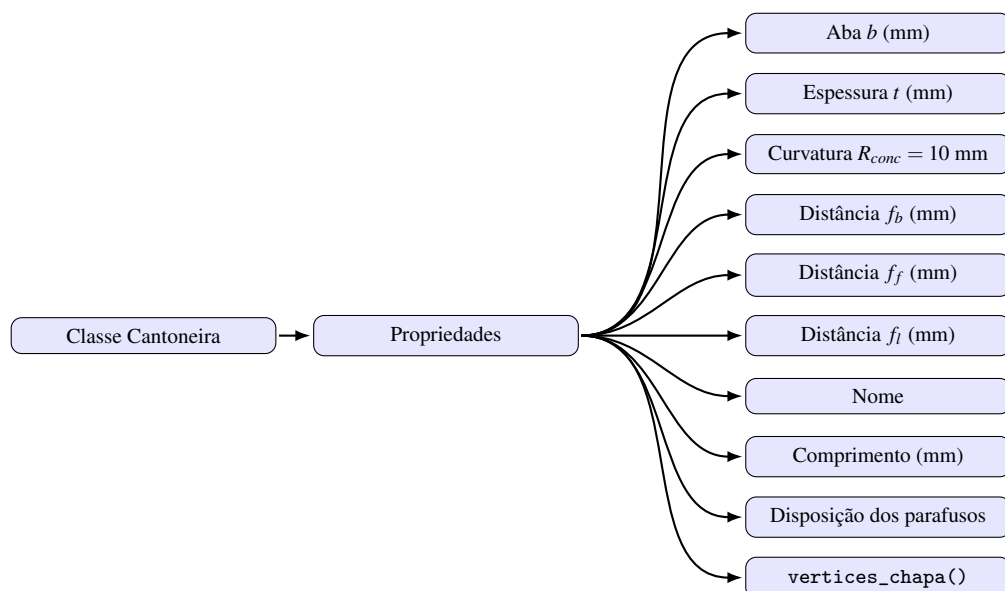


FIGURA 3.4 – Classe Cantoneira: propriedades

Fonte: O autor (2025).

A Classe Perfil tem como propriedades, todas em milímetro (mm): a largura da flange ( $b_f$ ), a espessura da flange ( $t_f$ ), a altura da alma ( $h_w$ ), a espessura da alma ( $t_w$ ), a altura total do perfil

( $h$ ), o raio de concordância entre a mesa e a alma, ao qual padronizado como  $R_{conc} = 10 \text{ mm}$  e o nome, conforme a padronização  $W_{(h)} \times (\text{peso\_linear})$  adotada nos catálogos da Gerdau S.A conforme (FILHO; SILVA; QUEIROZ, 2014). O método inercias associado a Classe calcula a inercia a flexão da mesa, da alma e do perfil inteiro.

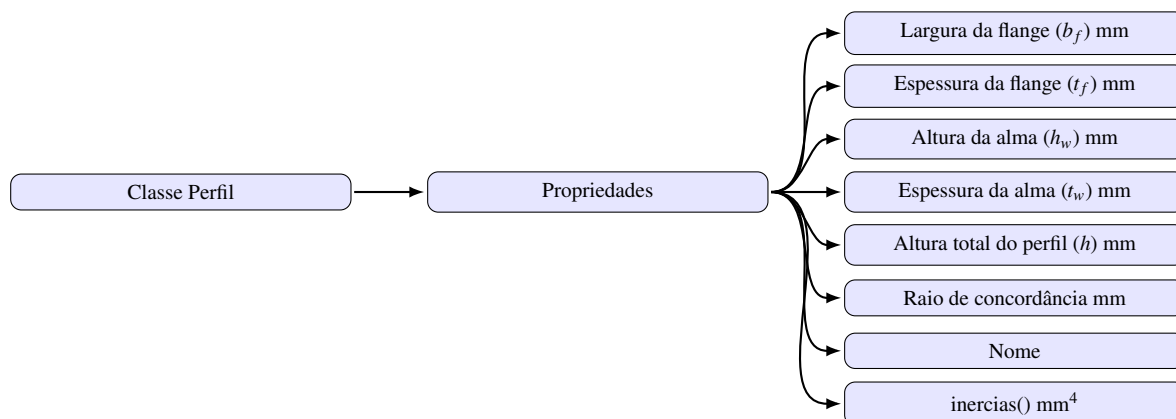


FIGURA 3.5 – Classe Perfil: propriedades geométricas e método de cálculo de inércia

Fonte: O autor (2025).

As Classes Parafuso e Solda terão ambas as mesmas propriedades a respeito da resistência a ruptura e o nomes. Foram padronizados a nomenclatura de Solda como  $EYYXX$ , onde  $YY$  é a resistência a ruptura da solda em ksi e a nomenclatura do Parafuso como é vendido comercialmente. A respeito da Classe dos Parafusos foi considerado também um atributo com os diâmetros comerciais conforme o tipo de parafuso em polegadas e milímetros e um atributo de número natural para indicar se o plano de corte do parafuso passa na rosca.

### 3.1.2 Critérios de equacionamento

A partir das Classes estruturadas, foi considerado os critérios normativos que a NBR 8800 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025) prever para disposições construtivas, resistência dos ligantes, cálculo dos solicitantes nos ligantes e por fim eventuais considerações de dimensionamento não abordadas na norma e que outros autores como (FILHO; SILVA; QUEIROZ, 2014) e (YOUNG; BUDYNAS; SADEGH, 2011) utilizam para dimensionamento dos elementos ligantes. Tais considerações foram colocadas como funções no *Python* e se encontram em `bolt_functions.py`, `weld_functions.py`, `cantoneiras_functions.py`, `chapas_functions.py`.

#### 3.1.2.1 Disposição construtiva dos ligantes

Segundo o item 6.3.6.2 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025), o diâmetro do furo padrão para parafusos ou barras rosqueadas é descrito pela Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – Diâmetro padrão de furo para parafusos ou barras rosqueadas

| Diâmetro do parafuso $d_b$ (pol.) | Diâmetro do furo-padrão (pol.) |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| $\frac{1}{2}$                     | $\frac{9}{16}$                 |
| $\frac{5}{8}$                     | $\frac{11}{16}$                |
| $\frac{3}{4}$                     | $\frac{13}{16}$                |
| $\frac{7}{8}$                     | $\frac{15}{16}$                |
| 1                                 | $1 \frac{1}{8}$                |
| $\geq 1 \frac{1}{8}$              | $d_b + \frac{1}{8}$            |

Segundo o item 6.3.6.2 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025), a distância da borda de uma chapa até o furo padrão é descrito pela Tabela 3.2.

TABELA 3.2 – Distância mínima do centro de um furo-padrão à borda

| Diâmetro $d_b$ (pol.) | Distância mínima (mm) |
|-----------------------|-----------------------|
| $\frac{1}{2}$         | 19                    |
| $\frac{5}{8}$         | 22                    |
| $\frac{3}{4}$         | 25                    |
| $\frac{7}{8}$         | 28                    |
| 1                     | 30                    |
| $1 \frac{1}{8}$       | 34                    |
| $1 \frac{1}{4}$       | 38                    |
| $> 1 \frac{1}{4}$     | $1,25 d_b$            |

Segundo o item 6.2.6.2.1 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025), a espessura mínima de solda do tipo filete é obtida a partir da espessura do menor metal-base envolvido na ligação, esse critério é descrito pela Tabela 3.3.

TABELA 3.3 – Tamanho mínimo da perna de uma solda de filete em função da espessura do metal-base

| Menor espessura do metal-base na junta (mm) | Tamanho mínimo da perna da solda de filete, $d_w$ (mm) |
|---|--|
| Abaixo de 6,3 e até 6,3                     | 3  |
| Acima de 6,3 até 12,5                       | 5  |
| Acima de 12,5 até 19                        | 6  |
| Acima de 19                                 | 8  |

### 3.1.2.2 Resistência dos ligantes

Segundo o item 6.2.5.1 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025), a tensão de resistência a esforços na solda é descrito como 3.1, no aplicativo a função resulta na resistência em MPa.

$$\tau_{r,w} = \frac{0,6 \cdot f_{uw}}{\gamma_{a2}} \quad (3.1)$$

Segundo o item 6.5.5 alínea b da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025), a tensão de resistência a esforços no metal-base da solda é descrito como 3.2, no aplicativo a função resulta na resistência em MPa.

$$\tau_{r,m} = \frac{0,6 \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \quad (3.2)$$

Segundo o item 6.3.3.1 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025), a resistência a esforços de tração no parafuso é descrito como 3.3, no aplicativo a função resulta na resistência em kN.

$$F_{t,Rd} = 0,75 \frac{f_u \cdot A_g}{\gamma_{a2}} \quad (3.3)$$

Segundo o item 6.3.3.2 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025), a resistência a esforços de cisalhamento no parafuso é descrito em duas expressões a depender se o corte do parafuso passa ou não na rosca. Esse critério é descrito pela fórmula 3.4, no aplicativo a função resulta na resistência em kN.

$$F_{v,Rd} = \begin{cases} 0,45 \frac{n \cdot f_u \cdot A_g}{\gamma_{a2}}, & \text{Plano de cisalhamento na rosca} \\ 0,56 \frac{n \cdot f_u \cdot A_g}{\gamma_{a2}}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.4)$$

Como as duas resistências são em planos perpendiculares, a resistência total do parafuso é descrita pela resultante vetorial das duas resistências, conforme 3.5.

$$F_{Rd} = \sqrt{F_{t,Rd}^2 + F_{v,Rd}^2} \quad (3.5)$$

Segundo o item 6.3.3 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025), a resistência de elementos de ligação submetidos a pressão de contato nos furos (furo-borda) e (furo-furo) são descritas praticamente pelo o mesmo equacionamento, em uma função só no *Python*, onde  $f_{u,m}$  é a resistência última do elemento,  $L$  é o comprimento do elemento na direção do cisalhamento,  $t$  a espessura do elemento. Nesse quesito, calculou-se as duas resistências para o elemento e se escolhe a formulação que resulta na menor resistência, tais formulações se encontram em 3.6.

$$F_{c,Rd} = \min \left\{ \frac{2,4 \cdot n \cdot f_{u,m} \cdot t \cdot d_{f,p} \cdot N}{\gamma_{a2}}; \frac{1,2 \cdot n \cdot f_{u,m} \cdot t \cdot g \cdot N}{\gamma_{a2}} \right\} \quad (3.6)$$

Segundo o item 6.5.5 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025), a resistência de elementos de ligação submetidos a cisalhamento é calculado para o estado limite de escoamento assim como ao estado limite de ruptura.  $f_{y,m}$  é a resistência de escoamento do elemento. Nesse quesito, escolhe-se a formulação que resulta na menor resistência, 3.7.

$$F_{v,Rd} = \min \left\{ \underbrace{\frac{0,6 \cdot n \cdot f_{y,m} \cdot L \cdot t}{\gamma_{a1}}}_{\text{escoamento da seção bruta}} ; \underbrace{\frac{0,6 \cdot n \cdot f_{u,m} \cdot (L - N_p \cdot d_{f,p}) \cdot t}{\gamma_{a2}}}_{\text{ruptura da seção líquida}} \right\} \quad (3.7)$$

Segundo o item 6.5.6 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025), a resistência de elementos de ligação submetidos a rasgamento de bloco é calculada em duas parcelas considerando a resistência advinda da área líquida sujeita a tração  $A_{nt}$  ponderada por um fator  $C_t$  (dentro do escopo do aplicativo, esse fator foi considerado como  $C_t = 1$ ) de não uniformidade da tensão mais o mínimo entre a resistência de cisalhamento para a área líquida  $A_{nv}$  e a área bruta  $A_{gv}$ . Nesse quesito, a formulação que indica a resistência do elemento é dada por 3.8.

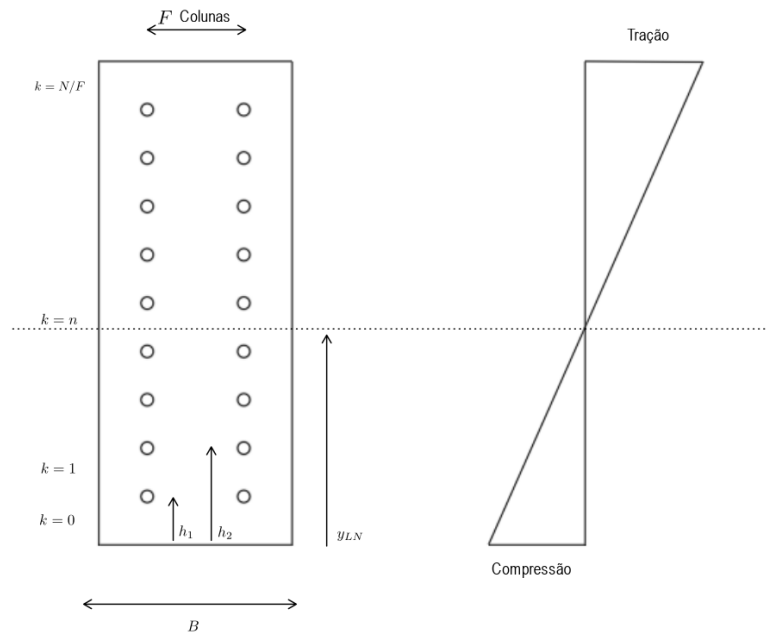
$$F_{rb,Rd} = \frac{C_t \cdot f_{u,m} \cdot A_{nt}}{\gamma_{a2}} + \min \left\{ \frac{0,6 \cdot f_{y,m} \cdot A_{nv}}{\gamma_{a2}} ; \frac{0,6 \cdot f_{u,m} \cdot A_{gv}}{\gamma_{a2}} \right\} \quad (3.8)$$

### 3.1.2.3 Solicitações nos parafusos

A solicitante advinda do esforço normal puro e do esforço cortante em cada parafuso, pode ser considerada uniforme para todos os parafusos da ligação, na hipótese de que eles estarão trabalhando em regime plástico, máxima capacidade de suporte, dessa forma tem-se a seguinte Equação tanto para  $T$  como para  $V$  em 3.9.

$$F_{T,Sd} = \frac{T}{N} \quad (3.9)$$

A solicitante advinda do momento fletor, entretanto, precisa ser calculada para cada parafuso individualmente. Considerando uma seção retangular com  $N$  parafusos no total, com  $F$  colunas de parafusos, submetida a um momento fletor positivo, tem-se a seguinte Figura 3.6. Para calcular a tensão solicitante de tração nos parafusos, precisa-se primeiramente achar a altura da linha neutra  $y_{LN}$ .

FIGURA 3.6 – Seção retangular submetida a um momento fletor e a altura da linha neutra  $y_{LN}$ 

Fonte: O autor (2025).

Para tal, considerando uma variável natural chamada  $k$ , que indica entre quais linhas de parafuso está a linha neutra (acima da linha neutra os parafusos estão tracionados, abaixo comprimidos, a valores de projeto os parafusos em ligações metálicas resistem a compressão na situação descrita). Como indicado em 3.6, caso a linha neutra esteja em  $k = n$ , indica que os parafusos da linha  $n + 1$  até  $N/F$  é que estarão tracionados. Considerando que a chapa tenha base de comprimento  $B$  e cada fileira esteja numa altura dada por  $h_k$ , tem-se pelo equilíbrio de momentos de área na seção que:

$$\sum M = 0 \longrightarrow B \cdot y_{LN} \cdot \frac{y_{LN}}{2} = \sum_{k=n+1}^{N/F} F \cdot (h_{k+1} - y_{LN}) \cdot A_g \quad (3.10)$$

A expressão 3.10 explicita o equilíbrios de momentos de área entre a área da chapa que está comprimida e a tensão nos parafusos tracionados. Como  $F$  e a área bruta da seção transversal de cada parafuso é constante, pode-se reorganizar a expressão como:

$$B \cdot \frac{y_{LN}^2}{2} + y_{LN} \cdot F \cdot A_g \cdot (N/F - n) - F \cdot A_g \cdot \sum_{k=n+1}^{N/F} h_{k+1} = 0 \quad (3.11)$$

A expressão 3.11 de 2º grau em  $y_{LN}$  permite calcular a altura da linha neutra em função de parâmetros simplesmente geométricos, o valor inteiro  $n$  precisa ser a priori indicado, ou iterativamente calculado, nas ligações rígidas, ao qual foi contabilizado os momentos fletores, foi realizado uma busca de  $n$  no espaço de 0 até  $N/F$ , calculando qual das possibilidades de

linhas neutras equilibrava estaticamente a ligação. Resolvendo a Equação em  $y_{LN}$ , considerando  $w = A_g \cdot F \cdot \sum_{k=n+1}^{N/F} h_{k+1}$ , para alívio de notação:

$$y_{LN} = \frac{-F \cdot A_g \cdot (N/F - n) \pm \sqrt{[F \cdot A_g \cdot (N/F - n)]^2 + 4 \cdot B \cdot w}}{2 \cdot B} \quad (3.12)$$

Como  $y_{LN}$  é positivo, a raiz negativa da Equação não tem sentido físico, dessa forma, pode-se expressar a altura da linha neutra em função de uma variável de busca  $n$  inteiro não negativo.

$$y_{LN}(n) = \frac{-F \cdot A_g \cdot (N/F - n) + \sqrt{[F \cdot A_g \cdot (N/F - n)]^2 + 4 \cdot B \cdot w}}{2 \cdot B} \quad (3.13)$$

A partir da altura da linha neutra, pode-se calcular o Momento de inércia da seção, a partir da 3.6. O momento de inércia será igual ao da área comprimida mais da área tracionada. O da área comprimida é dado por um triângulo de altura  $y_{LN}$  e base  $B \cdot y_{LN}$ , o da área tracionada, pela altura ao quadrado (em relação a linha neutra) das fileiras dos parafusos tracionados vezes a quantidade de parafusos por camada vezes a área bruta de cada parafuso. Tal descrição tem equacionamento dado por:

$$I_{inercia} = \frac{2}{3} y_{LN}(n) \cdot [B \cdot (y_{LN}(n))^2 / 2] + \sum_{k=n+1}^{N/F} (h_{k+1} - y_{LN}(n))^2 \cdot A_g \quad (3.14)$$

Dai, calculando o módulo elástico a flexão ( $W$ ) do parafuso mais tracionado (ou seja os que estão em  $h_{N/F}$ ) acha-se:

$$W = \frac{h_{N/F} - y_{LN}(n)}{I_{inercia}} \quad (3.15)$$

Portanto, a solicitante de tração nos parafusos (considerando para efeitos de projeto que todos os parafusos estão solicitados igualmente ao mais solicitado) advinda do momento fletor é dada por:

$$F_{M,Sd} = \frac{M \cdot A_g}{W} \quad (3.16)$$

Segundo o item 6.3.3.4 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025), quando ocorrer a ação conjunta de tração e cisalhamento em um parafuso, a seguinte equação elíptica, a partir das equações (3.3), (3.4), (3.9) e (3.16), pode ser explicitado como calcular se um parafuso resiste as solicitações combinadas em 3.17.

$$\left(\frac{F_{M,Sd} + F_{T,Sd}}{F_{t,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{V,Sd}}{F_{v,Rd}}\right)^2 \leq 1 \quad (3.17)$$

### 3.1.2.4 Solicitações nas soldas

Para as ligações soldadas, as tensões atuantes são tensões cisalhantes e advém dos esforços ao qual aquela solda está submetida dividido pelo comprimento  $l$  da solda, considerando um filete padronizado de  $t = 1 \text{ mm}$ , o intuito do dimensionamento da solda é descobrir quantas vezes precisa do filete  $t$  para que os esforços solicitantes sejam equilibrados pelos resistentes.

Para os esforços normais e cortantes, a tensão cisalhante  $\tau_{T,Sd}$  pode ser calculada dividindo o esforço pelo comprimento da solda  $l$ , obtendo a tensão em  $kN/mm$  para um filete de  $1 \text{ mm}$  de solda, conforme mostrado na Equação 3.18.

$$\tau_{T,Sd} = \frac{T}{l} \text{ kN/mm} \quad (3.18)$$

Para os esforços advindos dos momentos fletores na solda, a tensão cisalhante precisa ser calculada a partir do momento de inércia polar  $I_p$  do perfil da solda. Conforme comentado em Pfeil e Pfeil (2021), utilizando o método elástico, as tensões cisalhantes podem ser divididas em componentes X e Y, o dimensionamento sendo realizado a partir dos maiores valores de tensões no perfil de solda. Considerando que nos vértices  $x_{max}$  e  $y_{max}$ , a tensão de cisalhamento seja máxima, tem-se a tensão de cisalhamento advinda do momento conforme mostrada na Equação 3.19

$$\tau_{M,Sd} = \frac{M \cdot \sqrt{x_{max}^2 + y_{max}^2}}{I_p} \text{ kN/mm} \quad (3.19)$$

Assim a solicitação total de tensão de cisalhamento da solda é descrita pela resultante vetorial das solicitações normais, cortantes e de momento, conforme 3.20. O dimensionamento da solda deve ser feito comparando o resultado com as resistências explicitadas em (3.1) e (3.2).

$$\tau_{Sd} = \sqrt{\tau_{M,Sd}^2 + \tau_{T,Sd}^2 + \tau_{V,Sd}^2} \quad (3.20)$$

### 3.1.2.5 Dimensionamento da espessura das chapas

As medidas das chapas usadas nas ligações foi feito utilizando como parâmetros os dados relativos a altura e largura de chapas indicadas no manual (FILHO; SILVA; QUEIROZ, 2014). A espessura das chapas  $t$  foi calculada usando duas metodologias distintas, para as ligações chapa de cabeça e chapa de extremidade foi utilizado o equacionamento descrito no item 6.3.5 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025), que contabiliza na espessura da chapa caso seja rígida ou não, a partir do efeito alavanca nos parafusos. A outra metodologia, usada na ligação de viga sobre pilar, advém dos ábacos de Young, Budynas e Sadegh (2011) que leva em conta as áreas de influência de tensões numa chapa, permitindo o dimensionamento

com ou sem a presença de enrijecedores transversalmente a chapa.

O dimensionamento proposto por ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025), equaciona primeiramente as larguras tributárias dos parafusos internos  $p_{int}$  e externos  $p_{ext}$ , a partir da distância entre furos consecutivos  $e_{ext}$  m, furo-borda na direção do furo  $e_{int}$ , furo-borda na direção perpendicular  $a$  e furo até mesa soldada na chapa  $b$ , conforme mostrado na Figura 3.7.

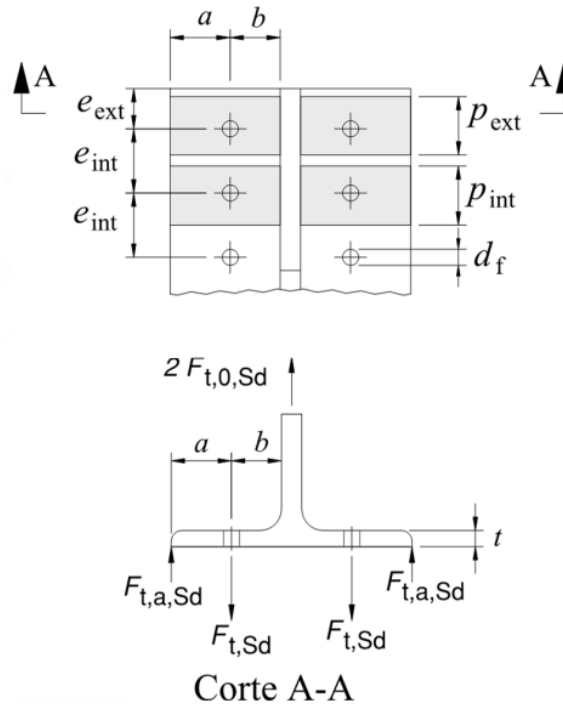


FIGURA 3.7 – Geometria para o efeito alavanca

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2025).

Nesse contexto, as larguras tributárias são calculadas como:

$$p_{ext} = \min\{e_{ext}; 1,75 \cdot b\} + \min\{0,5 \cdot e_{int}; 1,75 \cdot b\} \quad (3.21)$$

$$p_{int} = \min\{e_{int}; 3,5 \cdot b\} \quad (3.22)$$

A partir das larguras tributárias, foi escolhida, para efeitos de cálculo a menor largura tributária como a  $p$ , visto que essa consideração é conservadora. Logo, pode-se calcular os fatores  $\delta$ ,  $\beta$  e a partir deles o fator  $\alpha$ , para tais foram utilizados os parâmetros geométricos e dos esforços solicitantes na ligação  $T$  e resistentes nos parafusos  $F_{Rd}$ , conforme indicado em (3.5).

$$\delta = 1 - \frac{d_{f,p}}{p} \quad (3.23)$$

$$\beta = \frac{(a + 0,5 \cdot d_b)}{(b - 0,5 \cdot d_b)} \cdot \left( \frac{FRd}{0,5 \cdot T} - 1 \right) \quad (3.24)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1; & \text{se } \beta \geq 1,0 \\ \min \left[ 1,0; \frac{1}{\delta} \left( \frac{\beta}{1 - \beta} \right) \right]; & \text{se } 0 < \beta < 1,0 \end{cases} \quad (3.25)$$

A espessura  $t$ , então pode ser calculada dependendo se a placa será rígida ou flexível, conforme (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2025).

$$t \geq \begin{cases} \sqrt{\frac{2 \cdot (b - 0,5 \cdot d_b) \cdot T \cdot \gamma_{a1}}{p \cdot f_u}}; & \text{chapa rígida} \\ \sqrt{\frac{2 \cdot (b - 0,5 \cdot d_b) \cdot T \cdot \gamma_{a1}}{p \cdot f_u \cdot (1 + \delta \cdot \alpha)}}; & \text{chapa flexível} \end{cases} \quad (3.26)$$

O dimensionamento de chapas por áreas de influência, conforme descrito por Young, Budynas e Sadegh (2011), utiliza áreas de influência a depender das condições de contorno ao qual a área está submetida, geralmente avalia-se a área de influência, centrada em um parafuso e com os limitantes sendo a mesa ou a alma da viga soldada e o bordo livre ou não.

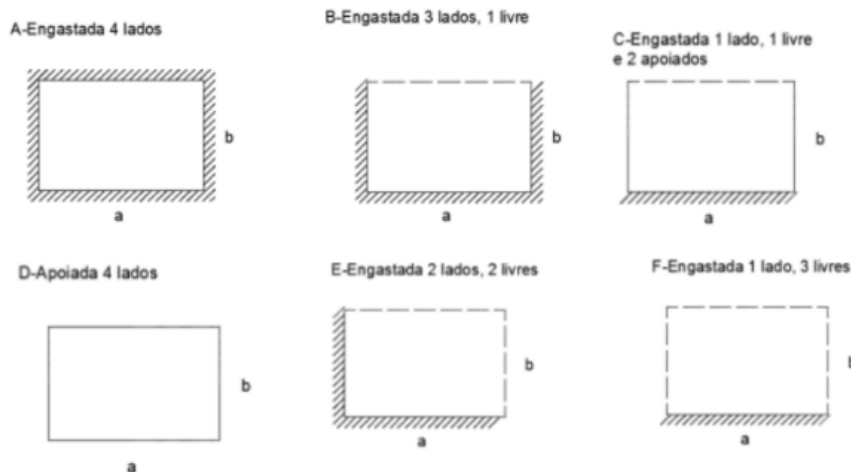


FIGURA 3.8 – Nomenclatura para os tipos de área de influência a depender do contorno.

Fonte: O autor (2025).

Primeiramente a Figura 3.8 mostra os tipos de contorno possíveis e sua nomenclatura, foi escolhidas áreas de influência e a partir daí selecionada o tipo de vinculação conforme o contorno dessa área, calculou-se o parâmetro  $a/b$  para cada área de influência e foi interpolado os valores da Tabela A.5 para calcular o  $\eta$  da vinculação.

A Tensão atuante na área de influência  $\sigma_{area}$ , foi calculada como o maior valor em módulo

das tensões máximas e mínimas atuantes na chapa, conforme mostrado em 3.27, onde  $A_{chapa}$  é a área da chapa e  $W_{chapa}$  é o módulo elástico a flexão da chapa.

$$\sigma_{chapa} = \max\left\{\frac{M}{W_{chapa}} \pm \frac{V}{A_{chapa}}\right\} \quad (3.27)$$

Então a espessura da chapa é calculada a partir do parâmetro  $\eta$  e  $\sigma_{area}$ , conforme mostrado na Equação (3.28).

$$t = b \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot \sigma_{area}}{f_y \cdot \gamma_{a2}}} \quad (3.28)$$

O dimensionamento dos enrijecedores da ligação viga sobre pilar também foi utilizada usando os ábacos de (YOUNG; BUDYNAS; SADEGH, 2011). Primeiramente se calcula o momento solicitante na região no qual o enrijecedor atua, considerando que o enrijecedor tenha altura  $h_{enri}$  (normalmente padronizado como  $100 \text{ mm}$ ), base  $y_{fim} - y_{inicio} = b_{enri}$  e espessura de chapa  $t_{enri}$ , o momento solicitante na região do enrijecedor pode ser calculado como  $M_{ch}$  em função dos parâmetros  $a_0$  e  $b_0$  advindos da integração (por conversão estão sendo considerados momentos positivos, momento negativos só mudariam o sinal do  $\sigma_{topo}$  e  $\sigma_{base}$ ), a Equação (3.29) explicita o cálculo do momento atuante.

$$M_{ch} = \int_{y=y_{inicio}}^{y=y_{fim}} (\sigma_{chapa} \cdot y) dy = b_{enri} \cdot \left[ \frac{a_0}{3} \cdot (y_{fim}^3 - y_{inicio}^3) + \frac{b_0}{2} \cdot (y_{fim}^2 - y_{inicio}^2) \right] \quad (3.29)$$

$$a_0 = \frac{\sigma_{topo} - \sigma_{base}}{h_{chapa}} = \frac{2 \cdot V}{h_{chapa} \cdot A_{chapa}} \quad (3.30)$$

$$b_0 = \sigma_{base} = \frac{M}{W_{chapa}} - \frac{V}{A_{chapa}} \quad (3.31)$$

A partir do momento  $M_{ch}$  a espessura do enrijecedor pode ser calculada a partir da equação do momento máximo que o enrijecedor suporta, considerando o limite de escoamento do mesmo, segundo (YOUNG; BUDYNAS; SADEGH, 2011), tem-se que:

$$M_{max} = \frac{t_{enri} \cdot h_{enri}^2 \cdot f_y}{6 \cdot \gamma_{a1}} \quad (3.32)$$

Por fim, igualando o momento  $M_{max}$  ao momento solicitante, pode-se achar a espessura do enrijecedor transversal a seção por meio de (3.33).

$$t_{enri} = \frac{6 \cdot \gamma_{a1} \cdot |M_{ch}|}{f_y \cdot h_{enri}^2} \quad (3.33)$$

### 3.1.3 Procedimento de cálculo

O procedimento de cálculo das seis ligações são diferentes entre si, porém no geral, seguem uma linha lógica quanto as etapas que são realizadas no código. A divisão entre ligações rígidas e flexíveis servem para situar sobre a solicitante de momento fletor a ser dimensionada ou não.

Caso seja necessário o dimensionamento do momento fletor, o processo de dimensionamento é uma busca dupla, variando a posição da linha neutra e o diâmetro do parafuso (as possibilidades são as disponíveis comercialmente conforme A.3), a partir daí chama-se um método de calcula as disposições construtivas dos ligantes para aquele diâmetro, conforme 3.1.2.1, caso o cálculo do arranjo tenha sido exitoso conforme normativas construtivas, calcula-se os esforços resistentes e solicitantes e usa-se a Equação 3.17, caso haja solução que seja menor que 1, o resultado será essa primeira solução encontrada.

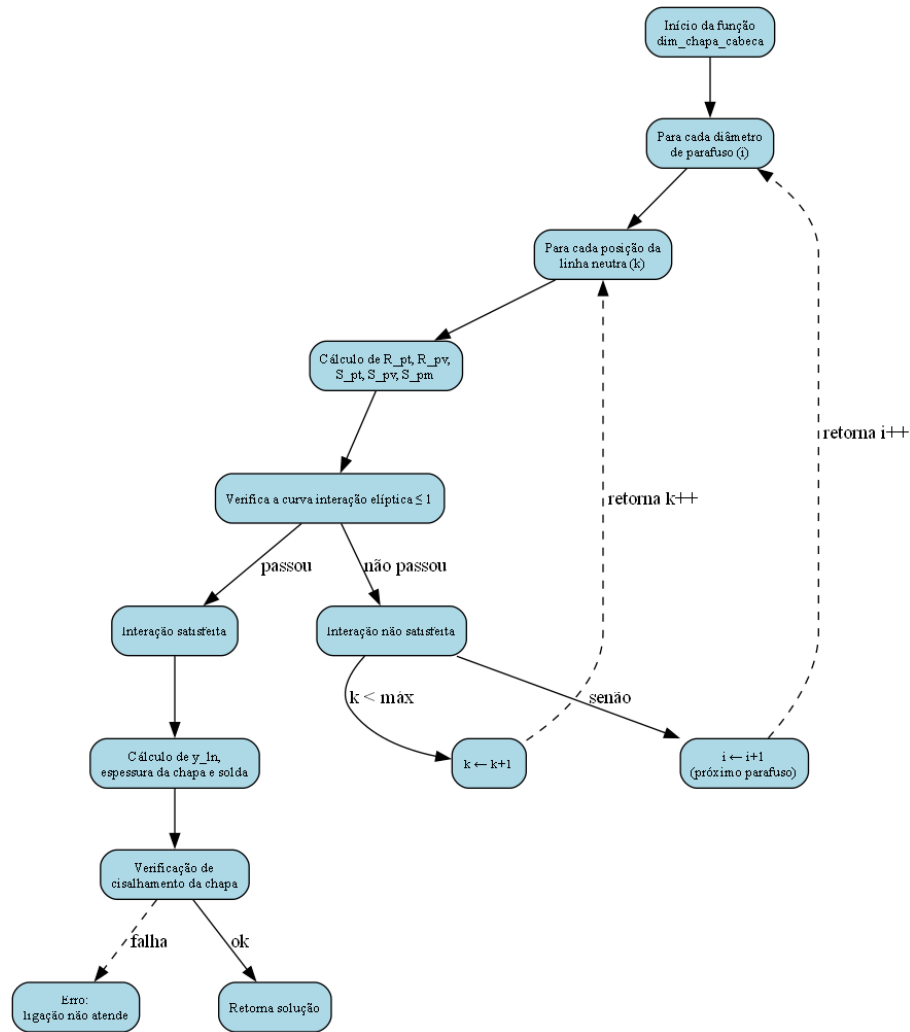


FIGURA 3.9 – Grafo mostrando o esquema de funcionamento do aplicativo para calcular a ligação chapa de cabeça.

Fonte: O autor (2025).

Para as ligações flexíveis, o dimensionamento não levará em conta o momento fletor externo, será considerado um momento torsor advindo do braço de alavanca do cortante em relação a excentricidade da ligação para as ligações com cantoneiras soldadas, porém esse momento é compatibilização e entra apenas para o cálculo da espessura da solda conforme 3.20. Nesse contexto, o espaço de busca do dimensionamento também tem como variáveis o diâmetro (caso haja parafuso na ligação) e as cantoneira do catálogo. O espaço de busca das cantoneiras é feito conforme uma ordenação em ordem crescente do tamanho do braço  $b$  da cantoneira e da espessura  $t$ , conforme a Tabela de cantoneiras padronizadas A.4.

### 3.1.4 Procedimento de desenho

As etapas de desenho, foram feitas, usando uma metodologia bottom-up, isto é, dos itens com menor grau de complexidade até os itens com maior grau de complexidade, sendo ao final

realizado a montagem deles na figura.

Primeiramente, desenhou-se as circunferências relativas ao diâmetro dos parafusos, para tal precisou-se do diâmetro dos parafusos (os desenhos foram feitos sem considerar a folga construtiva de 3 mm, porém a folga foi considerada no dimensionamento, conforme recomendado em 3.1.2.1). Dai, fez-se interativamente o desenho da circunferência conforme o número de parafusos, devido ao parafuso atravessar a chapa ou cantoneira, nessas situações, a circunferência foi espelhada para a outra face da chapa também. Depois foi calculado o lado dos hexágonos do parafuso. Segundo a Figura 3.10, o hexágono dos parafusos, são desenhados com o dobro do apótema sendo  $2 \cdot a = 1,5 \cdot d_b + 1/8''$ .

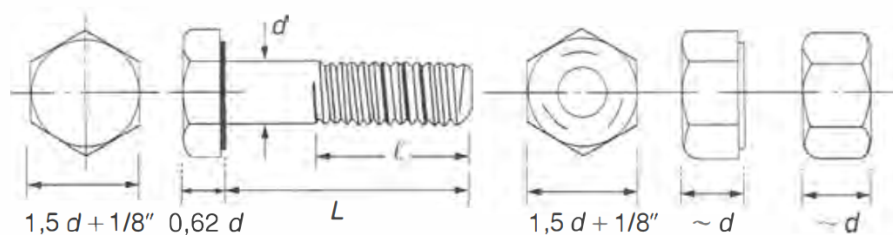


FIGURA 3.10 – Dimensões de parafusos tipo bolt para parafusos ASTM.

Fonte: (PFEIL; PFEIL, 2021).

Após o desenho dos parafusos, desenhou-se o elemento de ligação a depender do que foi utilizado, para as ligações com cantoneira: utilizou-se a família de cantoneiras de abas iguais da Gerdau, conforme A.4; o desenho foi feito através da geometria analítica, sabendo o tamanho do braço  $b$  e espessura  $t$  da cantoneira, pode-se calcular as coordenadas de cada vértice, usando arcos de circunferência para as regiões arredondadas (como o encontro dos braços). Após isso, colocou-se a coordenada dos parafusos (caso a cantoneira seja parafusada) e a espelhou para os dois lados da ligação. O processo de espelhamento foi feito numa função a parte da função que desenha os vértices da cantoneira e põe os furos da mesma, visando respeitar a modularização das atividades.

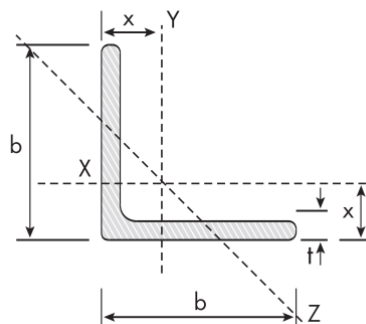


FIGURA 3.11 – Cotagem das dimensões do tipo de cantoneira utilizado.

Fonte: (PFEIL; PFEIL, 2021).

Para as ligações com chapa, procedimento análogo ao das cantoneiras foi realizado, na exceção da disposição dos parafusos e a posição da chapa em relação ao plano transversal da seção em I. Para a ligação de chapa de extremidade, não há transmissão de momento fletor, logo objetiva-se que não haja contato da chapa com as mesas do perfil, por isso, a chapa ficará desenhada e transladada para que só esteja em contato com a alma do perfil, o contato com a mesa será apenas por solda. Para a chapa de cabeça e a chapa que liga a viga sobre pilar, a chapa terá contato com toda a seção transversal do perfil I, visando a transmissão do momento fletor.

Por fim, para o desenho das seções transversais, as seções utilizadas já são tabeladas conforme (PFEIL; PFEIL, 2021) para perfis I. Utilizou-se novamente a estratégia de desenho via as coordenadas da seção por geometria analítica e a ligação delas por meio de elementos tipo *line*, porém o raio de concordância das mesas com a alma, foi padronizado como 10 mm, apesar de não ser exatamente o valor previsto conforme a padronização para construção desses perfis, a diferença é mínima e visa otimizar o processo de cálculo da resistência dos elementos ligantes.

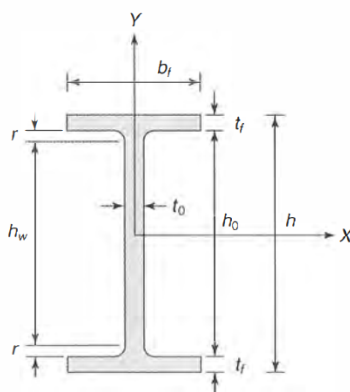


FIGURA 3.12 – Cotagem das dimensões do tipo de perfil I (W) utilizado.

Fonte: (PFEIL; PFEIL, 2021).

## 3.2 Estruturação do programa: *GUI*

### 3.2.1 Uso do *Autocad*

Na interface computado-usuário, o intuito do aplicativo é que seja simples e simpático ao usuário, de forma que seu uso seja objetivo e não crie muitos entraves para o usuário dimensionar e detalhar a ligação. Nesse aspecto, considerando a grande difusão e uso do aplicativo *Autocad* da empresa *Autodesk, Inc.*, o aplicativo possibilita o usuário salvar o arquivo em dois modelos de formato, usando o aplicativo *Autocad* caso tenha instalado e devidamente licenciado no computador. Nessa opção, no processo de detalhamento, o autocad será aberto automaticamente, e desenhada a sugestão de detalhamento após um certo tempo, convencionalmente o

desenho é salvo no formato *.dwg*, formato conhecido aos usuários dessa interface de desenho. Caso o usuário utilize outro software de desenho, o aplicativo permite salvar o desenho no formato *.dxf* que pode ser aberto em qualquer plataforma de desenho assistido pelo computador, conforme mostrado no grafo abaixo 3.13

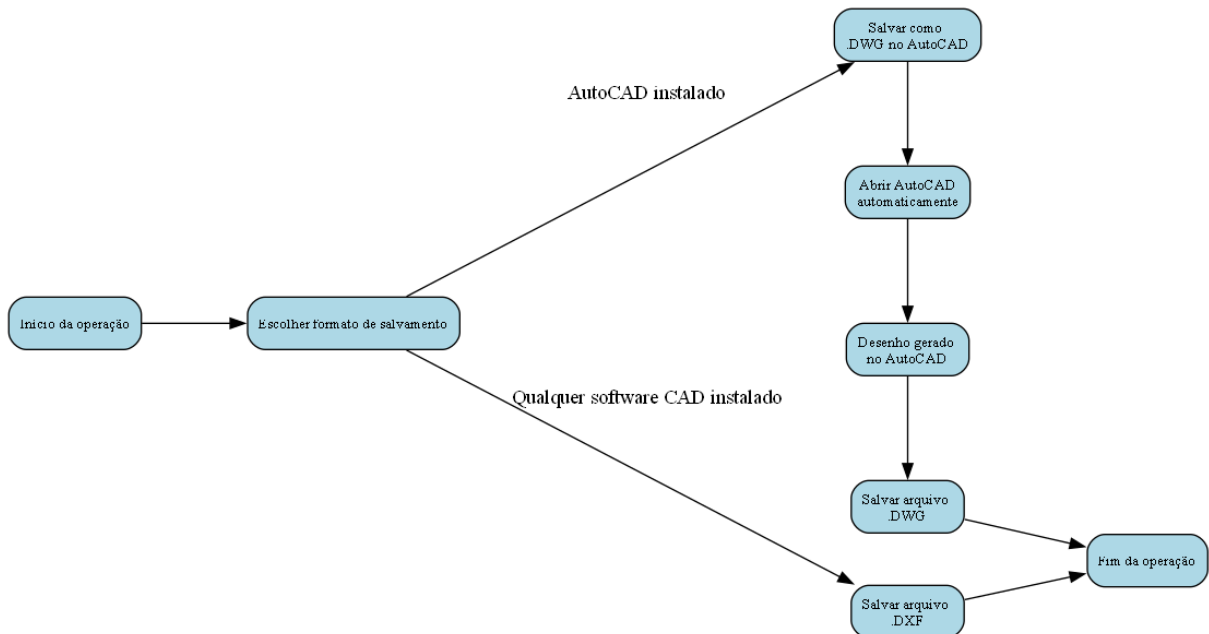


FIGURA 3.13 – Grafo explicativo sobre o processo de salvamento do desenho.

Fonte: O autor (2025).

### 3.2.2 Escolha dos materiais

Devido a grande variabilidade de opções de solda (quanto a resistência), parafusos (quanto a resistência, tamanho e material de fabricação) e tipos de aço diferentes (variando as propriedades físico-mecânicas), foi optado pelo aplicativo ter uma pequena biblioteca que possibilite o usuário, adicionar um novo material ou apagar um novo material, ficando as alterações salvas no computador no qual o usuário está executando o aplicativo.

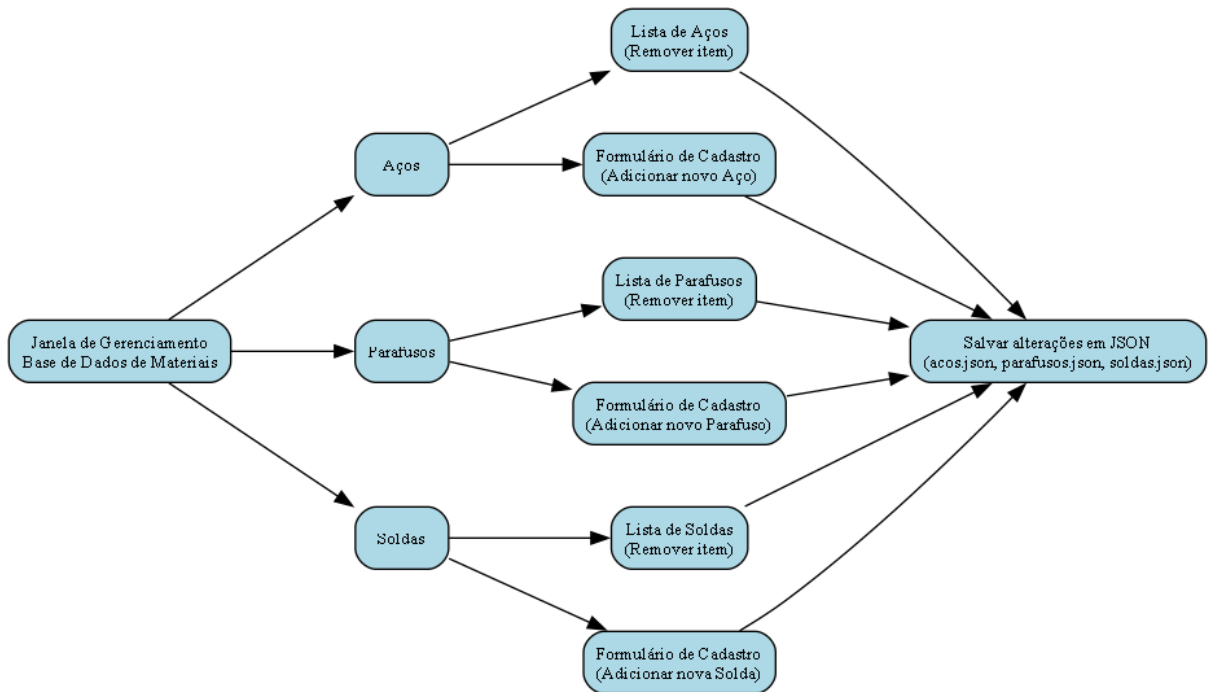


FIGURA 3.14 – Fluxo de funcionamento da seção de escolha e gerenciamento de materiais.

Fonte: O autor (2025).

A Figura 3.14 ilustra a lógica de operação do módulo de gerenciamento de materiais do aplicativo. O usuário pode selecionar a aba correspondente ao tipo de material desejado (Aços, Parafusos ou Soldas), visualizar a lista existente, remover itens ou adicionar novos materiais. Todas as alterações realizadas são imediatamente salvas nos arquivos JSON do usuário, garantindo persistência local dos dados.

### 3.2.3 Escolha das unidades

Por fim, foi implementado no aplicativo um pequeno sistemas de escolhas de unidades. Todos os cálculos do aplicativo são realizados em kN, mm como sistema de força e distância, porém a maior usabilidade de Quilograma-força ou tonelada força, juntamente com metro, no âmbito da construção civil, motivou a implementação de uma tela que permita ao usuário a escolha das dimensões com as quais deseja fazer o dimensionamento, dessa forma o aplicativo automaticamente converterá as dimensões escolhidas para as quais estão sendo usadas no sistema de cálculo.

## 4 Aplicativo: STCAD

Este capítulo expõe de maneira injuntiva o funcionamento do software STCAD, para tal será destrinchado nos seguintes tópicos: Tela Principal 4.1; Menu e configurações 4.2; Dimensionamento e detalhamento 4.3 e Exemplos resolvidos 4.4. O exemplo resolvido é fornecido pelo Fakury, Silva e Caldas (2016), no âmbito de verificação de ligações metálicas, como o intuito do software é o dimensionamento, verificar-se-á se as condições mínimas obtidas para ser dimensionado são satisfeitas pelas condições a serem verificadas, caso haja sucesso na comparação, indica que a ligação foi verificada.

### 4.1 Tela principal

Ao ser iniciado o aplicativo, a figura de carregamento expõe o ícone do aplicativo, assim como quais empresas e/ou organizações militares participaram do processo de elaboração do software, a figura da tela de carregamento é mostrada na Figura 4.1. a Tela inicial expõe as seis possibilidades de ligações a serem dimensionadas, a primeira fileira, sendo as ligações que utilizem chapa (as duas primeiras sendo as ligações rígidas), a segunda fileira, as três ligações possíveis com cantoneira.

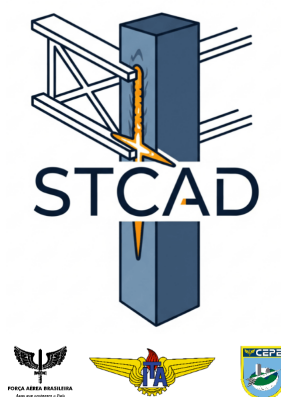


FIGURA 4.1 – Tela de carregamento do aplicativo STCAD

Fonte: O autor (2025).

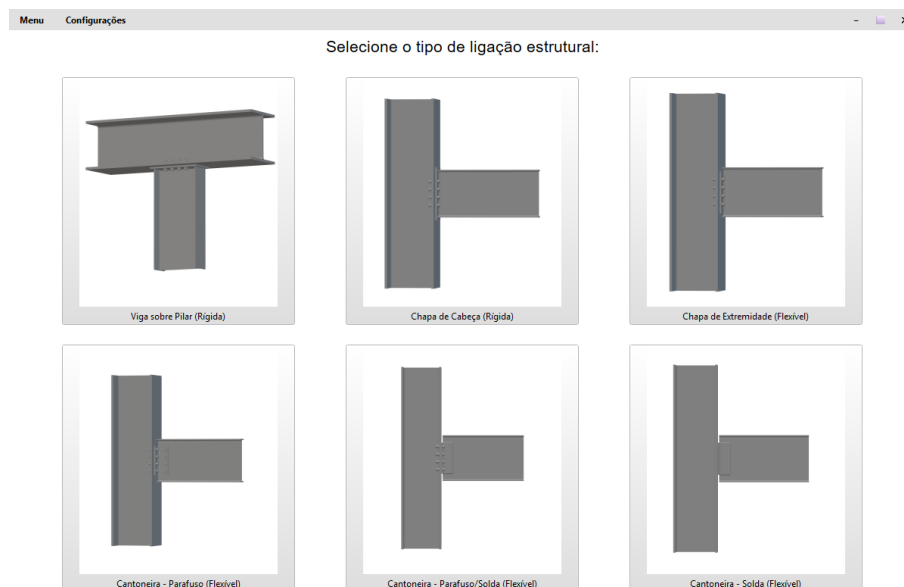


FIGURA 4.2 – Tela principal do software STCAD

Fonte: O autor (2025).

## 4.2 Menu e configurações

### 4.2.1 Menu

Acessando o primeiro botão do Menu da tela principal, o botão **Menu**, acessa-se as opções de **Ajuda**, a respeito do uso do software e o **Sobre** o seu desenvolvimento e proprietário legal.

O botão de **Ajuda** possibilita ao usuário, ver um vídeo de apoio, mostrando o funcionamento do aplicativo no botão **Vídeo Explicativo**; o botão **Manual de ligações da Gerdau S.A**, abre um arquivo em formato pdf com a bibliografia Filho, Silva e Queiroz (2014), visto que a mesma é disponibilizada gratuitamente na internet; o botão **Tabela de cantoneiras duplas**, abre em pdf, a tabela com os tipos de cantoneiras comerciais existentes, Tabela igual encontrada em A.4; o Botão **Tabela de perfis W**, abre em pdf, uma Tabela com todos os perfis I de aço, tipo W, disponíveis comercialmente. A tela de ajuda é mostrada na Figura 4.2.

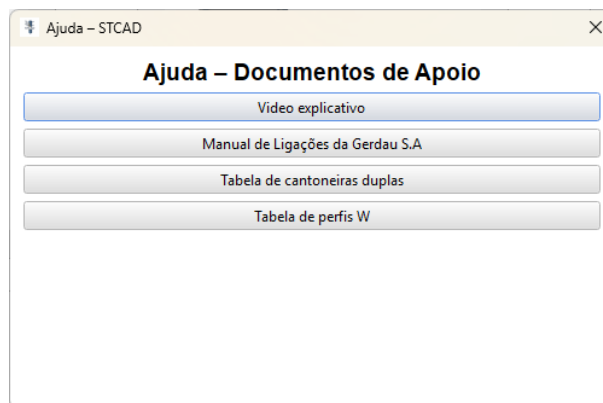


FIGURA 4.3 – Tela de Ajuda do software STCAD

Fonte: O autor (2025).

A Tela de sobre o funcionamento e desenvolvimento do software, expõe de maneira resumida e o assunto abordado no presente trabalho, conforme mostrado na Figura 4.4.



FIGURA 4.4 – Tela sobre o desenvolvimento e funcionamento do software STCAD

Fonte: O autor (2025).

## 4.2.2 Configurações

Acessando o segundo botão do Menu da tela principal, o botão **Configurações**, acessa-se as opções de **Unidades**, a respeito da mudança de unidades utilizadas (apara os esforços) no software, **Configurar AutoCAD**, que possibilita ao usuário permitir o acesso do programa ao software da *AutoDesk Inc. AutoCAD*, para o detalhamento ser feito em formato .dwg e aberto automaticamente no **AutoCAD**, **Gerenciar Materiais**, que permite ao usuário adicionar ou retirar materiais possíveis de serem utilizados, com base nas suas propriedades físico-mecânicas e o **Debug Console**, para desenvolvedores acompanhar o funcionamento do aplicativo.

O botão de **Unidades**, permite ao usuário escolhe em quais dimensões fornecerá os esforços para ser dimensionado, as opções incluem tf (tonelada-força) kgf (quilograma-força) e kN (kiloNewton) para as forças e suas respectivas combinações, na adequação da unidade para momentos. A Tela de escolha de unidades é mostrada na Figura 4.5.

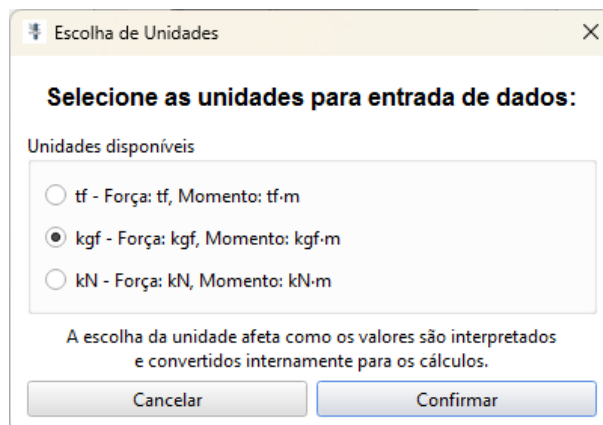


FIGURA 4.5 – Tela para a escolha das unidades utilizadas no software

Fonte: O autor (2025).

O botão **Configurar AutoCAD** permite ao usuário, que o software desenhe em tempo real o detalhamento em formato .dwg para o AutoCAD, para tal, o aplicativo deve estar devidamente instalado e licenciado. A Tela dessa configuração é mostrada na Figura 4.6.

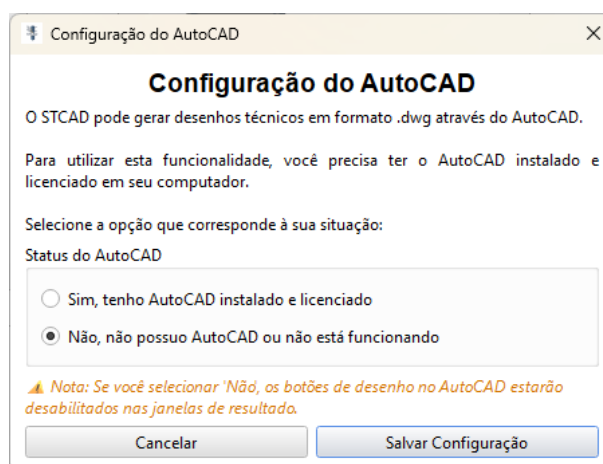


FIGURA 4.6 – Tela para a configuração do software AutoCAD

Fonte: O autor (2025).

O botão **Gerenciar Unidades** permite o usuário adicionar novos tipos de aço, solda ou parafusos, para tal os parâmetros físico-mecânicos precisam ser fornecidos em Mpa, caso tenha sido colocado um material de forma incorreta é possível apaga-lo usando a opção **Remover Selecionado**; a base de dados do STCAD já tem os seguintes materiais para uso A.2, caso necessário pode-se digitar um novo, em ocasiões diversas. A Tela da escolha dos Materiais é mostrada na Figura 4.7.



FIGURA 4.7 – Tela de escolha de materiais

Fonte: O autor (2025).

O botão **Debug Console**, permite ao desenvolvedor acompanhar em tempo real os procedimentos computacionais que o software realiza. A tela do terminal de *Debug* é mostrada na Figura 4.8.

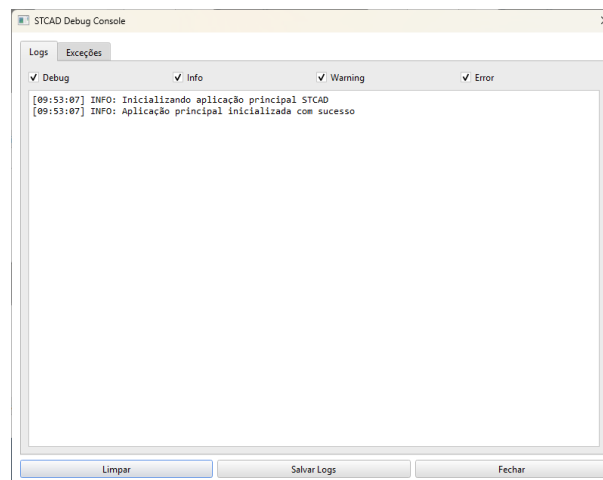


FIGURA 4.8 – Tela de Debug para desenvolvedores

Fonte: O autor (2025).

## 4.3 Dimensionamento e detalhamento

### 4.3.1 Ligação Rígida

Ao ser selecionada qual ligação rígida deseja-se dimensionar, o usuário deve selecionar pelos *ComboBox*, o tipo de Perfil, o tipo de aço do perfil, o tipo de aço da chapa, o tipo de parafuso e da solda. Os esforços podem ser colocados tanto com vírgula (,) tanto com ponto (.),

para indicar os decimais. O botão **Menu**, permite ao usuário fazer considerações menos usuais, porém previstas em norma, como se a chapa será Rígida (ou seja não sofre efeito alavanca, conforme discutido em 3.1.2.5) ou se o corte do parafuso passa na rosca, conforme discutido em 3.1.2.2. As Figuras 4.9 e 4.9 mostram a tela de dimensionamento com ou sem as opções avançadas respectivamente.



FIGURA 4.9 – Tela para o dimensionamento de uma ligação Rígida via chapa de cabeça

Fonte: O autor (2025).

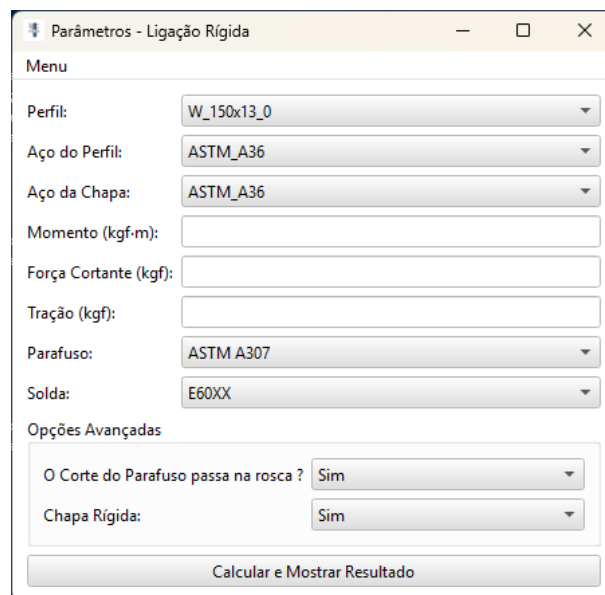
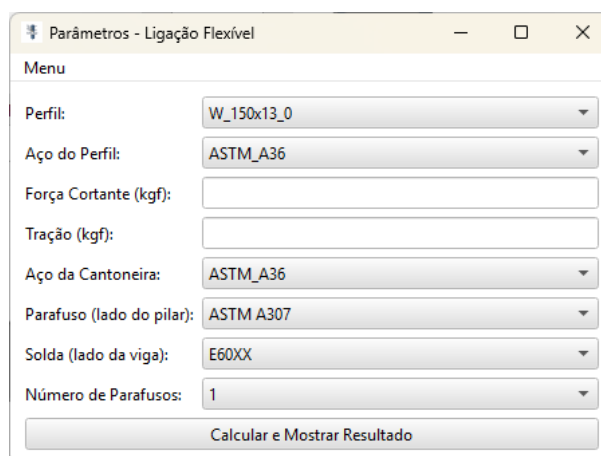


FIGURA 4.10 – Tela para o dimensionamento de uma ligação Rígida via chapa de cabeça com o Menu de opções avançadas

Fonte: O autor (2025).

### 4.3.2 Ligação Flexível

De forma análoga, ao dimensionamento de ligações rígidas, a tela de dimensionamento da ligação faz as mesmas considerações a respeito dos materiais envolvidos no dimensionamento, na diferença de que possibilita, caso haja parafuso na ligação com as cantoneiras, o usuário escolher quantos parafusos haverão na ligação da cantoneira via o *ComboBox* **Número de Parafusos**.



Parâmetros - Ligação Flexível

Menu

Perfil: W\_150x13\_0

Aço do Perfil: ASTM\_A36

Força Cortante (kgf):

Tração (kgf):

Aço da Cantoneira: ASTM\_A36

Parafuso (lado do pilar): ASTM A307

Solda (lado da viga): E60XX

Número de Parafusos: 1

Calcular e Mostrar Resultado

FIGURA 4.11 – Tela para o dimensionamento de uma ligação flexível por uma cantoneira parafusada-soldada

Fonte: O autor (2025).

### 4.3.3 Resultados do Dimensionamento

Frente ao que já foi mostrado sobre o funcionamento, será testado e mostrado os resultados de um MWE com a seguinte terna de esforços: Momento Fletor:  $1 \text{ kgf} \cdot \text{m}$ ; Tração:  $1 \text{ kgf}$  e Cortante:  $1 \text{ kgf}$  e com as propriedades físico-mecânicas mostradas na Tabela abaixo 4.1. Tendo em vista a ordem de grandeza dos esforços, percebe-se que não se condiz como um caso plausível de ocorrer na vida real, mas que matematicamente, mostre a perfeita operabilidade do STCAD.

TABELA 4.1 – Parâmetros físico-mecânicos para dimensionamento de ligação rígida testada no MWE.

| Parâmetro                           | Valor      |
|-------------------------------------|------------|
| Perfil                              | W_150x13_0 |
| Aço do Perfil                       | ASTM_A36   |
| Aço da Chapa                        | ASTM_A36   |
| Parafuso                            | ASTM A307  |
| Solda                               | E60XX      |
| <i>Opções Avançadas</i>             |            |
| O Corte do Parafuso passa na rosca? | Sim        |
| Chapa Rígida                        | Sim        |

Após ter sido feito o dimensionamento da ligação, a Figura 4.12, aparece explicitando o resultado que foi encontrado e mostrando as seguintes opções de botões que o usuário pode utilizar: o botão **TXT: Dimensionamento** permite que o usuário salve o resultado encontrado num arquivo .txt, ao qual virá com uma pequena sugestão de detalhamento sobre o processo de soldagem, conforme mostrado na Figura 4.13.

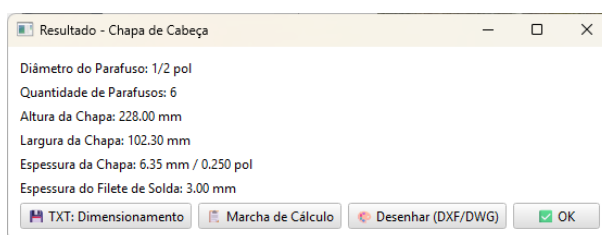


FIGURA 4.12 – Tela com o resultado do dimensionamento

Fonte: O autor (2025).

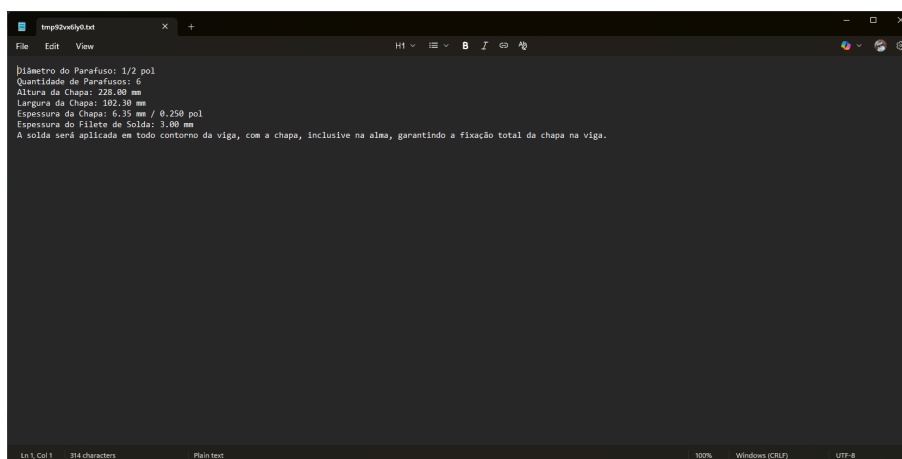


FIGURA 4.13 – Txt gerado com o dimensionamento com uma breve sugestão sobre locais de aplicação da solda.

Fonte: O autor (2025).

O botão **Marcha de Cálculo** permite ao usuário, visualizar a tela mostrada na Figura 4.14, para poder verificar todo o procedimento de cálculo feito no processo de dimensionamento da ligação.

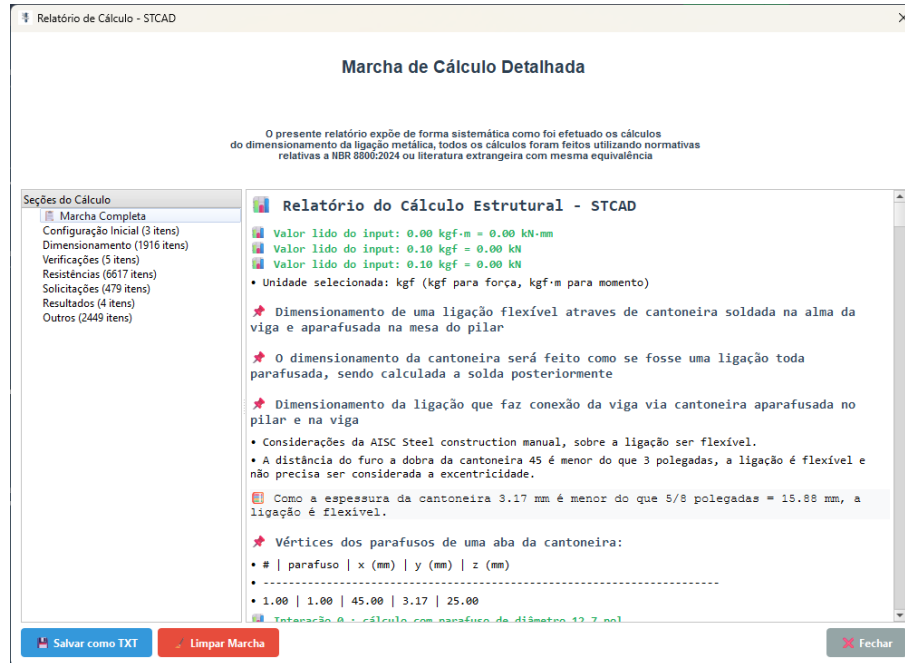


FIGURA 4.14 – Tela com o a marcha de todos os cálculos realizados para o dimensionamento da ligação

Fonte: O autor (2025).

Por fim, o botão **Desenhar (DXF/DWG)** permite ao usuário escolher através da tela mostrada na Figura 4.15, se deseja salvar o desenho via .dxf ou .dwg, sendo ambos esses casos mostrados nas Figuras 4.16 e 4.17, respectivamente.

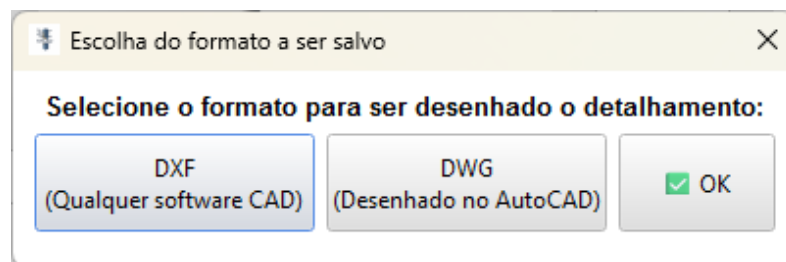


FIGURA 4.15 – Tela que permite ao usuário escolher se deseja salvar em .dxf ou .dwg

Fonte: O autor (2025).

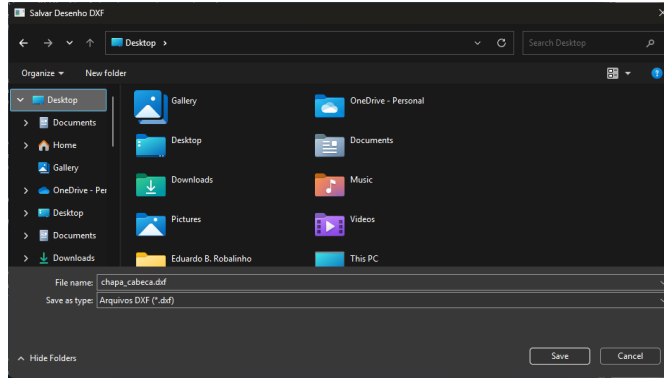


FIGURA 4.16 – Tela com a possibilidade de salvar o desenho da ligação em formato .dxf

Fonte: O autor (2025).

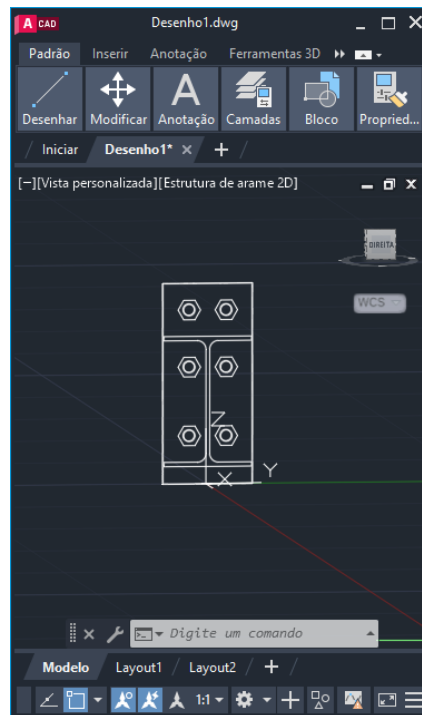


FIGURA 4.17 – Tela do aplicativo AutoCAD mostrando o detalhamento sugerido, em arquivo .dwg

Fonte: O autor (2025).

## 4.4 Exemplo resolvido

Como exemplo Resolvido, será verificada uma ligação simétrica proposta por (FAKURY; SILVA; CALDAS, 2016), no exercício 10.14.12.3, cujo enunciado pode ser encontrado na Figura 4.18

A partir do enunciado, percebe-se as seguintes informações podem ser retiradas do enunciado para serem colocadas no aplicativo STCAD, conforme a Tabela 4.2.

## H

## 10.14.12.3 Exemplo de cálculo

Propõe-se verificar a ligação rígida com chapa de topo mostrada, que tem a função de transmitir da viga para o pilar momento fletor, força cortante e força axial de tração, cujos valores de cálculo são 100 kN.m, 290 kN e 10 kN, respectivamente. Sabe-se que o pilar já se encontra submetido a uma força cortante sollicitante de cálculo de 50 kN (mostrada na figura) e a uma força axial de compressão sollicitante de cálculo de 3.300 kN. O pilar tem perfil soldado com solda de composição (filete duplo entre mesa e alma) com perna igual a 8 mm. A chapa de topo, os perfis da viga e do pilar e os enrijecedores possuem aço USI CIVIL 350. Os parafusos que unem a chapa de topo à mesa do pilar têm diâmetro de 3/4" ( $\cong 19$  mm) com rosca no plano de corte, especificação ASTM A325 e trabalham por contato. As soldas entre a chapa de topo e as mesas da viga e entre os enrijecedores transversais e as mesas do pilar são de penetração total, e as soldas que ligam a chapa de topo à alma da viga e os enrijecedores à alma do pilar são de filete, com perna de 6 mm, sempre com eletrodo E70XX (compatível com o aço USI CIVIL 350).

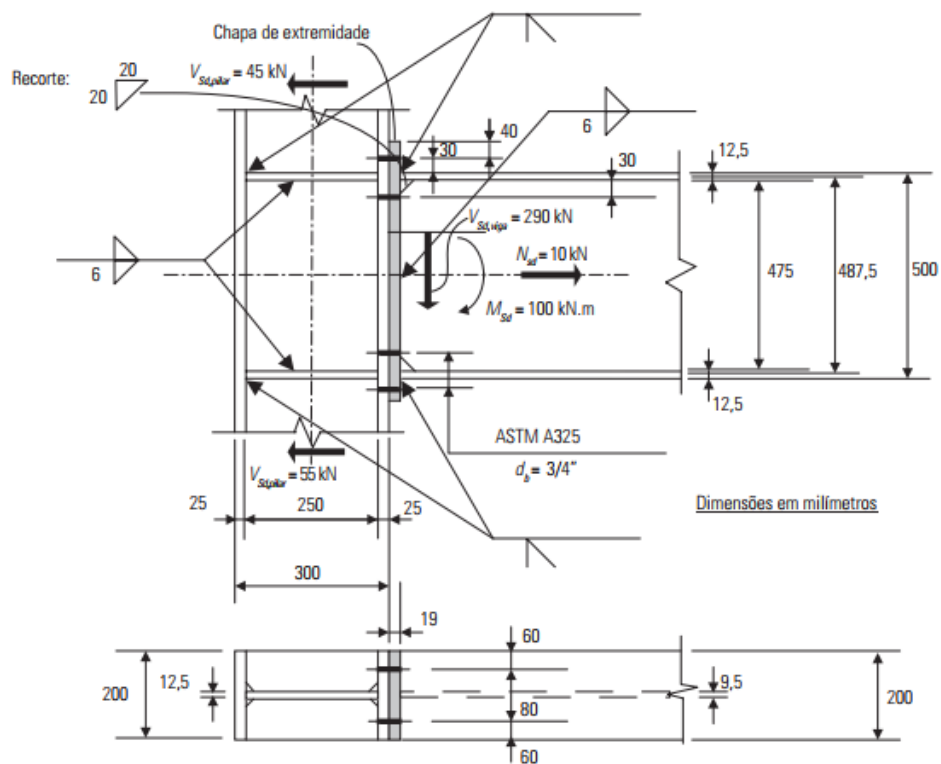


FIGURA 4.18 – Figura com a questão proposta como exemplo de cálculo de ligação rígida

Fonte: (FAKURY; SILVA; CALDAS, 2016)

TABELA 4.2 – Parâmetros comuns atualizados conforme a descrição do problema.

| Parâmetro                           | Valor         |
|-------------------------------------|---------------|
| Aço do Perfil                       | USI CIVIL 350 |
| Aço da Chapa                        | USI CIVIL 350 |
| Momento                             | 100 kN·m      |
| Força Cortante                      | 290 kN        |
| Tração                              | 10 kN         |
| Parafuso                            | ASTM A325     |
| Solda (Eletrodo)                    | E70XX         |
| O Corte do Parafuso passa na rosca? | Sim           |

A partir da Tabela 4.2, percebe-se que não há informação a respeito do tipo de Perfil da Viga, nem se a chapa é rígida e não há o aço *USI CIVIL 350* na base de dados do aplicativo. Dessa forma, pode-se primeiramente adicionar o aço na base de dados, através do gerenciador de materiais do aplicativo, esse procedimento, sendo mostrado na Figura 4.19.



FIGURA 4.19 – Tela mostrando a adição do aço USI CIVIL 350 na base de dados do STCAD

Fonte: O autor (2025).

Logo, pode-se através das propriedades geométricas cotadas na Figura 4.18, encontrar através da Tabela A.1, o perfil que mais tenha semelhanças geométricas, com o usado no enunciado. Pela Figura, percebe-se que o perfil tem altura  $h = 500 \text{ mm}$  e  $t_f = 12,5 \text{ mm}$ , logo o perfil mais próximo é o Perfil *W 530 x 74.0* (Tendo em vista que a espessura da mesa são praticamente

iguais e a mesa é que majoritariamente resiste ao momento fletor, a consideração feita é plausível). Por fim, pela figura, percebe-se que pretende-se verificar uma ligação chapa de cabeça cuja chapa tem uma espessura de  $e = 19 \text{ mm}$ , ao qual provavelmente se configura como uma chapa rígida, fato ao qual será considerado no aplicativo.

Portanto, fazendo uso de todas as considerações acima no aplicativo, tem-se a seguinte tela de dimensionamento, mostrada na Figura 4.20.

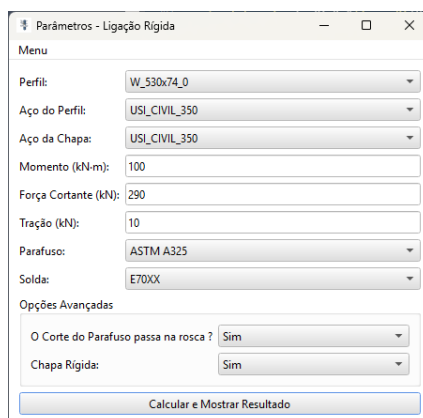


FIGURA 4.20 – Entrada de dados no STCAD para dimensionamento do problema proposto

Fonte: O autor (2025).

Resultando no seguinte dimensionamento para a situação proposta em 4.18, conforme mostrado em 4.21. Percebe-se que o mínimo necessário para o dimensionamento da ligação, são 6 parafusos de  $5/8 \text{ pol}$ , com uma chapa rígida de  $5/8 \text{ pol}$ , a ligação sendo submetida a um filete mínimo de solda de  $5 \text{ mm}$ . A partir da comparação com os valores no qual foi construída a ligação, percebe-se que tanto o diâmetro da espessura, quanto a espessura da chapa e o filete de solda são maiores do que os valores mínimos achados na verificação, garantindo que a ligação foi verificada com sucesso. Vale salientar que o aplicativo STCAD não aborda o dimensionamento dos enrijecedores no pilar constados na verificação, tais verificações devem ser feitas a parte.

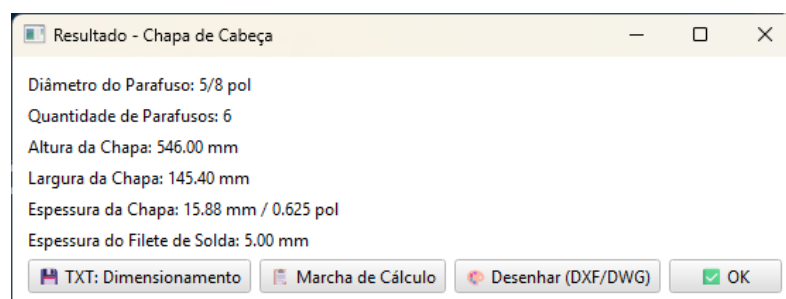


FIGURA 4.21 – Dimensionamento com as considerações mínimas para que a ligação aguente a s solicitações descritas

Fonte: O autor (2025).

Por fim, a sugestão de detalhamento para a ligação, (tendo em vista que a ligação é simétrica,

precisa-se no desenho, espelhar a parte superior da ligação) é mostrada na Figura 4.22

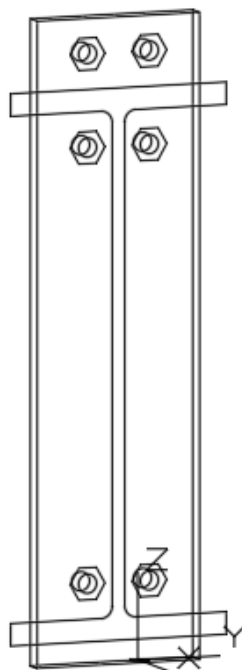


FIGURA 4.22 – Sugestão de detalhamento feito com base nos resultados encontrados em 4.21.

Fonte: O autor (2025).

## 5 Considerações Finais

Neste capítulo, será apresentado uma visão geral do trabalho e sugestões de temas para estudos futuros.

O presente trabalho de graduação teve como propósito o desenvolvimento de uma aplicação computacional, o software STCAD, destinada a automatizar e otimizar o processo de cálculo e detalhamento de ligações em estruturas de aço. O objetivo central foi criar uma ferramenta alinhada às normas técnicas brasileiras, em especial a ABNT NBR 8800:2024, que servisse como uma alternativa prática e economicamente acessível aos softwares comerciais de alto custo, visando atender às demandas de escritórios de engenharia e das organizações militares da FAB.

Para atingir este objetivo, foi elaborada uma metodologia robusta que combina os critérios normativos de dimensionamento com os paradigmas do POO em Python. Essa abordagem permitiu a criação de um código modular e de fácil manutenção, capaz de dimensionar seis diferentes tipologias de ligações viga-pilar, tanto rígidas quanto flexíveis. O resultado é uma aplicação funcional com uma GUI, que não apenas realiza as verificações estruturais, mas também gera automaticamente sugestões de detalhamento em formatos de arquivo CAD (.dwg e .dxf), integrando as etapas de cálculo e desenho. A validação do software, por meio da comparação com um exemplo resolvido da literatura, demonstrou a precisão e a confiabilidade dos resultados, atestando a correta implementação do motor de cálculo.

A principal contribuição deste projeto reside na entrega de uma solução que ataca diretamente um dos maiores gargalos no projeto de estruturas metálicas: o tempo e o esforço despendidos na etapa de projeto executivo. Ao automatizar tarefas repetitivas e complexas, o STCAD proporciona um ganho significativo de agilidade, padroniza a apresentação dos resultados e minimiza a probabilidade de erros humanos, representando um avanço prático para a rotina de engenheiros e projetistas.

## 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Apesar de funcional, o STCAD foi concebido como um projeto inicial com grande potencial de expansão. As sugestões a seguir visam promover o desenvolvimento de uma metodologia ainda mais robusta e abrangente, explorando o potencial máximo das ferramentas computacionais na área de engenharia de estruturas.

- **Expansão da Biblioteca de Ligações e Componentes:** O escopo atual contempla seis tipos de ligações viga-pilar. Uma evolução natural do projeto seria a inclusão de outras tipologias de uso corrente, como ligações de base de pilar (rótulas e engastes), emendas de vigas e pilares, e ligações para sistemas de contraventamento.
- **Verificação Integrada de Componentes Adjacentes:** Atualmente, o software foca no dimensionamento dos elementos de ligação (parafusos, chapas, soldas). Sugere-se a implementação de módulos para a verificação automática dos elementos adjacentes, como a resistência da alma do pilar a forças concentradas, enrijecedores na alma dos pilares e a flambagem da mesa, análises que hoje devem ser feitas à parte pelo engenheiro.
- **Implementação de um Módulo de Otimização:** O algoritmo atual realiza uma busca pela primeira solução que atende aos critérios normativos. Propõe-se o desenvolvimento de um módulo de otimização que, a partir de um conjunto de soluções viáveis, identifique aquela de menor custo, considerando fatores como o peso do aço, o número de parafusos e a complexidade de fabricação.
- **Implementação de um sistema de verificação para patologias estruturais:** A função do STCAD pode ser reestruturada de forma que não somente faça o dimensionamento de uma ligação metálica, mas que possibilite ao usuário, através de um fornecimento de fotos e/ou dados sobre uma ligação já construída, seja avaliada se a construção foi feita corretamente e qual a previsão de vida útil daquela ligação naquele sistema construtivo, tal perspectiva pode ser vislumbrada através da implementação de um sistema de aprendizado de máquina (Machine Learning) no sistema de cálculo do aplicativo.
- **Avanço para a Plataforma BIM e Interoperabilidade:** Para alinhar o STCAD às práticas mais modernas da indústria, sugere-se a sua integração com o fluxo de trabalho BIM (*Building Information Modeling*). Isso incluiria a capacidade de importar esforços diretamente de softwares de análise estrutural (FEM) e exportar um modelo 3D detalhado da ligação, facilitando a compatibilização com outras disciplinas de projeto.
- **Detalhamento Avançado e Geração de Documentação:** A funcionalidade de desenho pode ser aprimorada para incluir cotação automática, simbologia de solda padronizada e

a geração de vistas ortogonais e cortes. Adicionalmente, a criação de um recurso para gerar automaticamente listas de materiais e relatórios de cálculo mais detalhados agregaria grande valor à documentação de projeto e também a possibilidade do projetista através de uma plataforma integrada ao sistema de desenho fazer considerações sobre espaçamentos variáveis, simetria de esforços e o uso de múltiplos diâmetros de parafusos.

# Referências

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Eurocode 3 - Design of steel structure**. July 2007. Part 1-8 : design of joints - National Annex to NF EN 1993-1-8:2005 - Design of joints.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6120:2024 - Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. March 2024. Esta versão corrigida da ABNT NBR 6120:2019 incorpora a Errata 1, de 12.11.2019. Confirmada em 27.03.2024

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800:2024 Versão Corrigida:2025 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações**. February 2025. Esta versão corrigida da ABNT NBR 8800:2024 incorpora a Errata 1, de 25.02.2025.

BELLEI, I. H. **Edifícios de múltiplos andares em aço**. 2º. ed. São Paulo - SP: PINI, 2008. 558 p. ISBN 9788572661843

BOWLES, J. E. **Structural steel design**. New York - NY: McGRAW-HILL Internacional Book Company, 1980. ISBN 978-0070067653

BRASIL. Lei, **Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021. Lei de Licitações e Contratos Administrativos**. April 2021. Nova Lei de Licitações e Contratos Administrativos

Comando da Aeronáutica. **PCA 11-47, Plano Estratégico Militar da Aeronáutica: 2018 - 2027**. December 2018. Esta versão foi publicada em Boletim de Comando da Aeronáutica em 20.12.2018

FAKURY, R. H.; SILVA, A. L. R. d. C. e.; CALDAS, R. B. **Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016. ISBN 978-85-430-0112-8

FIGUEIREDO, C. de. **Novo dicionário da língua portuguesa**. Project Gutenberg, 2010. (Library of Alexandria). ISBN 9781465568298. Available at: <https://books.google.com.br/books?id=x1c0mi78WQoC>

FILHO, O. T. B.; SILVA, A. C. V.; QUEIROZ, G. **Ligações para Estruturas de Aço: Guia Prático para Estruturas com Perfis Laminados**. 6. ed. São Paulo - SP: Gerdau, 2014. Elaborado com colaboração de Ronaldo do Carmo Soares, Henrique José Ferreira da Silva e Janaína Maria da Silva

MEMÓRIAS, R. **Edifício Avenida Central**. jan. 2022. Memórias do Rio. Acesso em: 3 set. 2025. Available at: <https://riomemorias.com.br/memoria/edificio-avenida-central/>

MOZMAN. **ezdx** Documentation. 2023. <https://ezdxf.mozman.at/docs/>. Acesso em: 06 ago. 2025

NOBRE, L. **Aderson Moreira da Rocha: Um Brillhante Engenheiro e Suas Contribuições à Engenharia Brasileira**. jun. 2012. Blog Fortaleza Nobre. Acesso em: 21 abr. 2025. Available at: <http://www.fortalezanobre.com.br/2012/06/aderson-moreira-da-rocha-um-brilhante.html>

NUMPY DEVELOPERS. **NumPy Documentation**. 2024. Available at: <https://numpy.org>

PANDAS DEVELOPMENT TEAM. **Pandas Documentation**. 2024. Available at: <https://pandas.pydata.org>

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Aço - Dimensionamento Prático**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2021. ISBN 9788521637646. Available at: <https://books.google.com.br/books?id=08r1zwEACAAJ>

PYPL. **PYPL PopularitY of Programming Language Index**. 2025. Site oficial do PYPL. Acesso em: 21 abr. 2025. Available at: <https://pypl.github.io/PYPL.html>

RECLOSEDEV. **pyautocad - GitHub repository**. 2024. Available at: <https://github.com/reclosedev/pyautocad>

ROCHA, A. M. d. **Novo curso prático de concreto armado**. Rio de Janeiro - RJ: EDITORA CIENTÍFICA, 1972. 507 p.

SANTOS, A. F. dos. **Estruturas metálicas: projeto e detalhes para fabricação**. 1º. ed. São Paulo - SP: Mc Graw-Hill do Brasil, 1977. 284 p.

THE QT COMPANY. **Qt for Python (PySide6) Documentation**. 2024. Available at: <https://doc.qt.io/qtforpython>

YOUNG, W.; BUDYNAS, R.; SADEGH, A. **Roark's Formulas for Stress and Strain, 8th Edition**. Chicago, Illinois.: McGraw Hill LLC, 2011. ISBN 9780071742481. Available at: <https://books.google.com.br/books?id=pF2JAwAAQBAJ>

# Anexo A - Tabelas informativas

TABELA A.1 – Dimensões de perfis W.

| <b>Perfil</b> | <b>Peso Linear<br/>(kg/m)</b> | <b>Altura (h)<br/>(mm)</b> | <b>Larg. Mesa (b<sub>f</sub>)<br/>(mm)</b> | <b>Esp. Alma (t<sub>w</sub>)<br/>(mm)</b> | <b>Esp. Mesa (t<sub>f</sub>)<br/>(mm)</b> |
|---------------|-------------------------------|----------------------------|--|---|---|
| W 150 x 13.0  | 13.0                          | 148                        | 100  | 4.3                                       | 4.9                                       |
| W 150 x 18.0  | 18.0                          | 153                        | 102  | 5.8                                       | 7.1                                       |
| W 150 x 22.5  | 22.5                          | 152                        | 152  | 5.8                                       | 8.5                                       |
| W 150 x 24.0  | 24.0                          | 160                        | 102  | 6.6                                       | 10.3                                      |
| W 200 x 15.0  | 15.0                          | 200                        | 100  | 4.3                                       | 5.2                                       |
| W 200 x 19.3  | 19.3                          | 203                        | 102  | 5.8                                       | 6.2                                       |
| W 200 x 22.5  | 22.5                          | 206                        | 102  | 6.2                                       | 8.0                                       |
| W 200 x 26.6  | 26.6                          | 207                        | 133  | 5.8                                       | 8.4                                       |
| W 200 x 31.3  | 31.3                          | 210                        | 134  | 6.4                                       | 10.2                                      |
| W 200 x 35.9  | 35.9                          | 201                        | 165  | 6.2                                       | 10.2                                      |
| W 200 x 41.7  | 41.7                          | 205                        | 166  | 7.2                                       | 11.8                                      |
| W 200 x 46.1  | 46.1                          | 203                        | 203  | 7.2                                       | 11.0                                      |
| W 200 x 52.0  | 52.0                          | 206                        | 204  | 7.9                                       | 12.6                                      |
| W 200 x 59.0  | 59.0                          | 210                        | 205  | 9.1                                       | 14.2                                      |
| W 250 x 17.9  | 17.9                          | 251                        | 101  | 4.8                                       | 5.3                                       |
| W 250 x 22.3  | 22.3                          | 254                        | 102  | 5.8                                       | 6.9                                       |
| W 250 x 25.3  | 25.3                          | 257                        | 102  | 6.0                                       | 8.4                                       |
| W 250 x 28.4  | 28.4                          | 260                        | 102  | 6.4                                       | 10.0                                      |
| W 250 x 32.7  | 32.7                          | 256                        | 146  | 6.1                                       | 9.1                                       |
| W 250 x 38.5  | 38.5                          | 260                        | 147  | 6.6                                       | 11.2                                      |
| W 250 x 44.8  | 44.8                          | 264                        | 148  | 7.6                                       | 13.0                                      |
| W 250 x 73.0  | 73.0                          | 254                        | 254  | 8.6                                       | 14.2                                      |
| W 310 x 21.0  | 21.0                          | 303                        | 101  | 5.1                                       | 5.7                                       |
| W 310 x 23.8  | 23.8                          | 305                        | 101  | 5.5                                       | 6.7                                       |
| W 310 x 28.3  | 28.3                          | 309                        | 102  | 6.0                                       | 8.9                                       |
| W 310 x 38.7  | 38.7                          | 302                        | 165  | 5.8                                       | 9.7                                       |
| W 310 x 52.0  | 52.0                          | 309                        | 167  | 7.6                                       | 13.2                                      |
| W 310 x 67.0  | 67.0                          | 305                        | 204  | 8.5                                       | 14.6                                      |
| W 360 x 32.9  | 32.9                          | 349                        | 127  | 5.8                                       | 8.5                                       |
| W 360 x 39.0  | 39.0                          | 353                        | 128  | 6.5                                       | 10.7                                      |
| W 360 x 51.0  | 51.0                          | 355                        | 171  | 7.2                                       | 11.6                                      |
| W 360 x 64.0  | 64.0                          | 347                        | 203  | 7.7                                       | 13.5                                      |
| W 360 x 79.0  | 79.0                          | 354                        | 205  | 9.4                                       | 16.8                                      |
| W 410 x 38.8  | 38.8                          | 404                        | 140  | 6.4                                       | 8.8                                       |
| W 410 x 46.1  | 46.1                          | 403                        | 140  | 7.0                                       | 11.2                                      |
| W 410 x 60.0  | 60.0                          | 407                        | 178  | 7.7                                       | 12.8                                      |

TABELA A.1 – Dimensões de perfis W.

| <b>Perfil</b> | <b>Peso Linear</b><br>(kg/m) | <b>Altura (h)</b><br>(mm) | <b>Larg. Mesa (b<sub>f</sub>)</b><br>(mm) | <b>Esp. Alma (t<sub>w</sub>)</b><br>(mm) | <b>Esp. Mesa (t<sub>f</sub>)</b><br>(mm) |
|---------------|------------------------------|---------------------------|---|--|--|
| W 410 x 75.0  | 75.0                         | 413                       | 180                                       | 9.7                                      | 16.0                                     |
| W 460 x 52.0  | 52.0                         | 450                       | 152                                       | 7.6                                      | 10.8                                     |
| W 460 x 68.0  | 68.0                         | 459                       | 154                                       | 9.1                                      | 15.4                                     |
| W 460 x 82.0  | 82.0                         | 460                       | 191                                       | 9.9                                      | 16.0                                     |
| W 530 x 66.0  | 66.0                         | 525                       | 165                                       | 8.9                                      | 11.4                                     |
| W 530 x 74.0  | 74.0                         | 534                       | 166                                       | 9.7                                      | 13.6                                     |
| W 530 x 82.0  | 82.0                         | 528                       | 208                                       | 9.5                                      | 13.3                                     |
| W 530 x 101.0 | 101.0                        | 537                       | 210                                       | 10.9                                     | 17.4                                     |
| W 610 x 82.0  | 82.0                         | 599                       | 178                                       | 10.0                                     | 12.8                                     |
| W 610 x 101.0 | 101.0                        | 603                       | 228                                       | 10.5                                     | 14.9                                     |
| W 610 x 125.0 | 125.0                        | 612                       | 229                                       | 11.9                                     | 19.6                                     |

TABELA A.2 – Propriedades Físico-mecânicas da base de Materiais do aplicativo

| <b>Material/Eletrodo</b>           | <b>Tensão de Escoamento (MPa)</b> | <b>Tensão de Ruptura (MPa)</b> |
|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| <b>Aços Estruturais</b>            |                                   |                                |
| ASTM A36                           | 250                               | 400                            |
| MR250                              | 250                               | 400                            |
| AR350                              | 350                               | 450                            |
| ASTM A572 GR50                     | 345                               | 450                            |
| AR350COR                           | 350                               | 485                            |
| AR415COR                           | 415                               | 520                            |
| <b>Parafusos</b>                   |                                   |                                |
| ASTM A307                          | –                                 | 415                            |
| ASTM A325                          | 635                               | 830                            |
| ASTM A490                          | 895                               | 1040                           |
| <b>Metais de Solda (Eletrodos)</b> |                                   |                                |
| E60XX                              | –                                 | 414                            |
| E70XX                              | –                                 | 483                            |
| E80XX                              | –                                 | 552                            |

TABELA A.3 – Diâmetros comerciais de parafusos estruturais do tipo Bolt

| <b>d (pol)</b> | <b>d (pol)</b> | <b>d (pol)</b> |
|----------------|----------------|----------------|
| 1/4            | 7/8            | 1.3/8          |
| 1/2            | 1              | 1.1/2          |
| 5/8            | 1.1/8          | 1.3/4          |
| 3/4            | 1.1/4          | 2              |

TABELA A.4 – Dimensões padronizadas de cantoneiras Gerdau

| <b>Cantoneira</b> | <b>b (pol)</b> | <b>t (pol)</b> | <b>Cantoneira</b> | <b>b (pol)</b> | <b>t (pol)</b> |
|-------------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|
| L_1_2x1/8         | 1/2            | 1/8            | L_3x3/16          | 3              | 3/16           |
| L_5_8x1/8         | 5/8            | 1/8            | L_3x1/4           | 3              | 1/4            |
| L_3_4x1/8         | 3/4            | 1/8            | L_3x5/16          | 3              | 5/16           |
| L_7_8x1/8         | 7/8            | 1/8            | L_3x3/8           | 3              | 3/8            |
| L_1x1/8           | 1              | 1/8            | L_3x1/2           | 3              | 1/2            |
| L_1x3/16          | 1              | 3/16           | L_3_1/2x1/4       | 3.1/2          | 1/4            |
| L_1x1/4           | 1              | 1/4            | L_3_1/2x5/16      | 3.1/2          | 5/16           |
| L_1_1/4x1/8       | 1.1/4          | 1/8            | L_3_1/2x3/8       | 3.1/2          | 3/8            |
| L_1_1/4x3/16      | 1.1/4          | 3/16           | L_4x1/4           | 4              | 1/4            |
| L_1_1/4x1/4       | 1.1/4          | 1/4            | L_4x5/16          | 4              | 5/16           |
| L_1_1/2x1/8       | 1.1/2          | 1/8            | L_4x3/8           | 4              | 3/8            |
| L_1_1/2x3/16      | 1.1/2          | 3/16           | L_4x7/16          | 4              | 7/16           |
| L_1_1/2x1/4       | 1.1/2          | 1/4            | L_4x1/2           | 4              | 1/2            |
| L_1_3/4x1/8       | 1.3/4          | 1/8            | L_5x1/4           | 5              | 1/4            |
| L_1_3/4x3/16      | 1.3/4          | 3/16           | L_5x5/16          | 5              | 5/16           |
| L_1_3/4x1/4       | 1.3/4          | 1/4            | L_5x3/8           | 5              | 3/8            |
| L_2x1/8           | 2              | 1/8            | L_5x1/2           | 5              | 1/2            |
| L_2x3/16          | 2              | 3/16           | L_5x5/8           | 5              | 5/8            |
| L_2x1/4           | 2              | 1/4            | L_5x7/16          | 5              | 7/16           |
| L_2x5/16          | 2              | 5/16           | L_6x3/8           | 6              | 3/8            |
| L_2x3/8           | 2              | 3/8            | L_6x1/2           | 6              | 1/2            |
| L_2_1/2x3/16      | 2.1/2          | 3/16           | L_6x5/8           | 6              | 5/8            |
| L_2_1/2x1/4       | 2.1/2          | 1/4            | L_6x3/4           | 6              | 3/4            |
| L_2_1/2x5/16      | 2.1/2          | 5/16           | L_8x5/8           | 8              | 5/8            |
| L_2_1/2x3/8       | 2.1/2          | 3/8            | L_8x3/4           | 8              | 3/4            |

TABELA A.5 – Razão  $a/b$  e  $\eta$  para os diferentes tipos de vinculação

| <b>Vinculação A</b> |        | <b>Vinculação B</b> |        | <b>Vinculação C</b> |        |
|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|
| $a/b$               | $\eta$ | $a/b$               | $\eta$ | $a/b$               | $\eta$ |
| 1.00                | 0.31   | 0.25                | 0.02   | 0.50                | 0.36   |
| 1.20                | 0.38   | 0.50                | 0.08   | 0.67                | 0.45   |
| 1.40                | 0.44   | 0.75                | 0.17   | 1.00                | 0.67   |
| 1.60                | 0.47   | 1.00                | 0.32   | 1.50                | 0.77   |
| 1.80                | 0.49   | 1.50                | 0.73   | 2.00                | 0.79   |
| 2.00                | 0.52   | 2.00                | 1.20   | $\infty$            | 0.80   |
|                     |        | 3.00                | 2.10   |                     |        |
| <b>Vinculação D</b> |        | <b>Vinculação E</b> |        | <b>Vinculação F</b> |        |
| $a/b$               | $\eta$ | $a/b$               | $\eta$ | $a/b$               | $\eta$ |
| 0.25                | 0.05   | 1.00                | 0.29   | 0.125               | 0.05   |
| 0.50                | 0.19   | 1.20                | 0.38   | 0.250               | 0.19   |
| 0.75                | 0.39   | 1.40                | 0.45   | 0.375               | 0.40   |
| 1.00                | 0.67   | 1.60                | 0.52   | 0.500               | 0.63   |
| 1.50                | 1.28   | 1.80                | 0.57   | 0.750               | 1.25   |
| 2.00                | 1.80   | 2.00                | 0.61   | 1.000               | 1.80   |
| 3.00                | 2.50   | 3.00                | 0.71   |                     |        |

# Glossário

**Document:** A file created using LaTeX for presentation purposes.

**Glossary:** A list of terms and their definitions.

**LaTeX:** A document preparation system used for high-quality typesetting.

**Package:** An add-on feature in LaTeX to enhance its functionality.

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

|   |  |  |   |
|---|--|--|---|
| 1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO<br><p style="text-align: center;">TC</p>  | 2. DATA<br><p style="text-align: center;">10 de Novembro de 2025</p> | 3. DOCUMENTO Nº<br><p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-012/2025</p> | 4. Nº DE PÁGINAS<br><p style="text-align: center;">70</p> |
| 5. TÍTULO E SUBTÍTULO:<br>AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO DE LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE AÇO COM APLICAÇÕES NA ENGENHARIA CIVIL  |  |  |   |
| 6. AUTOR(ES):<br><b>Eduardo Bezerra Robalinho Dantas da Gama</b>  |  |  |   |
| 7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES):<br>Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA   |  |  |   |
| 8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR:<br>Estruturas de Aço; Ligações Metálicas; Automação de Projetos; Python; Engenharia Civil.  |  |  |   |
| 9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO:<br>Estruturas de aço; Ligas metálicas; Estruturas metálicas; Automação; Python (linguagem de programação); Engenharia civil.  |  |  |   |
| 10. APRESENTAÇÃO: <span style="float: right;"><b>(X) Nacional</b>    <input type="checkbox"/> Internacional</span><br>ITA, São José dos Campos. Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Prof. Igor Charlles Siqueira Leite. Publicado em 2025.   |  |  |   |
| 11. RESUMO:<br><p>                     O dimensionamento e o detalhamento de ligações em estruturas de aço constituem uma etapa crítica e dispendiosa do projeto executivo, cuja complexidade frequentemente exige o uso de softwares comerciais de alto custo. Esta dependência representa um desafio para escritórios de pequeno e médio porte e para organizações militares, como a Força Aérea Brasileira (FAB). Este trabalho apresenta o desenvolvimento da aplicação computacional STCAD (Structural Connections for CAD), que visa automatizar o cálculo e a geração de desenhos de ligações viga-pilar, em total conformidade com a norma brasileira ABNT NBR 8800. A ferramenta foi desenvolvida na linguagem Python, empregando a metodologia de programação orientada a objetos (POO) para modelar os componentes estruturais e utilizando bibliotecas para a construção da interface gráfica (GUI) e para a criação de arquivos de desenho nos formatos .dwg e .dxf. O software resultante possui uma interface intuitiva que permite ao usuário dimensionar seis diferentes tipologias de ligações rígidas e flexíveis, gerando como saída os parâmetros da ligação e uma sugestão de detalhamento. A validação dos resultados, realizada por meio de um exemplo da literatura técnica, demonstrou a precisão do motor de cálculo. O STCAD se consolida como uma solução funcional e economicamente acessível, contribuindo para a otimização de projetos de estruturas metálicas com aplicabilidade direta nas demandas da engenharia civil e da FAB.                 </p> |  |  |   |
| 12. GRAU DE SIGILO:<br><p style="text-align: center;"> <input checked="" type="checkbox"/> <b>OSTENSIVO</b>                                          <input type="checkbox"/> <b>RESERVADO</b>                                          <input type="checkbox"/> <b>SECRETO</b> </p>  |  |  |   |