

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DE DUAS LIGAÇÕES VIGA-PILAR EM ESTRUTURAS DE
AÇO

OSMANI LIMA SOARES JUNIOR

JUIZ DE FORA

2025

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DE DUAS LIGAÇÕES VIGA-PILAR EM ESTRUTURAS DE
AÇO

OSMANI LIMA SOARES JUNIOR

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal de
Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Estruturas Metálicas

Orientador: Prof. Wanderson Fernando Maia

Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia da UFJF

2025

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DE DUAS LIGAÇÕES VIGA-PILAR EM ESTRUTURAS DE
AÇO

OSMANI LIMA SOARES JUNIOR

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução Nº 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 01/07/2025

Por:

Documento assinado digitalmente
 WANDERSON FERNANDO MAIA
Data: 10/07/2025 16:07:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Wanderson Fernando Maia, D.Sc (Orientador)

Universidade Federal de Juiz de Fora/Departamento de Estruturas

Documento assinado digitalmente
 MARIA AVILA BRANQUINHO
Data: 10/07/2025 09:48:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Maria Ávila Branquinho, D.Sc

Universidade Federal de Juiz de Fora/Departamento de Construção Civil

Documento assinado digitalmente
 RODOLFO DE AZEVEDO PALHARES
Data: 10/07/2025 13:51:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Rodolfo de Azevedo Palhares, D.Sc

Universidade Federal de Juiz de Fora/Departamento de Estruturas

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus, que me deu a energia e sabedoria para concluir essa etapa da minha vida. É a Ele que reservo minhas orações diárias, quem me suportou nos momentos difíceis e me possibilitou concluir essa tão sonhada graduação em Engenharia Civil.

Gostaria de agradecer também à minha esposa, Catarina, que esteve comigo desde antes do início da graduação. Durante esse tempo fomos namorados, noivos e atualmente estamos casados. Ela foi minha fonte de energia e minha fortaleza, me deu suporte nos momentos difíceis e esteve comigo na comemoração das conquistas. Sem seu suporte, apoio e também suas cobranças, não sei se teria concluído essa etapa.

Gostaria de agradecer à minha mãe, Sebastiana, e meu irmão, Pedro Henrique, ambos que também me serviram de apoio e suporte, me aconselhando e me acolhendo, quando necessário. Sei que posso não demonstrar toda minha gratidão a todos os momentos, mas tudo que fizeram para poder me auxiliar está guardado em minhas lembranças e me servem de energia para continuar essa jornada.

Gostaria de agradecer aos familiares e amigos, que estiveram presentes, nem sempre fui tão aberto para expor todas as batalhas que passei, mas mesmo sem estarem cientes, me auxiliaram, seja com um conselho, uma conversa e ou algum momento de descontração que me ajudou a tirar um pouco o peso de tudo que aconteceu até concluir essa etapa.

Também quero agradecer aos amigos que fiz durante essa jornada na UFJF, tivemos vários momentos complicados em que nos apoiamos e seguimos juntos, seja durante as aulas ou após elas, nas noites de estudo para as provas, nos trabalhos em grupo, tudo isso me deu muita força e vontade para continuar.

Também quero agradecer aos professores por todo suporte que me deram nesse período, sempre disponíveis nos momentos de dúvidas e apoiando a formação de um novo colega profissional.

Quando relembro dos momentos, vem em mente as noites em claro estudando, as inúmeras aulas, os trabalhos em grupo, os trabalhos práticos, tudo isso serviu para moldar nossa dedicação e nos tornar pessoas melhores, profissionais capacitados. Em alguns momentos essa dedicação falhou, mas mesmo assim continuei e segui em frente e estou agora concluindo mais essa etapa.

“Os cientistas descobrem o mundo que existe,
Os engenheiros criam o mundo que jamais existiu.”

Theodore von Karman

RESUMO

Em razão da demanda crescente de estruturas em aço, o presente estudo visou ao desenvolvimento computacional de uma ferramenta de cálculo, segundo a recém revisada ABNT NBR 8800:2024, para dimensionamento das ligações flexíveis e rígidas entre viga e pilar. O correto dimensionamento das ligações é essencial para garantir a estabilidade, durabilidade e resistência das estruturas. Tendo em vista que o processo manual de cálculo é suscetível a erros, visou-se desenvolver uma ferramenta de cálculo confiável, eficiente e econômica utilizando linguagem de programação Python. A ferramenta proposta calcula a ligação escolhida e apresenta o memorial de cálculo com todos os parâmetros do dimensionamento, bem como, a plotagem das ligações. Além do cálculo com os parâmetros iniciais, o programa também altera os componentes e recalcula a ligação, caso não atenda aos estados limites de serviço e último, apresentando a opção mais viável ao usuário. Após a execução, o código cria arquivos com os resultados, renomeando os arquivos de acordo com as características selecionadas, de tipo de ligação, perfil e carregamentos. A ferramenta desenvolvida para o cálculo de ligações viga-pilar, tanto rígidas quanto flexíveis, apresentou resultados altamente satisfatórios quando comparados com os cálculos manuais, mostrando-se confiável e precisa. A precisão dos cálculos, corroborada pelos exemplos testados, valida o uso dessa aplicação em projetos estruturais, permitindo a redução do tempo gasto em cálculos repetitivos e, ao mesmo tempo, garantindo a conformidade com a ABNT NBR 8800:2024. A ferramenta visa a um dimensionamento utilizando o menor custo, possibilitando ao usuário informar dados de entrada relacionados aos elementos estruturais, visando também à otimização dos recursos disponíveis na obra. Uma das maiores vantagens da ferramenta é a capacidade de realizar múltiplas iterações em frações de segundo, ajustando variáveis como o número de parafusos, espessura das soldas e perfis de aço conforme os critérios normativos. Isso evita o trabalho manual repetitivo que, além de consumir tempo, pode gerar erros humanos.

Palavras-chave: Estruturas em Aço; Ligação Viga-Pilar Flexível; Ligação Viga-Pilar Rígida; Python; Dimensionamento.

ABSTRACT

Due to the growing demand for steel structures, this study aimed to develop a computational calculation tool, according to the recently revised ABNT NBR 8800:2024 standard, for design flexible and rigid connections between beams and columns. The correct design of connections is essential to ensure the stability, durability, and strength of structures. Considering that the manual calculation process is susceptible to errors, the aim was to develop a reliable, efficient, and economical calculation tool using the Python programming language. The proposed tool calculates the chosen connection and presents the calculation report with all the design parameters, as well as the plotting of the connections. In addition to the calculation with the initial parameters, the program also recalculates the connection by changing the components if it does not meet the service and ultimate limit states, presenting the most viable option to the user. After execution, the code creates files with the results, renaming the files according to the selected characteristics, such as connection type, profile, and loads. The tool developed for calculating both rigid and flexible beam-column connections presented highly satisfactory results when compared to manual calculations, proving to be reliable and accurate. The accuracy of the calculations, corroborated by the examples tested, validates the use of this application in structural projects, allowing for a reduction in the time spent on repetitive calculations and, at the same time, ensuring compliance with ABNT NBR 8800:2024. The tool aims at design using the lowest cost, allowing the user to enter data related to structural elements, also aiming at optimizing the resources available on the job site. One of the biggest advantages of the tool is the ability to perform multiple iterations in fractions of a second, adjusting variables such as the number of bolts, weld thickness, and steel profiles according to design standards. This eliminates repetitive manual work, which, in addition to being time-consuming, can lead to human error.

Keywords: Steel Structures; Flexible Beam-Column Connection; Rigid Beam-Column Connection; Python; Design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplos de ligações.....	15
Figura 2 – Ligação Viga-Pilar Flexível.....	21
Figura 3 – Ligação Viga-Pilar Flexível.....	24
Figura 4 – Ligação Viga-Pilar Rígida.....	27
Figura 5 – Fluxograma Simplificado.....	32
Figura 6 – Fluxograma das Funções dos Dados de Entrada.....	33
Figura 7 – Fluxograma das Funções de Cálculo dos Parafusos.....	38
Figura 8 – Representação das variáveis.....	40
Figura 9 – Representação das variáveis.....	44
Figura 10 – Fluxograma da Função de Cálculo da Cantoneira.....	48
Figura 11 – Fluxograma das Funções de Cálculo da Solda.....	49
Figura 12 – Representação das variáveis.....	51
Figura 13 – Fluxograma da Verificação da Ligação Parafusada.....	54
Figura 14 – Fluxograma da Verificação da Ligação Soldada.....	56
Figura 15 – Fluxograma da Ligação Viga-Pilar Flexível.....	58
Figura 16 – Fluxograma das Funções dos Dados de Entrada.....	59
Figura 17 – Fluxograma das Funções de Cálculo dos Parafusos.....	60
Figura 18 – Representação das variáveis.....	61
Figura 19 – Representação da inércia da chapa e das contribuições de inércia dos parafusos.....	63
Figura 20 – Fluxograma da Função de Cálculo da Cantoneira.....	65
Figura 21 – Dimensões da chapa de ligação.....	66
Figura 22 – Modelo com parâmetros da chapa de ligação.....	66
Figura 23 – Fluxograma das Funções de Cálculo da Solda.....	69
Figura 24 – Demonstração das parcelas de inércia da solda.....	72
Figura 25 – Fluxograma da Verificação da Ligação Parafusada.....	74
Figura 26 – Fluxograma da Verificação da Ligação Soldada.....	76
Figura 27 – Fluxograma da Verificação da Chapa.....	77
Figura 28 – Fluxograma da Ligação Viga-Pilar Rígido.....	78
Figura 29 – Plotagem dos resultados.....	80
Figura 30 – Dados de entrada e opções da ligação viga-pilar flexível.....	80
Figura 31 – Resultados da ligação viga-pilar flexível.....	82
Figura 32 – Especificações selecionadas ou finais.....	83
Figura 33 – Verificação da ligação parafusada.....	83
Figura 34 – Verificação da ligação soldada.....	84
Figura 35 – Detalhes da ligação.....	84
Figura 36 – Dados de entrada da ligação viga-pilar rígida.....	85

Figura 37 – Resultados da ligação viga-pilar rígida.....	87
Figura 38 – Especificações selecionadas ou finais.....	87
Figura 39 – Verificação da ligação parafusada.....	88
Figura 40 – Verificação da ligação soldada.....	88
Figura 41 – Detalhes da ligação	88

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
ELU	Estado Limite Último
ELS	Estado Limite de Serviço
TIG	Tungsten Inert Gas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivo e Justificativa.....	16
1.2. Organização do trabalho.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Ligações Soldadas.....	18
2.1.1. Vantagens das Ligações Soldadas.....	18
2.1.2. Tipos de Soldagem.....	19
2.1.3. Normas e Diretrizes.....	19
2.2. Ligações Parafusadas.....	20
2.2.1. Vantagens das Ligações Parafusadas.....	20
2.2.2. Tipos de Parafusos e Aplicações.....	21
2.2.3. Normas e Diretrizes.....	21
2.3. Ligação Viga-Pilar Flexível.....	22
2.3.1. Características da Ligação Viga-Pilar Flexível.....	22
2.3.2. Métodos de Execução e Materiais.....	23
2.3.3. Vantagens e Desvantagens.....	23
2.4. Ligação Viga-Pilar Flexível com Cantoneiras.....	24
2.4.1. Dimensionamento e Análise.....	25
2.5. Ligação Viga-Pilar Rígida com Chapa de Topo.....	25
2.5.1. Características da Ligação Viga-Pilar Rígida.....	25
2.5.2. Métodos de Execução.....	26
2.5.3. Vantagens e Desvantagens.....	26
2.6. Ligação Viga-Pilar Rígida com Chapa de Topo Soldada.....	27
3. METODOLOGIA	29
3.1. Linguagem de Programação.....	29
3.2. Estrutura do Código.....	29
3.3. Bibliotecas Utilizadas.....	30
3.4. Validação da Ferramenta.....	31
3.5. Considerações Finais.....	31
3.6. Casos Estudados.....	31
4. DESENVOLVIMENTO	32
4.1. Ligação Viga-Pilar Flexível.....	32
4.1.1. Dados de Entrada.....	32
4.1.1.1. Selecionar Perfil.....	33
4.1.1.2. Selecionar Cantoneira.....	34
4.1.1.3. Selecionar Tipo de Parafuso.....	35

4.1.1.4.	Selecionar Diâmetro do Parafuso	36
4.1.1.5.	Selecionar Tipo de Eletrodo	36
4.1.1.6.	Selecionar Local de Fixação da Viga	37
4.1.2.	Funções de Cálculo dos Parafusos	38
4.1.2.1.	Cálculo da Quantidade de Parafusos	38
4.1.2.2.	Cálculo das Solicitações nos Parafusos	40
4.1.2.3.	Cálculo da Linha Neutra.....	42
4.1.2.4.	Cálculo da Posição dos Parafusos	43
4.1.2.5.	Cálculo da Inércia da Chapa Parafusada	44
4.1.2.6.	Cálculo das Resistências dos Parafusos	46
4.1.2.7.	Cálculo da Resistência da Chapa (Cantoneira)	47
4.1.3.	Funções de Cálculo da Cantoneira	48
4.1.3.1.	Cálculo dos Parâmetros da Cantoneira.....	48
4.1.4.	Funções de Cálculo da Solda	48
4.1.4.1.	Cálculo da Espessura da Solda	49
4.1.4.2.	Cálculo das Propriedades da Solda	50
4.1.4.3.	Cálculo das Tensões na Solda.....	52
4.1.4.4.	Cálculo da Resistência na Solda.....	53
4.1.5.	Verificação das ligações	54
4.1.5.1.	Verificação das Forças Aplicadas nos Parafusos	54
4.1.5.2.	Verificação das Forças Aplicadas na Solda	56
4.2.	Ligação Viga-Pilar Rígida.....	58
4.2.1.	Dados de Entrada	58
4.2.1.1.	Selecionar Chapa.....	59
4.2.2.	Funções de Cálculo dos Parafusos	60
4.2.2.1.	Cálculo da Área do Parafuso	60
4.2.2.2.	Cálculo da Posição dos Parafusos	61
4.2.2.3.	Cálculo da Linha Neutra.....	61
4.2.2.4.	Cálculo da Inércia da Chapa Parafusada	62
4.2.2.5.	Cálculo das Solicitações nos Parafusos	63
4.2.2.6.	Cálculo das Resistências dos Parafusos	64
4.2.2.7.	Função para verificar Espessuras e Distâncias.....	64
4.2.3.	Funções de Cálculo da Chapa	64
4.2.3.1.	Cálculo das Dimensões da Chapa	65
4.2.3.2.	Cálculo dos Parâmetros da Chapa	66
4.2.3.3.	Cálculo das Espessuras da Chapa.....	68
4.2.3.4.	Cálculo do Acréscimo de Carga por Efeito de Alavanca.....	68

4.2.4.	Funções de Cálculo da Solda	69
4.2.4.1.	Cálculo da Espessura da Solda	69
4.2.4.2.	Função para Calcular as Propriedades da Solda.....	70
4.2.4.3.	Cálculo das Tensões na Solda.....	72
4.2.4.4.	Cálculo da Resistência na Solda.....	73
4.2.5.	Verificação das ligações	74
4.2.5.1.	Verificação das Forças Aplicadas nos Parafusos	74
4.2.5.2.	Verificação das Forças Aplicadas na Solda	75
4.2.5.3.	Verificação da Espessura da Chapa.....	77
4.3.	Funções de Plotagem.....	79
5.	RESULTADOS	80
5.1.	Ligação Viga-Pilar Flexível – VS 350 x 42 ($V_d = 109\text{kN}$).....	80
5.2.	Ligação Viga-Pilar Rígida – VS 350 x 42 ($V_d = 89\text{kN}$ e $M_d = 112,9\text{kN.m}$).....	85
6.	CONCLUSÃO	89
6.1.	Características importantes da ferramenta	89
6.1.1.	Automação de processos repetitivos	89
6.1.2.	Comparação com cálculos manuais	89
6.1.3.	Flexibilidade e personalização	89
6.1.4.	Verificação simultânea de ligações soldadas e parafusadas	89
6.1.5.	Geração automática de memorial de cálculo.....	90
6.1.6.	Representação gráfica das ligações	90
6.2.	Destaques dos códigos	90
6.2.1.	Funções modulares.....	90
6.2.2.	Validação e ajustes automáticos	90
6.2.3.	Controle de iterações	90
6.2.4.	Limitações	90
6.3.	Vantagens em relação ao cálculo manual	91
6.3.1.	Economia de tempo	91
6.3.2.	Redução de erros humanos.....	91
6.3.3.	Eficiência econômica	91
6.4.	Considerações	91
6.5.	Sugestão para Trabalhos Futuros.....	91
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
	APÊNDICE A – LIGAÇÃO VIGA-PILAR FLEXÍVEL	93
	APÊNDICE B – LIGAÇÃO VIGA-PILAR RÍGIDA	98

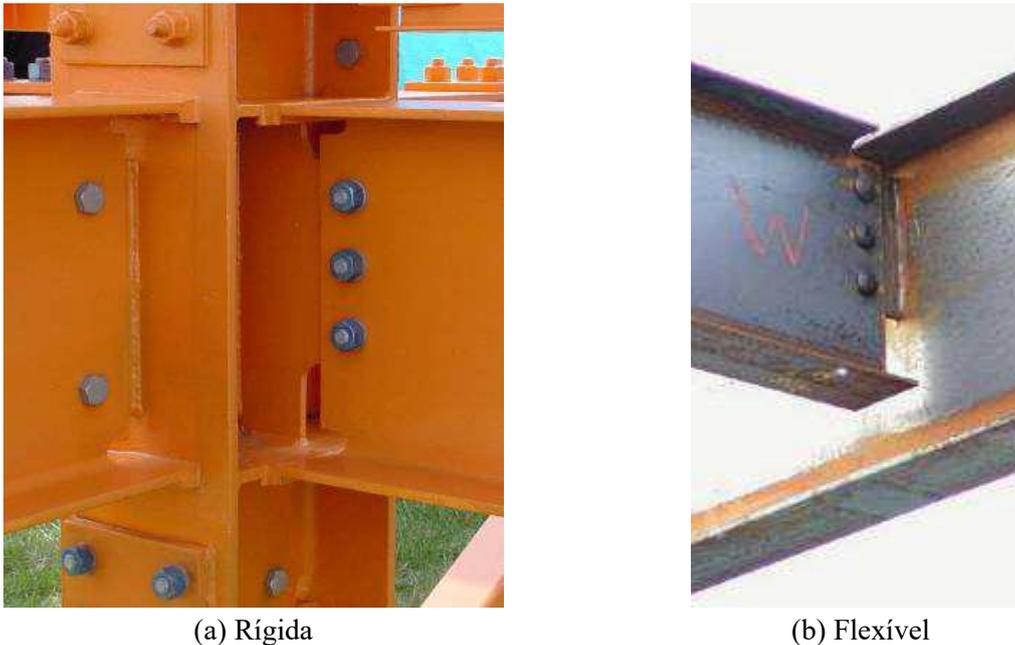
1. INTRODUÇÃO

As estruturas em aço desempenham um papel fundamental na Construção Civil moderna, sendo amplamente utilizadas em edificações de grande porte, como arranha-céus, pontes e estádios, além de outras obras que exigem alta resistência, leveza e rapidez na execução. O Brasil é um dos maiores consumidores de aço do mundo, refletindo a crescente importância desse material na Engenharia Estrutural. De acordo com o Instituto Aço Brasil, o consumo aparente de produtos siderúrgicos no país foi de 24,0 milhões de toneladas em 2023, com um consumo per capita de 111 quilos por habitante. Em 2024, o consumo aparente de aço continuou a crescer. No primeiro semestre, atingiu 12,4 milhões de toneladas, representando um aumento de 6,0% em relação ao mesmo período do ano anterior. Esses dados evidenciam a relevância do aço na indústria da Construção Civil brasileira, especialmente em projetos que demandam materiais de alta resistência e eficiência construtiva (Instituto Aço Brasil, 2024).

A utilização de estruturas em aço se destaca por sua versatilidade, permitindo diversas configurações arquitetônicas e soluções de Engenharia que se adaptam às necessidades específicas de cada projeto. Além disso, as estruturas em aço atendem a critérios de sustentabilidade devido à possibilidade de reciclagem do material, contribuindo para a redução do impacto ambiental.

Uma característica crucial para o desempenho adequado dessas estruturas é a correta transferência de cargas entre seus diversos elementos, como vigas, pilares e fundações. Esse processo é realizado por meio das ligações estruturais, que podem ser soldadas, parafusadas ou uma combinação de ambas. As ligações têm a função de garantir que os elementos conectados trabalhem de maneira conjunta, permitindo que as solicitações atuantes, como momentos fletores, esforços normal e cortante, sejam transferidas de forma eficiente e segura. Nesse contexto, as ligações são responsáveis por assegurar que as forças externas e internas atuem de maneira harmoniosa, evitando falhas que possam comprometer a integridade da estrutura. A Figura 1 mostra exemplos de ligações rígida e flexível em estruturas em aço.

Figura 1 – Exemplos de ligações



Fonte: Murray e Sumner (2006)

O dimensionamento de ligações em estruturas de aço é um processo importante para o sucesso do projeto. De acordo com a ABNT NBR 8800:2024, o dimensionamento adequado das ligações deve considerar o tipo de carregamento e a transferência de esforços entre os elementos, garantindo que a estrutura atenda aos Estados Limites de Serviço e Último. Além disso, a correta execução e dimensionamento das ligações são fundamentais para garantir a durabilidade e a resistência das estruturas de aço ao longo do tempo.

As ligações podem ser classificadas como rígidas, nas quais há transferência de momento fletor e a rotação relativa entre os elementos é nula ou muito pequena; ou flexíveis, onde não há transmissão de momento fletor e ocorre rotação relativa entre os elementos conectados. Contudo, o cálculo manual dessas ligações é um processo complexo, que demanda não apenas conhecimento técnico, mas também experiência prática. Muitas vezes, os projetistas enfrentam a necessidade de recalcular diversas vezes até que o dimensionamento atenda às exigências normativas, o que pode ser frustrante e consumir um tempo valioso.

Esse processo de dimensionamento manual é também suscetível a erros. Estudos realizados mostram que essa abordagem tradicional pode levar a erros significativos, impactando tanto a eficiência quanto a economia dos projetos (XEREZ NETO; CUNHA, 2020). Além disso, as iterações necessárias para ajustar o dimensionamento às resistências exigidas podem resultar em superdimensionamento, elevando os custos da obra, ou subdimensionamento, comprometendo a segurança estrutural.

1.1. Objetivo e Justificativa

Diante dessa realidade, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo automatizada utilizando a linguagem Python, com o objetivo de otimizar o dimensionamento de ligações estruturais viga-pilar em aço. A proposta visa fornecer ao Engenheiro uma ferramenta prática e precisa que possibilite a análise de ligações viga-pilar, considerando tanto ligações rígidas quanto flexíveis. A ferramenta é capaz de realizar o dimensionamento de ligações rígidas e flexíveis, utilizando cálculos para ligações soldadas e parafusadas, permitindo ao Engenheiro escolher a melhor opção dos parâmetros de dimensionamento com base nas necessidades de projeto e nos custos envolvidos. O Engenheiro irá incluir os dados iniciais dos elementos construtivos, como diâmetro do parafuso, tipo de parafuso e tipo de solda, a ferramenta irá validar a escolha e caso não atenda as tensões solicitantes, irá recalcular e apresentar a melhor opção válida.

A importância do desenvolvimento desta ferramenta reside na agilidade e precisão que ela proporcionará aos Engenheiros Estruturais. O processo de cálculo automatizado elimina a necessidade de iterações manuais e repetitivas, reduzindo o risco de erro humano. Além disso, uma das maiores vantagens da utilização de cálculo automatizado no dimensionamento de estruturas é a possibilidade de realizar várias análises em curto espaço de tempo, o que permite a escolha das soluções mais eficientes e econômicas (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008). Essa eficiência pode resultar em uma significativa redução do tempo de projeto e, conseqüentemente, em uma economia nos custos totais da obra.

Outro ponto a ser considerado é que os programas de cálculo estrutural disponíveis no mercado, embora eficientes, muitas vezes possuem alto custo e nem sempre oferecem a flexibilidade desejada para a personalização de parâmetros de segurança e resistência. Ferramentas como a desenvolvida neste trabalho podem preencher essa lacuna ao disponibilizar uma solução de cálculo de baixo custo, acessível e facilmente ajustável, permitindo que o Engenheiro personalize os parâmetros de acordo com as especificidades de cada projeto.

Este estudo, portanto, visa demonstrar como a programação em Python pode ser utilizada de maneira eficaz para o desenvolvimento de ferramentas que otimizem o processo de cálculo estrutural, contribuindo para a redução de custos e maior confiabilidade no dimensionamento de ligações em estruturas de aço. Ao final, espera-se que a ferramenta desenvolvida permita o dimensionamento ágil e preciso de ligações, constituindo-se como uma alternativa viável e acessível em comparação aos programas disponíveis comercialmente.

1.2. Organização do trabalho

O Capítulo 1, Introdução, apresenta uma introdução ao problema que será tratado no presente trabalho, a importância e finalidade das estruturas em aço, o objetivo e justificativa para a escolha do tema abordado.

O Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, fornece a base teórica sobre os tipos de ligações estruturais, abordando os métodos soldados e parafusados, bem como as particularidades de ligações flexíveis e rígidas, suas vantagens, desvantagens, normas e diretrizes.

O Capítulo 3, Metodologia, descreve a abordagem adotada no trabalho, detalhando a linguagem de programação, a estrutura do código, as bibliotecas utilizadas, os parâmetros de entrada, o processo de execução dos cálculos e a validação da ferramenta desenvolvida.

O Capítulo 4, Desenvolvimento, detalha a aplicação prática da metodologia para a análise das ligações estruturais. Nesta parte, são levados em conta os dados de entrada e os cálculos específicos para as ligações flexíveis e rígidas, incluindo funções para o cálculo dos parafusos, da solda, da cantoneira e as verificações dos componentes.

O Capítulo 5, Resultados, apresenta os resultados obtidos nas análises das ligações estruturais, com exemplos práticos que ilustram as configurações estudadas (tanto para as ligações flexíveis quanto para as rígidas).

O Capítulo 6, Conclusão, resume os principais achados do estudo e destaca as contribuições e implicações práticas dos resultados obtidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As ligações em estruturas em aço são elementos fundamentais que garantem a transferência de esforços entre os componentes estruturais, como vigas, pilares e lajes. Essas ligações podem ser classificadas em dois tipos principais: ligações rígidas e flexíveis (ABNT NBR 8800:2024). Cada tipo de ligação apresenta características específicas que influenciam o comportamento estrutural, a execução da obra e os custos envolvidos. Quanto aos dispositivos de ligação, podem ser utilizados soldas e parafusos.

2.1. Ligações Soldadas

As ligações soldadas são uma das técnicas mais utilizadas na construção de estruturas em aço, sendo essenciais para a formação de um conjunto estrutural coeso e eficiente. A soldagem permite a união de diferentes elementos, como vigas e pilares, de forma contínua e homogênea, o que contribui significativamente para a resistência e rigidez da estrutura. Essa técnica é amplamente empregada em diversas aplicações, desde edifícios de múltiplos andares até pontes e estruturas industriais, devido às suas vantagens em termos de desempenho mecânico e estética.

2.1.1. Vantagens das Ligações Soldadas

Uma das principais vantagens das ligações soldadas é a capacidade de transferir não apenas forças axiais e de cisalhamento, mas também momentos fletores entre os elementos conectados. Isso é crucial em estruturas que necessitam de alta rigidez, pois as ligações soldadas minimizam a flexibilidade da conexão, garantindo que os esforços sejam dissipados de maneira eficiente ao longo da estrutura (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008). Além disso, muitas vezes, as soldas eliminam a necessidade de peças complementares, como chapas de ligação, reduzindo o peso total da estrutura e aumentando a eficiência do projeto (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008).

Outra vantagem significativa é a continuidade da seção transversal dos elementos, que resulta em uma distribuição mais uniforme das tensões e minimiza o risco de falhas locais (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008). As ligações soldadas também podem ser projetadas para suportar condições severas, como esforços dinâmicos e térmicos, proporcionando uma solução robusta para ambientes desafiadores. O uso de soldagem pode levar a uma redução no tempo de montagem, uma vez que permite que os elementos sejam conectados rapidamente em campo (XEREZ NETO; CUNHA, 2020).

2.1.2. Tipos de Soldagem

Existem diversos processos de soldagem utilizados em ligações estruturais, sendo os mais comuns a soldagem a arco (incluindo solda a arco protegido e solda TIG (Tungsten Inert Gas)) e a soldagem por resistência. Cada método tem suas características, vantagens e limitações, que devem ser consideradas na escolha do processo adequado para cada aplicação.

- **Soldagem a arco:** É um dos métodos mais utilizados na construção de estruturas em aço. O processo envolve a utilização de um eletrodo que gera um arco elétrico, fundindo o material base e o eletrodo para criar uma ligação resistente. A solda a arco pode ser realizada em diferentes posições e em diversos tipos de materiais, o que a torna uma escolha versátil para a indústria da Construção Civil (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008).
- **Soldagem TIG (Tungsten Inert Gas):** É um processo que utiliza um eletrodo de tungstênio não consumível e um gás inerte para proteger a solda da contaminação atmosférica. Esse método é ideal para soldas de alta qualidade, especialmente em aço inoxidável e alumínio, onde a estética e a resistência são cruciais (XEREZ NETO; CUNHA, 2020).
- **Soldagem por resistência:** Este método é amplamente utilizado na fabricação de componentes estruturais, onde as peças são unidas por meio da aplicação de pressão e calor gerados pela passagem de corrente elétrica. A soldagem por resistência é rápida e eficiente, sendo particularmente útil em aplicações que exigem grande produtividade (ABNT NBR 8800:2024).

2.1.3. Normas e Diretrizes

O dimensionamento das ligações soldadas deve seguir normas e diretrizes específicas para garantir a segurança e a eficiência da estrutura. A ABNT NBR 8800:2024 estabelece critérios para o projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto, incluindo os aspectos relativos ao dimensionamento das soldas. Essa norma aborda as exigências de resistência, controle de qualidade e segurança que devem ser consideradas durante o processo de soldagem.

É fundamental que as soldas sejam executadas por profissionais qualificados e que sejam realizadas inspeções rigorosas para garantir a qualidade da união. A falta de atenção a esses detalhes pode resultar em falhas estruturais que comprometem a segurança e a durabilidade da edificação (XEREZ NETO; CUNHA, 2020).

Em suma, as ligações soldadas desempenham um papel crucial na construção de estruturas em aço, oferecendo uma solução eficiente e robusta para a transferência de esforços. A escolha adequada do tipo de solda e a conformidade com as normas técnicas são essenciais para garantir a segurança e a eficácia das ligações. Com o avanço da tecnologia e das técnicas de soldagem, espera-se que a utilização de ligações soldadas continue a se expandir, proporcionando novas oportunidades para a inovação na Engenharia Estrutural.

2.2. Ligações Parafusadas

As ligações parafusadas são uma das principais formas de conectar elementos estruturais em construções em aço. Essa técnica é amplamente utilizada em diversos tipos de estruturas, como edifícios, pontes e torres, devido à sua versatilidade e facilidade de montagem. As ligações parafusadas oferecem uma alternativa viável às ligações soldadas, especialmente em situações em que a montagem e desmontagem das estruturas são necessárias.

2.2.1. Vantagens das Ligações Parafusadas

Uma das principais vantagens das ligações parafusadas é a possibilidade de realizar ajustes durante a montagem, o que pode ser crucial em locais de difícil acesso ou em obras que exigem modificações frequentes. Essa flexibilidade permite que os Engenheiros ajustem a posição dos elementos conectados, melhorando a precisão da montagem (XEREZ NETO; CUNHA, 2020). Além disso, a utilização de parafusos de alta resistência garante uma conexão robusta que pode suportar cargas significativas (XEREZ NETO; CUNHA, 2020).

As ligações parafusadas também facilitam a manutenção e a reparação das estruturas. Quando um elemento estrutural se torna danificado ou desgastado, ele pode ser facilmente substituído sem a necessidade de retrabalhar a estrutura como um todo. Isso é especialmente vantajoso em estruturas temporárias ou em ambientes industriais, onde a durabilidade e a facilidade de acesso são essenciais.

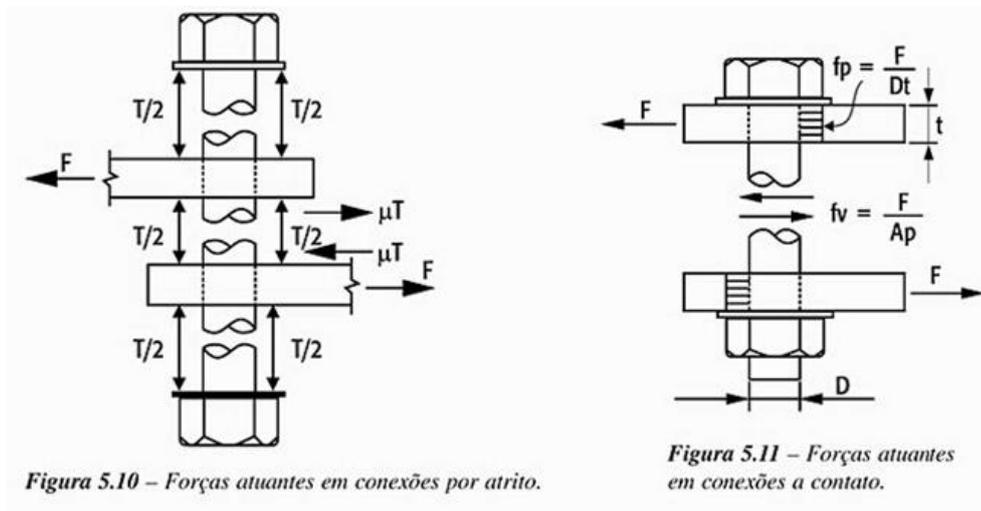
Outra característica importante das ligações parafusadas é a redução no tempo de montagem. A instalação de parafusos pode ser realizada de forma rápida e eficiente, o que contribui para a diminuição do tempo de construção e, conseqüentemente, para a redução dos custos da obra (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008). Essa agilidade torna as ligações parafusadas uma opção atraente para projetos de grande escala que exigem uma execução rápida.

2.2.2. Tipos de Parafusos e Aplicações

Os tipos de parafusos utilizados nas ligações estruturais podem variar, sendo os mais comuns os parafusos de alta resistência. Esses parafusos são projetados para suportar cargas elevadas e são utilizados em situações onde a segurança é uma prioridade. Além disso, os parafusos de alta resistência são amplamente utilizados em ligações por atrito, onde a força é transmitida por meio do contato entre as superfícies conectadas, garantindo maior eficiência na resistência a forças cortantes (ABNT NBR 8800:2024). Por outro lado, os parafusos comuns são utilizados em ligações por contato direto (cisalhamento), onde as forças são suportadas diretamente pelos corpos dos parafusos (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008).

As ligações parafusadas podem ser classificadas em dois tipos principais: ligações por atrito e ligações por contato (ABNT NBR 8800:2024). Nas ligações por atrito, a resistência é proporcionada pela protensão dos parafusos, enquanto nas ligações por contato, a resistência é proporcionada pela força de cisalhamento nos parafusos. Essa classificação é importante para determinar o método de dimensionamento e os critérios de projeto a serem utilizados (ABNT NBR 8800:2024).

Figura 2 – Ligação Viga-Pilar Flexível



Fonte: Bellei, Pinho e Pinho (2008)

2.2.3. Normas e Diretrizes

O dimensionamento das ligações parafusadas deve seguir normas e diretrizes específicas para garantir a segurança e a eficiência da estrutura. A ABNT NBR 8800:2024 estabelece critérios para o projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto, incluindo as exigências relacionadas ao dimensionamento de ligações parafusadas. Essa norma

aborda as propriedades dos materiais, os métodos de cálculo e os requisitos de resistência que devem ser considerados durante o processo de projeto e execução.

É fundamental que as ligações parafusadas sejam instaladas corretamente, com atenção especial à escolha dos parafusos, ao aperto adequado e à qualidade dos materiais. A inspeção regular dessas ligações é crucial para garantir a segurança e a durabilidade da estrutura. A falta de atenção a esses detalhes pode levar a falhas na conexão, comprometendo a integridade da estrutura ao longo do tempo (XEREZ NETO; CUNHA, 2020).

Em resumo, as ligações parafusadas desempenham um papel importante na construção de estruturas em aço, oferecendo uma solução prática e eficiente para a conexão de elementos estruturais. A escolha adequada do tipo de parafuso e a conformidade com as normas técnicas são essenciais para garantir a segurança e a eficácia das ligações. Com o avanço das tecnologias de fabricação e montagem, espera-se que a utilização de ligações parafusadas continue a se expandir, proporcionando novas oportunidades para a inovação na engenharia estrutural.

2.3. Ligação Viga-Pilar Flexível

A ligação viga-pilar flexível é um elemento fundamental no projeto de estruturas em aço, permitindo a conexão entre vigas e pilares enquanto possibilita um certo grau de movimento relativo. Essa configuração é especialmente relevante em situações onde a estrutura precisa acomodar deformações e deslocamentos, como aqueles causados por variações térmicas, vibrações e cargas dinâmicas. A flexibilidade da ligação viga-pilar pode ser essencial para garantir a estabilidade e a integridade da estrutura ao longo do tempo, especialmente em áreas sujeitas a eventos sísmicos (ABNT NBR 8800:2024).

2.3.1. Características da Ligação Viga-Pilar Flexível

A principal característica da ligação viga-pilar flexível é a capacidade de permitir uma rotação relativa entre os elementos conectados, sem que haja movimento translacional independente entre eles. Isso significa que a ligação não transfere completamente os momentos fletores entre a viga e o pilar, permitindo que a estrutura absorva movimentos sem comprometer sua integridade. Esse comportamento é crítico em regiões sujeitas a forças dinâmicas, onde as cargas podem variar significativamente ao longo do tempo (ABNT NBR 8800:2024).

A flexibilidade nas ligações viga-pilar também contribui para uma distribuição mais uniforme das tensões ao longo dos elementos estruturais, minimizando o risco de falhas locais.

Esse tipo de ligação pode ser projetado para acomodar deslocamentos causados por fatores como mudanças de temperatura, vibrações e movimentos do solo (ABNT NBR 8800:2024). A análise adequada do comportamento dessa ligação sob diferentes condições de carga é crucial para garantir a segurança e a eficácia da estrutura.

2.3.2. Métodos de Execução e Materiais

As ligações viga-pilar flexíveis podem ser executadas por meio de soldagem ou parafusamento, dependendo das especificidades do projeto. No caso das soldagens, o uso de soldas de filete é comum, onde a solda é aplicada nas bordas das peças conectadas, permitindo um suporte flexível que facilita o movimento. É fundamental garantir que a solda seja executada de forma adequada, pois a qualidade da união tem um impacto direto na resistência da ligação.

Para ligações parafusadas, o uso de parafusos de alta resistência é recomendado, pois eles proporcionam uma conexão robusta que pode suportar as cargas atuantes enquanto ainda permite alguma flexibilidade. O espaçamento e o número de parafusos utilizados devem ser cuidadosamente calculados para garantir que a ligação possa acomodar os movimentos sem falhas.

2.3.3. Vantagens e Desvantagens

As ligações viga-pilar flexíveis oferecem várias vantagens, incluindo a capacidade de acomodar deslocamentos e deformações sem comprometer a integridade da estrutura. Isso as torna ideais para aplicações em regiões propensas a sismos, onde a absorção de movimentos é essencial para a segurança da edificação. Além disso, a flexibilidade nas ligações pode resultar em uma distribuição mais equilibrada das tensões, reduzindo o risco de falhas concentradas (XEREZ NETO; CUNHA, 2020).

Por outro lado, uma desvantagem potencial das ligações flexíveis é que elas podem não ser adequadas para todas as aplicações, especialmente em estruturas que exigem alta rigidez. Em casos onde os momentos fletores devem ser rigidamente transferidos entre a viga e o pilar, as ligações rígidas podem ser mais apropriadas (ABNT NBR 8800:2024). Portanto, a escolha entre ligações flexíveis e rígidas deve ser feita com base em uma análise cuidadosa das necessidades específicas do projeto e das condições de carga.

2.4. Ligação Viga-Pilar Flexível com Cantoneiras

A ligação viga-pilar flexível, que utiliza cantoneiras, é uma solução comum e eficaz na construção de estruturas em aço. Essa abordagem permite a conexão de uma viga do tipo “I” a um pilar, garantindo flexibilidade e resistência adequadas para suportar as cargas e esforços atuantes na estrutura. As cantoneiras são perfis de seção em “L” que oferecem uma excelente combinação de resistência e leveza, tornando-as ideais para aplicações estruturais (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008). A Figura 3 mostra a ligação viga-pilar flexível com cantoneiras.

Figura 3 – Ligação Viga-Pilar Flexível



Fonte: Maia (2023)

Na configuração da ligação viga-pilar flexível, a conexão entre a viga e o pilar pode ser realizada por meio de diversos dispositivos, como cantoneiras de abas iguais, que é fixada ao pilar por meio de parafusos, enquanto a união com a viga é realizada por meio de soldagem. Podem ainda ser utilizadas cantoneiras de abas desiguais, chapas de extremidade ou outros elementos que permitam a transferência de esforços com rotação relativa controlada. Essa combinação de métodos de fixação oferece vantagens significativas, como a capacidade de absorver deslocamentos e deformações sem transferir completamente os momentos fletores para o pilar. Essa característica é crítica em regiões sujeitas a forças dinâmicas, onde as cargas podem variar significativamente ao longo do tempo (XEREZ NETO; CUNHA, 2020).

A utilização de cantoneiras de abas iguais é particularmente vantajosa, pois essas cantoneiras proporcionam uma distribuição uniforme das tensões ao longo da conexão, minimizando o risco de falhas locais. O projeto e o dimensionamento da ligação devem ser

cuidadosamente elaborados, levando em conta as propriedades mecânicas da cantoneira, os tipos de carregamento e as condições de serviço da estrutura (ABNT NBR 8800:2024).

2.4.1. Dimensionamento e Análise

O dimensionamento da ligação viga-pilar flexível deve considerar as solicitações atuantes, incluindo momentos fletores (gerados pela excentricidade da ligação), forças cortante e axial. A análise deve incluir uma avaliação detalhada do comportamento da ligação sob diferentes condições de carga, utilizando ferramentas de simulação e cálculos estruturais para prever o desempenho da ligação. Esse processo é essencial para garantir que a ligação atenda aos Estados Limites de Serviço e Último estabelecidos pela ABNT NBR 8800:2024.

A ligação viga-pilar flexível utilizando cantoneiras de abas iguais representa uma solução eficiente e prática na construção de estruturas em aço. Sua capacidade de acomodar deslocamentos e deformações, aliada a um dimensionamento adequado e à conformidade com normas técnicas, assegura que essa ligação desempenhe um papel crucial na segurança e durabilidade das edificações.

2.5. Ligação Viga-Pilar Rígida com Chapa de Topo

A ligação viga-pilar rígida é um elemento fundamental no projeto de estruturas em aço, sendo amplamente utilizada em edifícios de múltiplos andares e em obras que requerem alta resistência e rigidez. Esse tipo de ligação é projetado para transferir momentos fletores entre a viga e o pilar, garantindo que os esforços atuantes sejam distribuídos de forma eficaz e contribuindo para a estabilidade global da estrutura (ABNT NBR 8800:2024). A rigidez das ligações é essencial em situações onde a resistência à flexão e a capacidade de suportar cargas elevadas são prioritárias.

2.5.1. Características da Ligação Viga-Pilar Rígida

As ligações viga-pilar rígidas permitem que a viga e o pilar atuem como um único elemento estruturado, promovendo uma transferência eficiente de esforços. Essa configuração é caracterizada por um comportamento resistente que minimiza os deslocamentos laterais e os momentos fletores nos elementos conectados, resultando em uma estrutura mais estável e segura (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008). Em projetos de Engenharia, essa rigidez é vital para garantir que a estrutura não apenas suporte as cargas estáticas, mas também as forças dinâmicas, como as provenientes de vento e sismos.

Uma das principais vantagens das ligações rígidas é a sua capacidade de reduzir os deslocamentos em nós estruturais, o que é essencial em edifícios altos onde as deformações podem ser significativas. Além disso, as ligações rígidas são frequentemente utilizadas em situações onde a continuidade e a transferência de momentos são necessárias para garantir a integridade da estrutura durante sua vida útil (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008).

2.5.2. Métodos de Execução

As ligações viga-pilar rígidas podem ser executadas por meio de soldagem, parafusamento ou uma combinação de ambos. O método mais comum envolve o uso de soldas, que criam uma união robusta e contínua entre a viga e o pilar. A solda de topo ou solda em filete é frequentemente utilizada para garantir que a ligação possa suportar os esforços solicitantes. É essencial que a solda seja realizada por profissionais qualificados e que os procedimentos de soldagem sejam seguidos rigorosamente para evitar falhas, como trincas ou porosidade, que podem comprometer a resistência da ligação (XEREZ NETO; CUNHA, 2020).

Além da soldagem, as ligações rígidas também podem incluir elementos parafusados, especialmente em situações onde a flexibilidade de montagem é desejada. A combinação de solda e parafusos pode aumentar a resistência da ligação e proporcionar maior segurança. O dimensionamento e o espaçamento dos parafusos devem ser calculados para garantir que a ligação possa acomodar as forças e momentos atuantes de forma eficaz.

2.5.3. Vantagens e Desvantagens

As ligações viga-pilar rígidas apresentam várias vantagens, incluindo a alta capacidade de resistência a momentos fletores e a capacidade de reduzir os deslocamentos em nós críticos. Essa rigidez é essencial em estruturas sujeitas a cargas dinâmicas, proporcionando maior segurança e estabilidade. Além disso, a utilização de ligações rígidas pode simplificar o cálculo estrutural, pois a transferência de esforços é mais direta e previsível.

No entanto, uma desvantagem das ligações rígidas é que elas podem exigir um controle mais rigoroso da qualidade da execução, especialmente no que diz respeito às soldas. A manutenção e a inspeção dessas ligações são cruciais para garantir que a estrutura permaneça segura e funcional ao longo do tempo. Problemas de qualidade na solda podem levar a falhas significativas, comprometendo a integridade da estrutura (XEREZ NETO; CUNHA, 2020).

Em suma, a ligação viga-pilar rígida é uma solução crucial para garantir a estabilidade e a integridade das estruturas em aço. Sua capacidade de transferir momentos fletores e resistir

a forças dinâmicas, aliada a um dimensionamento adequado e à conformidade com normas técnicas, assegura que essa ligação desempenhe um papel fundamental na segurança e durabilidade das edificações. Com a crescente demanda por estruturas que resistam a eventos dinâmicos, a utilização de ligações rígidas continua a ser uma área de interesse e inovação na Engenharia Estrutural.

2.6. Ligação Viga-Pilar Rígida com Chapa de Topo Soldada

A ligação viga-pilar rígida utilizando uma chapa de topo, que é soldada à viga e parafusada ao pilar (Figura 4). Essa configuração é uma solução eficiente e robusta que proporciona a rigidez necessária para a transferência de momento fletor, esforços axial e cortante, garantindo a estabilidade da estrutura.

Figura 4 – Ligação Viga-Pilar Rígida



Fonte: Murray e Sumner (2006)

A ligação é composta por uma chapa de topo, que atua como um elemento de transição entre a viga e o pilar. A chapa é soldada na extremidade da viga, criando uma união sólida que permite a transferência eficiente dos esforços. A soldagem, realizada com técnicas adequadas, assegura a continuidade da seção transversal da viga, minimizando os pontos de concentração de tensões e aumentando a resistência da ligação.

A chapa de topo é parafusada ao pilar com uma quantidade variável de parafusos, dependendo das demandas do projeto. Geralmente, são utilizados arranjos como quatro, seis ou oito parafusos, distribuídos de forma a garantir a adequada transferência de esforços, considerando as solicitações aplicadas e as condições estruturais específicas (BELLEI; PINHO;

PINHO, 2008). Essa distribuição de parafusos é projetada para garantir que as forças atuantes sejam transferidas de maneira equilibrada, proporcionando uma conexão segura e resistente.

Uma das principais vantagens dessa configuração de ligação é a combinação de solda e parafusos, que oferece uma maior flexibilidade na montagem e uma facilidade de manutenção. Os parafusos permitem ajustes durante a instalação, enquanto a solda garante uma união robusta e permanente. Essa flexibilidade é particularmente importante em canteiros de obras onde as condições podem variar e onde ajustes podem ser necessários para assegurar a precisão da montagem.

A utilização dos parafusos na parte superior da chapa de topo, juntamente com os parafusos na parte inferior, proporciona uma distribuição eficaz das forças, minimizando a possibilidade de falhas locais. A configuração permite que a ligação suporte não apenas cargas estáticas, mas também dinâmicas, como aquelas que podem resultar de forças de vento ou atividades sísmicas (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008).

Em resumo, a ligação viga-pilar rígida com uma chapa de topo soldada na viga e parafusada no pilar representa uma solução eficaz e robusta para a conexão de elementos estruturais em projetos de Engenharia. Sua capacidade de transferir momentos fletores, combinada com a facilidade de montagem e manutenção, faz dessa configuração uma escolha ideal para estruturas que exigem alta resistência e estabilidade. Com um dimensionamento cuidadoso e a observância das normas técnicas, essa ligação pode contribuir significativamente para a segurança e a durabilidade das edificações.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada consistiu em desenvolver uma ferramenta confiável capaz de realizar cálculos estruturais necessários para dimensionar as ligações em estruturas de aço. A ferramenta foi projetada para avaliar tanto ligações viga-pilar flexível quanto rígida, levando em consideração uma variedade de parâmetros de entrada fornecidos pelo usuário. Além disso, busca-se oferecer um ambiente de fácil utilização que permita ao Engenheiro Estrutural otimizar suas escolhas de forma rápida e precisa, contribuindo para a eficiência do projeto.

3.1. Linguagem de Programação

A ferramenta foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação Python, sendo mais específico optou-se pelo uso do programa Spyder, que possui um layout agradável e intuitivo. Essa escolha se deu devido à sua popularidade atual e à simplicidade que oferece na criação de códigos, permitindo que Engenheiros e profissionais da área técnica possam implementar soluções rapidamente. Python é uma linguagem de alto nível que proporciona uma sintaxe clara e legível, o que facilita o processo de programação e a manutenção do código ao longo do tempo.

Além disso, Python possui uma vasta gama de bibliotecas que facilitam várias etapas na execução do código, tornando o desenvolvimento mais ágil e eficiente. Essa característica é especialmente importante em um contexto onde a flexibilidade e a adaptabilidade são fundamentais para atender às necessidades de projetos variados.

3.2. Estrutura do Código

O código está organizado em funções, permitindo uma manutenção mais fácil e um desempenho otimizado. Cada etapa do processo foi separada em funções distintas, proporcionando clareza e facilitando a identificação de problemas ou melhorias, como também facilitando em atualizações. Inicialmente, foram criadas funções para a coleta de dados do usuário, solicitando informações essenciais sobre os perfis de viga e pilar, o perfil da cantoneira ou chapa de ligação, e os elementos de ligação sugeridos pelo usuário, como tipo de parafuso, diâmetro e tipo de eletrodo de solda.

Após a coleta de dados, foram implementadas funções de cálculo. Cada função realiza cálculos específicos e retorna os valores necessários com base nos parâmetros de entrada

fornecidos. Uma função de verificação para cada tipo de ligação (flexível e rígida) foi desenvolvida para validar se os critérios de resistência e segurança foram atendidos. Se os requisitos não forem cumpridos, o programa itera para ajustar a quantidade de parafusos, diâmetro do parafuso, tipo de parafuso e verifica também a ligação soldada, ajustando a perna de solda, a espessura do filete ou o tipo de eletrodo. As variáveis são recalculadas antes de prosseguir para o próximo passo, e ao final, a ferramenta gera um memorial de cálculo, incluindo a plotagem das ligações, consolidando tudo em um arquivo PDF.

3.3. Bibliotecas Utilizadas

As seguintes bibliotecas foram utilizadas na implementação da ferramenta:

- **pandas**: para leitura de dados de perfis, parafusos, etc., a partir de uma base em Excel. Essa funcionalidade facilita a inclusão ou alteração de dados existentes, permitindo que o usuário mantenha informações atualizadas de forma prática e eficiente.
- **math**: para a execução de funções matemáticas que são necessárias durante os cálculos, como operações trigonométricas e manipulação de números.
- **matplotlib**: para a plotagem de gráficos e visualizações, permitindo uma representação gráfica clara dos resultados obtidos e facilitando a interpretação das ligações calculadas. Essa biblioteca inclui:
 - **matplotlib.pyplot**: utilizada para a criação de gráficos básicos e avançados, permitindo visualizações dinâmicas.
 - **matplotlib.patches**: usada para a criação de figuras complexas nas visualizações, proporcionando um entendimento mais intuitivo das ligações.
- **reportlab**: para a geração do PDF, permitindo a criação de documentos formatados que podem ser facilmente compartilhados e apresentados. Isso inclui:
 - **reportlab.lib.pagesizes**: para definir tamanhos de página adequados ao conteúdo.
 - **reportlab.pdfgen.canvas**: para a geração do arquivo PDF, possibilitando a inclusão de texto e gráficos.

- **reportlab.lib.units:** para a definição de unidades no PDF, assegurando que as medidas sejam apresentadas corretamente.
- **reportlab.lib.colors:** para o uso de cores na apresentação do PDF, tornando-o visualmente mais atraente.
- **PyPDF2:** para unir o PDF do memorial de cálculo com as imagens em um único arquivo. A biblioteca facilitou a manipulação de arquivos, garantindo que o processo de geração de documentos fosse eficiente e organizado.

3.4. Validação da Ferramenta

Para validar a precisão da ferramenta, foram utilizados exemplos práticos e exemplos da literatura. Essa validação é fundamental para garantir que a ferramenta forneça resultados confiáveis e coerentes com os métodos tradicionais de cálculo. A ferramenta é capaz de recalcular de acordo com os parâmetros fornecidos, permitindo a análise de várias combinações.

3.5. Considerações Finais

O processo de cálculo é iterativo. O programa recebe os dados iniciais do usuário, considerando que, na prática, o fornecimento do material em uma obra é feito em lote, e não por ligação específica. Por isso, solicita-se que o usuário informe o tipo de parafuso, diâmetro, eletrodo, cantoneira e chapa de ligação para os cálculos iniciais. Se todos os critérios forem atendidos, a ferramenta retornará a ligação dimensionada. Caso contrário, o programa continuará o processo de cálculo, alterando os tipos de materiais, diâmetros, comprimentos de solda, espessura do filete, entre outros, até que os critérios de carregamento sejam atendidos. Se não for possível atender, a ferramenta apresentará uma mensagem de erro informando que o dimensionamento não pode ser realizado, devido às limitações geométricas impostas pelos perfis selecionados.

3.6. Casos Estudados

No presente trabalho, foram estudados 2 casos, que serão abordados em 2 códigos:

- **Ligação Viga-Pilar Flexível:** Utilizando-se ligação soldada e parafusada.
- **Ligação Viga-Pilar Rígida:** Utilizando-se ligação soldada e parafusada.

4. DESENVOLVIMENTO

No presente capítulo iremos abordar o desenvolvimento do trabalho e uma explicação sobre as funções criadas que compõem os códigos da ligação viga-pilar flexível com cantoneiras e a ligação viga-pilar rígida com chapa de topo. A estrutura global dos códigos pode ser descrita conforme a Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma Simplificado



Fonte: Autor (2025)

Todos os processos de cálculo, equações e verificações apresentados no presente capítulo seguirão os processos definidos na ABNT NBR 8800:2024 para atendimento dos Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS).

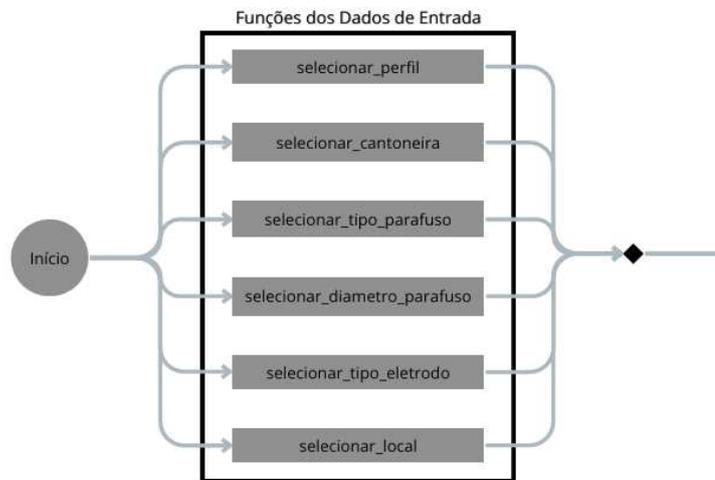
4.1. Ligação Viga-Pilar Flexível

O código da ligação viga-pilar flexível com cantoneiras irá abordar as funções de entrada, funções de cálculo, funções de verificação e funções de plotagem, detalhando todos os cálculos envolvidos, parâmetros obtidos ou calculados e verificações realizadas para um dimensionamento em acordo com a ABNT NBR 8800:2024.

4.1.1. Dados de Entrada

Os dados de entrada serão compostos pelos dados iniciais que são obtidos através da escolha do usuário. Cada perfil, parafuso ou eletrodo disponível para seleção estão presentes em uma planilha eletrônica, denominada “Dados”, juntamente com todos os parâmetros de cálculo e dimensão dos referidos itens. A Figura 6 apresenta a parcela do fluxograma referente às Funções dos Dados de Entrada.

Figura 6 – Fluxograma das Funções dos Dados de Entrada



Fonte: Autor (2025)

4.1.1.1. Selecionar Perfil

A função “selecionar_perfil” é responsável por permitir que o usuário selecione o perfil de aço a ser utilizado na ligação viga-pilar flexível. Essa função apresenta ao usuário uma interface simples, onde ele pode escolher entre diferentes tipos de perfis, como perfis VS, CS e CVS.

Após a seleção do tipo de perfil, a função verifica se a escolha está dentro dos parâmetros válidos. Se a opção for inválida, a função solicita novamente a escolha. Uma vez selecionado o tipo de perfil, a função exibe as opções de perfis disponíveis correspondentes a essa categoria. O usuário é então solicitado a escolher um perfil específico, que será utilizado na ligação.

Se o usuário selecionar um perfil válido, a função coleta as seguintes informações:

- **Perfil:** Nome do perfil selecionado.
- **Área (cm²):** Área da seção transversal do perfil, que é essencial para os cálculos de resistência.
- **Alturas do Perfil e da Alma (mm):** Altura do perfil e da alma, que influencia diretamente na capacidade de carga.
- **Espessuras da Alma e Mesas (mm):** Espessuras da alma (t_w) e mesas (t_f), que são importantes para a análise de esforços e a resistência ao cisalhamento.

- **Largura da Mesa (mm):** Largura da mesa (b_f), que é importante para a análise de esforços e a resistência ao momento fletor.

Caso o usuário insira um número inválido, a função exibe uma mensagem de erro e solicita uma nova seleção, chamando-se recursivamente.

A função retorna todos os dados coletados, que serão utilizados posteriormente nos cálculos para a verificação da ligação viga-pilar flexível.

4.1.1.2. Selecionar Cantoneira

A função “selecionar_cantoneira” é responsável por permitir que o usuário selecione a cantoneira de abas iguais a ser utilizada na ligação viga-pilar flexível. Essa escolha é crucial, pois a cantoneira desempenha um papel fundamental na conexão entre os elementos estruturais e na capacidade de carga da ligação. Para o presente estudo, considerou-se apenas as cantoneiras de abas iguais, afim de simplificar os cálculos que levam em conta as dimensões das abas.

A função inicia mostrando ao usuário uma lista de cantoneiras de abas iguais disponíveis. Essas opções são extraídas de um “DataFrame” que contém as cantoneiras disponíveis, facilitando a seleção. O usuário é solicitado a inserir o número correspondente à cantoneira desejada. A entrada é armazenada na variável escolha. Após a seleção, a função verifica se o número fornecido pelo usuário está dentro do intervalo válido.

Se a escolha for correta, a função coleta os dados da cantoneira selecionada a partir do “DataFrame” e retorna as seguintes informações:

- **Cantoneira:** Nome da cantoneira selecionada.
- **Largura da Abas (b):** A largura da aba da cantoneira em milímetros, que é importante para os cálculos de resistência.
- **Espessura da Cantoneira (t):** A espessura da cantoneira em milímetros, que também é relevante para a análise estrutural.

Caso o usuário insira um número inválido, a função exibe uma mensagem de erro e solicita uma nova seleção, chamando-se recursivamente.

A função retorna a cantoneira escolhida, juntamente com suas dimensões, que serão utilizadas posteriormente nos cálculos da ligação.

4.1.1.3. Selecionar Tipo de Parafuso

A função “selecionar_tipo_parafuso” é responsável por permitir que o usuário escolha o tipo de parafuso a ser utilizado na ligação viga-pilar flexível. A seleção correta do tipo de parafuso é essencial, pois ele impacta a resistência e a segurança da ligação.

A função começa filtrando as informações relevantes do “DataFrame parafusos_tipos”, que contém dados sobre os tipos de parafusos disponíveis, incluindo suas propriedades mecânicas, como limite de escoamento (f_{yb}) e limite de resistência (f_{ub}). A lista de tipos de parafusos é apresentada ao usuário, facilitando a seleção. O usuário é solicitado a inserir o número correspondente ao tipo de parafuso desejado. Essa entrada é armazenada na variável “escolha_tipo”.

A função verifica se o número fornecido pelo usuário está dentro do intervalo válido. Se a escolha for correta, a função coleta os dados do tipo de parafuso selecionado a partir do “DataFrame” e retorna as seguintes informações:

- **Tipo de Parafuso:** Nome do tipo de parafuso selecionado.
- **Tensão de Escoamento (f_{yb}):** O valor do limite de escoamento do parafuso, medido em MPa.
- **Tensão de Resistência Última (f_{ub}):** O valor do limite de resistência do parafuso, também medido em MPa.
- **Menor Diâmetro:** O menor diâmetro comercial disponível para o tipo de parafuso selecionado. Isso define as opções de diâmetros que podem ser escolhidos na etapa de seleção de diâmetro.
- **Maior Diâmetro:** O maior diâmetro comercial disponível para o tipo de parafuso selecionado. Assim como o menor diâmetro, isso delimita as opções de diâmetro que podem ser utilizadas.

Caso o usuário insira um número inválido, a função exibe uma mensagem de erro e solicita uma nova seleção, chamando-se recursivamente.

A função retorna o tipo de parafuso escolhido e suas propriedades, que serão utilizadas nos cálculos da ligação e o número da escolha, que será utilizado posteriormente na iteração de verificação das ligações.

4.1.1.4. Selecionar Diâmetro do Parafuso

A função “selecionar_diametro_parafuso” permite ao usuário escolher o diâmetro do parafuso a ser utilizado na ligação viga-pilar flexível, com base nos limites estabelecidos pelo tipo de parafuso previamente selecionado. Essa escolha é crucial para garantir que o diâmetro do parafuso se ajuste aos requisitos comerciais e estruturais da ligação.

A função começa mostrando ao usuário uma lista de diâmetros disponíveis para o parafuso, que são extraídos do “DataFrame parafusos_dimensoes”. Este “DataFrame” contém os diâmetros comerciais dos parafusos. Após isso filtra os diâmetros disponíveis com base nos limites fornecidos (menor e maior diâmetro), utilizando o método `between()` do pandas. Isso garante que apenas os diâmetros que atendem às especificações do tipo de parafuso selecionado sejam apresentados. O usuário é solicitado a inserir o número correspondente ao diâmetro desejado. Essa entrada é armazenada na variável “escolha_diametro”.

A função verifica se o número fornecido pelo usuário está dentro do intervalo válido. Se a escolha for correta, a função coleta o diâmetro selecionado a partir do “DataFrame” filtrado e o retorna junto com o número da escolha.

Caso o usuário insira um número inválido, a função exibe uma mensagem de erro e solicita uma nova seleção, chamando-se recursivamente.

A função retorna o diâmetro do parafuso (d_b) escolhido, que será utilizado nos cálculos da ligação e o número da escolha, que será utilizado posteriormente na iteração de verificação das ligações.

4.1.1.5. Selecionar Tipo de Eletrodo

A função “selecionar_tipo_eletrodo” permite ao usuário escolher o tipo de eletrodo a ser utilizado na soldagem da ligação viga-pilar flexível. A seleção correta do eletrodo é essencial, pois ele influencia a qualidade da solda e, conseqüentemente, a resistência da ligação.

A função começa filtrando as informações relevantes do “DataFrame soldas_eletrodos”, que contém dados sobre os tipos de eletrodos disponíveis, incluindo suas propriedades mecânicas, como a resistência à tração (f_w) em diferentes unidades (ksi e MPa). A lista de

eletrodos é apresentada ao usuário, facilitando a seleção. O usuário é solicitado a inserir o número correspondente ao eletrodo desejado. Essa entrada é armazenada na variável “escolha_eletrodo”.

A função verifica se o número fornecido pelo usuário está dentro do intervalo válido. Se a escolha for correta, a função coleta os dados do eletrodo selecionado a partir do “DataFrame” e retorna as seguintes informações:

- **Tipo de Eletrodo:** Nome do eletrodo selecionado.
- **Resistência à Tração (f_w em MPa):** O valor da resistência à tração do eletrodo, medido em MPa.

Caso o usuário insira um número inválido, a função exibe uma mensagem de erro e solicita uma nova seleção, chamando-se recursivamente.

A função retorna o tipo de eletrodo escolhido e suas propriedades, que serão utilizadas nos cálculos da solda e o número da escolha, que será utilizado posteriormente na iteração de verificação das ligações.

4.1.1.6. Selecionar Local de Fixação da Viga

A função “selecionar_local” permite ao usuário escolher o local onde a viga será fixada no pilar, tendo com opções a mesa ou alma do perfil do pilar. A escolha do local de fixação é fundamental, pois afeta a resistência e a capacidade de carga da ligação.

O usuário deve inserir o número correspondente ao local desejado. Essa entrada é armazenada na variável “escolha_local”.

A função verifica se a escolha está entre as opções válidas (1 ou 2). Dependendo da escolha:

- **Fixação na Mesa:** A função calcula a menor espessura entre a espessura da cantoneira (cantoneira_t) e a espessura da mesa do pilar (pilar_mesa_tf). A origem da menor espessura é registrada, indicando se a menor espessura é da cantoneira ou da mesa do pilar. A variável “local_fixacao” é definida como 'Mesa'.

- **Fixação na Alma:** A função realiza o mesmo cálculo, mas considerando a espessura da alma do pilar (`pilar_alma_tw`). Novamente, a origem da menor espessura é registrada e a variável `local_fixacao` é definida como 'Alma'.

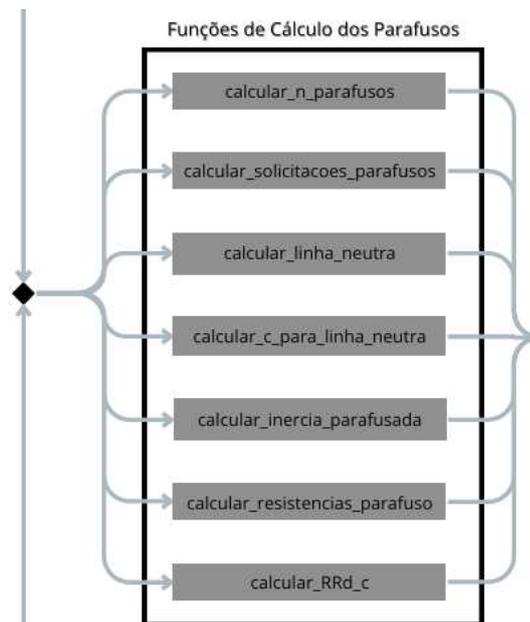
Se o usuário inserir uma opção inválida, a função exibe uma mensagem de erro e solicita uma nova escolha, chamando-se recursivamente.

A função retorna o número correspondente ao local de fixação escolhido, a menor espessura entre a cantoneira e a parte do pilar onde a viga será fixada, o local de fixação selecionado (mesa ou alma) e uma “string” indicando a origem da menor espessura.

4.1.2. Funções de Cálculo dos Parafusos

As funções de cálculo dos parafusos utilizam os dados obtidos através dos parâmetros escolhidos pelo usuário para executar o cálculo das variáveis e equações relacionadas as resistências ou solicitações atuantes na ligação parafusada. A Figura 7 apresenta a parcela do fluxograma referente às Funções de Cálculo dos Parafusos.

Figura 7 – Fluxograma das Funções de Cálculo dos Parafusos



Fonte: Autor (2025)

4.1.2.1. Cálculo da Quantidade de Parafusos

A função “`calcular_n_parafusos`” tem como objetivo calcular a quantidade necessária de parafusos para resistir à força cortante solicitante (V_d) da ligação viga-pilar, considerando parâmetros normativos e verificando a resistência da ligação conforme as dimensões e propriedades dos parafusos.

A função é composta de várias etapas, cada uma responsável por verificar e ajustar os parâmetros de resistência da ligação com parafusos, garantindo que os critérios de segurança sejam atendidos.

A área resistente do parafuso (A_b) é calculada com base no diâmetro do parafuso fornecido (d_b) (ABNT NBR 8800:2024), utilizando a Equação (1).

$$A_b = \pi \cdot \left(\frac{d_b}{2}\right)^2 \quad (1)$$

Deve-se levar em conta também a unidade de medida para conversão, os dados coletados são medidos em mm, porém para fins de cálculo e compatibilidade entre outras variáveis, utiliza-se os cálculos em cm.

A resistência unitária do parafuso ao cisalhamento ($F_{v,Rd}$) é obtida pela Equação (2), considerando plano de corte passando pela rosca (ABNT NBR 8800:2024):

$$F_{v,Rd} = 0,45 \cdot \frac{f_{ub}}{\gamma_{a2}} \cdot A_b \quad (2)$$

Onde f_{ub} é a resistência última do parafuso (MPa) com coeficiente de segurança ($\gamma_{a2} = 1,35$) utilizado para ajustar a resistência nominal para o valor de projeto, de acordo com a norma ABNT NBR 8800:2024.

O número de parafusos calculado é determinado pela divisão da força cortante solicitante (V_d) pela resistência unitária ($F_{v,Rd}$), multiplicada por 1,5, pois há tração atuando em conjunto com o cisalhamento no parafuso (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (3).

$$n_{calculado} = 1,5 \cdot \frac{V_d}{F_{v,Rd}} \quad (3)$$

Usualmente nesse tipo de ligação, utilizam-se no mínimo 4 parafusos, para fins de cálculos simplificados, adota-se número pares, para que a força cortante solicitante (V_d) seja igualmente distribuído entre os lados da ligação (XEREZ NETO; CUNHA, 2020). Caso o número de parafusos calculado seja inferior a 4 ou ímpar, o código ajusta para garantir o mínimo exigido ou que se mantenha em números pares.

A função também verifica se a altura total da cantoneira é suficiente para garantir a estabilidade da viga na ligação. Para isso, é calculada a altura mínima da cantoneira, que deve

ser no mínimo igual à metade da altura da alma da viga. Isso visa evitar deslocamentos laterais da viga ao garantir que a cantoneira tenha uma altura adequada.

Caso a altura total da cantoneira calculada inicialmente não atenda a essa exigência, o código aumenta o número de parafusos em 2 (mantendo sempre em números pares) e recalcula a altura da cantoneira até que esse critério seja atendido. Esse ajuste impede que a ligação tenha uma altura muito pequena, o que comprometeria a estabilidade lateral da viga (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008).

A resistência total da ligação é dada pela soma das resistências unitárias dos parafusos multiplicada pelo número adotado de parafusos (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (4).

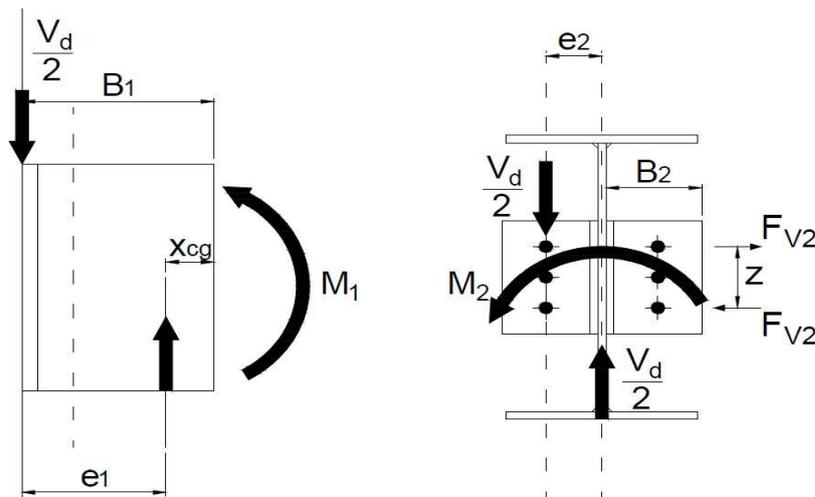
$$F_{v,Rd_{total}} = F_{v,Rd} \cdot n_{adotado} \quad (4)$$

A função retorna $n_{calculado}$, $n_{adotado}$, $F_{v,Rd}$, $F_{v,Rd_{total}}$ e A_b .

4.1.2.2. Cálculo das Solicitações nos Parafusos

A função “calcular_solicitacoes_parafusos” tem como objetivo calcular as solicitações nos parafusos da ligação, levando em consideração o cisalhamento direto e os momentos gerados pela distribuição de forças na cantoneira e na viga, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Representação das variáveis



Fonte: Maia (2023)

A função realiza os cálculos necessários para determinar as solicitações nos parafusos, considerando os efeitos da força cortante aplicada na viga e os momentos gerados pela geometria da ligação, conforme ilustrado na Figura 8.

Cálculo dos Momentos M_1 e M_2 :

M_1 é o momento gerado pela força cortante solicitante (V_d) atuando a uma distância e_1 do centro de gravidade da solda (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (5).

$$M_1 = \frac{V_d}{2} \cdot e_1 \quad (5)$$

e_1 é a distância entre o ponto de aplicação da força cortante e o centro de gravidade da solda (X_{cg}), é obtido pela diferença entre o ponto B_1 (dimensão da aba da cantoneira) e o centro de gravidade da solda (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (6).

$$e_1 = B_1 - X_{cg} \quad (6)$$

M_2 é o momento é gerado pela mesma força cortante (V_d), mas atuando a uma distância e_2 na ligação parafusada (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (7).

$$M_2 = \frac{V_d}{2} \cdot e_2 \quad (7)$$

e_2 é a distância entre a aba da cantoneira e o centro da alma da viga, considerando a metade da largura da aba da cantoneira (B_2) e a metade da espessura da alma da viga (t_w) (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (8).

$$e_2 = \frac{B_1}{2} + \frac{t_w}{2} \quad (8)$$

Cisalhamento Devido à Força Cortante (V_d):

O cisalhamento devido à força cortante aplicada (V_d) é distribuído entre todos os parafusos, e a força $F_{V,sd1}$ atuando em cada parafuso é obtida dividindo V_d pelo número de parafusos adotado $n_{adotado}$ (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (9).

$$F_{V,sd1} = \frac{V_d}{n_{adotado}} \quad (9)$$

Cisalhamento nos Parafusos Externos devido ao Momento M_2 :

O momento M_2 , que é a rotação imposta pela força cortante, causa uma força cisalhante nos parafusos localizados mais externamente. A força cisalhante $F_{V,sd2}$ nos parafusos externos é obtida dividindo o momento M_2 pela distância entre os parafusos externos (z) (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (10).

$$F_{V,Sd2} = \frac{M_2}{z} \quad (10)$$

Cálculo do Cisalhamento Total ($F_{V,Sd}$):

O cisalhamento total ($F_{V,Sd}$) em cada parafuso é obtido pela resultante da combinação dos efeitos do cisalhamento devido à força cortante e o cisalhamento nos parafusos externos devido ao momento M_2 (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (11).

$$F_{V,Sd} = \sqrt{F_{V,Sd1}^2 + F_{V,Sd2}^2} \quad (11)$$

A função retorna e_1 , e_2 , M_1 , M_2 , $F_{V,Sd1}$, $F_{V,Sd2}$ e $F_{V,Sd}$.

4.1.2.3. Cálculo da Linha Neutra

A função “calcular_linha_neutra” é utilizada para determinar a posição da linha neutra na ligação. A linha neutra é a região da cantoneira onde a deformação é nula durante a aplicação de cargas, o que é essencial para determinar como as tensões são distribuídas. A linha neutra é calculada resolvendo uma equação do segundo grau (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008). O cálculo é baseado na distribuição dos esforços e nas áreas resistentes dos parafusos tracionados e da área de contato cantoneira com o pilar.

a corresponde à dimensão B_1 multiplicado por metade (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008), conforme Equação (12). Esse fator se origina no trecho da equação quadrática, isolando-se a variável y .

$$B_1 \cdot \frac{y^2}{2} \dots a \cdot y^2 = \frac{B_1}{2} \cdot y^2 \quad (12)$$

b reflete a contribuição da área resistente dos parafusos (A_b), ajustada pelo número de parafusos adotados ($n_{adotado}$), considera-se apenas um lado, desse modo utiliza-se metade de $n_{adotado}$ (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008), conforme Equação (13).

$$b = \left(\frac{n_{adotado}}{2} \right) \cdot A_b \quad (13)$$

c é o produto da soma das alturas dos parafusos tracionados e a área resistente dos parafusos (A_b), conforme o cálculo é feito a partir das alturas, obtém-se esse produto de uma função posterior, definido por “soma_ap”.

O discriminante delta (Δ), conforme Equação (14), é calculado para verificar se a equação possui soluções reais. Se o discriminante for negativo, a função gera um erro, indicando que não há soluções reais possíveis para o problema.

$$\Delta = b^2 - 4 \cdot a \cdot c \quad (14)$$

As duas raízes são calculadas usando a fórmula de Bhaskara. A função seleciona a maior das duas raízes conforme apresentado na Equação (15), pois esta representa a solução válida para a posição da linha neutra.

$$y = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2 \cdot a} \quad (15)$$

A solução válida deve ser positiva e a menor entre as raízes, indicando a posição real da linha neutra dentro dos limites geométricos da cantoneira.

A função retorna a linha neutra calculada como o maior valor válido entre as raízes da equação, garantindo que seja a solução física adequada para o problema.

A função retorna y_{LN} (linha neutra).

4.1.2.4. Cálculo da Posição dos Parafusos

A função “calcular_c_para_linha_neutra” calcula a altura dos parafusos em relação à cantoneira, o que consequentemente define a posição dos furos. Com isso, é possível calcular o produto da altura de cada parafuso pela área resistente do parafuso, resultando na soma desses produtos, e também obter a maior altura de parafuso, que é usada para verificar a conformidade geométrica da ligação.

O cálculo da posição de cada parafuso é feito de maneira iterativa. O primeiro parafuso tem sua posição calculada a partir do coeficiente de espaçamento 1 (ce_1), que representa o espaçamento entre o parafuso e a borda da cantoneira, e o diâmetro do parafuso (d_b). Para os demais parafusos a posição é calculada a partir do coeficiente de espaçamento 2 (ce_2), que representa o espaçamento entre parafusos, e o diâmetro do parafuso (d_b) adicionado iterativamente ao valor da altura anterior para determinar a posição dos furos subsequentes, conforme Equações (16) e (17).

$$h_1 = ce_1 \cdot d_b \quad (16)$$

$$h_i = ce_2 \cdot d_b \quad (17)$$

Onde ce_1 é o espaçamento entre o parafuso e a borda da chapa de ligação e ce_2 é o espaçamento entre parafusos, sendo estes, 1,5 e 3,0 (ABNT NBR 8800:2024), os valores são os mínimos, podendo ser recalculados em caso de necessidade, durante as etapas de verificação.

Para cada parafuso, o produto entre a posição e a área resistente do parafuso (A_b) é calculado e armazenado em uma lista. Esse produto é fundamental para o cálculo da linha neutra.

A soma dos produtos para todos os parafusos é calculada e representada como “soma_ap”. Essa soma será utilizada em cálculos posteriores para a análise da linha neutra, conforme Equação (18).

$$soma_{ap} = \sum (h_i \cdot A_b) \quad (18)$$

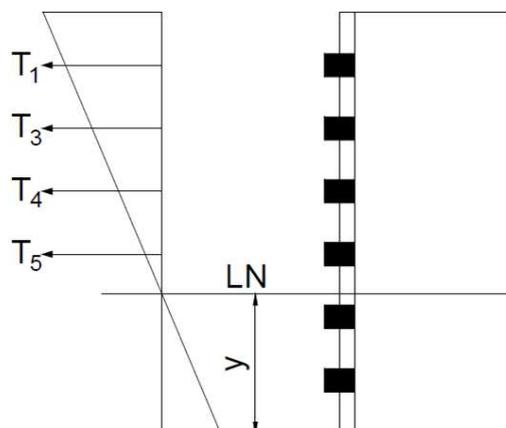
A posição máxima dos parafusos é obtida a partir da lista de posições dos parafusos, garantindo que a posição do parafuso superior seja considerada nos cálculos.

A função retorna **parafuso_alturas**, **parafuso_hmax** e **soma_ap**.

4.1.2.5. Cálculo da Inércia da Chapa Parafusada

A função “calcular_inercia_parafusada” é utilizada para calcular a inércia da chapa parafusada (cantoneira), levando em consideração a contribuição dos parafusos tracionados e da própria chapa. A inércia é essencial para determinar a resistência à flexão e deformações na ligação (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008). A disposição das posições dos parafusos e da linha neutra são apresentados na figura 9.

Figura 9 – Representação das variáveis



Fonte: Maia (2023)

A função realiza o cálculo da inércia total da chapa, considerando tanto os parafusos tracionados quanto a inércia da própria chapa. Isso é necessário para avaliar a resistência à flexão da chapa na ligação parafusada.

A inércia do parafuso é calculada com base no diâmetro do parafuso, conforme Equação (19). A fórmula utilizada é a inércia para uma seção circular:

$$I_{furo} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{d_b}{2}\right)^4}{4} \quad (19)$$

Isso considera o efeito do acréscimo de resistência devido à presença dos parafusos tracionados.

As distâncias de cada parafuso até a linha neutra são calculadas pela diferença entre a altura de cada parafuso e a posição da linha neutra. Isso é feito através de uma lista que armazena o valor absoluto dessa diferença, conforme Equação (20).

$$d_i = |h_i - y_{LN}| \quad (20)$$

Onde h_i é a posição do parafuso e y_{LN} é a linha neutra.

Cálculo da Inércia Total Considerando os Parafusos:

A inércia total é a soma da contribuição de cada parafuso, que segue a fórmula do teorema dos eixos paralelos (Steiner), conforme Equação (21).

$$I_{furos} = \sum (I_{furo} + A_b \cdot d_i^2) \quad (21)$$

A inércia da chapa até a linha neutra é calculada com base na geometria da chapa e na posição da linha neutra, utilizando a fórmula da inércia de uma seção retangular, conforme Equação (22):

$$I_{chapa} = \left(\frac{B_2 \cdot y_{LN}^3}{12}\right) + (B_2 \cdot y_{LN}) \cdot \left(\frac{y_{LN}}{2}\right)^2 \quad (22)$$

Onde B_2 é a largura da aba da cantoneira, e y_{LN} é a posição da linha neutra.

A inércia total da chapa parafusada é a soma da inércia da chapa e das inércias de cada parafuso, conforme Equação (23).

$$I_{total} = I_{chapa} + I_{furos} \quad (23)$$

A função retorna **I_chapa_parafusada**, **I_furo**, **parafuso_distancias**, **inercia_furos** e **I_chapa**.

4.1.2.6. Cálculo das Resistências dos Parafusos

A função “calcular_resistencias_parafuso” calcula as resistências à tração e ao cisalhamento dos parafusos. As solicitações correspondentes a serem comparadas, levam em consideração os momentos atuantes na ligação (ABNT NBR 8800:2024). Além disso, a função verifica a interação entre as solicitações de tração e cisalhamento.

A resistência ao cisalhamento ($F_{v,Rd}$) de um parafuso é calculada utilizando a resistência última (f_{ub}) e a área resistente do parafuso (A_b), aplicando um coeficiente de ponderação ($\gamma_{a2} = 1,35$) (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (24).

$$F_{v,Rd} = 0,45 \cdot A_b \cdot \frac{f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (24)$$

Isso reflete a capacidade de cada parafuso de resistir às solicitações de cisalhamento isoladamente.

A resistência à tração isolada ($F_{t,Sd}$) é calculada considerando a resistência última (f_{ub}) e a área resistente do parafuso (A_b), aplicando um coeficiente de ponderação ($\gamma_{a2} = 1,35$) (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (25).

$$F_{t,Rd} = 0,75 \cdot A_b \cdot \frac{f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (25)$$

Isso reflete a capacidade do parafuso de resistir à tração pura sem a presença de cisalhamento.

A força de tração que age em cada parafuso ($F_{t,Sd}$) é calculada com base no momento fletor M_1 , na inércia da chapa parafusada, na distância do parafuso mais distante da linha neutra e na área resistente do parafuso A_b (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (26).

$$F_{t,Sd} = \frac{M_1}{I_{total}} \cdot (h_{max} - y_{LN}) \cdot A_b \quad (26)$$

Isso reflete a tensão de tração em um parafuso devido à flexão na chapa (cantoneira).

A força de cisalhamento que age em cada parafuso ($F_{v,Sd}$) já foi determinada.

A resistência combinada de cisalhamento e tração ($F_{t,Sd,máx}$) é calculada para verificar a interação entre as duas solicitações. Essa interação considera a resistência última (f_{ub}), a área resistente (A_b), o coeficiente de ponderação ($\gamma_{a2} = 1,35$), e a solicitação de cisalhamento $F_{v,Sd}$ (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (27):

$$F_{t,Sd,máx} = f_{ub} \cdot \frac{A_b}{\gamma_{a2}} - 1,9 \cdot F_{v,Sd} \quad (27)$$

Isso verifica a combinação entre cisalhamento e tração no parafuso e determina se o parafuso está adequado para suportar ambas as solicitações simultaneamente.

A função retorna $F_{t,Sd}$, $F_{v,Rd}$, $F_{t,Rd}$ e $F_{t,Sd,máx}$.

4.1.2.7. Cálculo da Resistência da Chapa (Cantoneira)

A função “calcular_RRd_c” é utilizada para calcular a pressão de contato da chapa de ligação levando em consideração as distâncias relevantes e as espessuras das peças. Essa resistência é crucial para garantir que a ligação possa suportar as cargas aplicadas sem falhar.

Cálculo da Menor Distância do Furo:

A menor distância do furo à borda é calculada a partir das distâncias normativas ce_1 e ce_2 em relação ao diâmetro do parafuso (d_b).

Cálculo da Resistência (RRd_c):

A resistência da chapa (RRd_c) é calculada utilizando a menor distância do furo à borda, diâmetro do parafuso, a menor espessura das peças, a resistência à tração do material (f_u) e os fatores de segurança (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equações (28) e (29):

$$RRd_c = 1,2 \cdot \frac{d_{min} \cdot t_{min} \cdot f_u}{1,35} \quad (28)$$

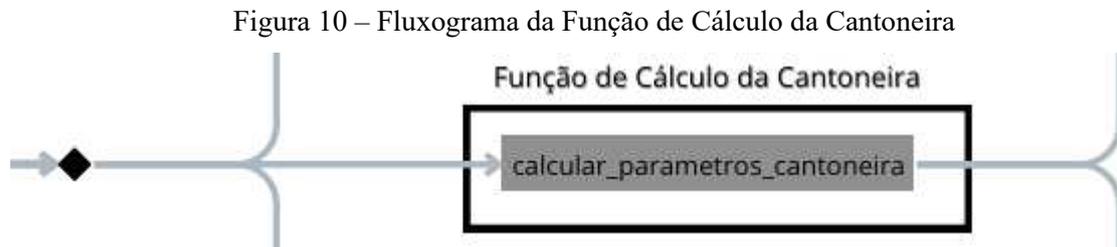
$$RRd_c = 2,4 \cdot \frac{d_b \cdot t_{min} \cdot f_u}{1,35} \quad (29)$$

RRd_c será o menor valor entre os acima. Onde f_u é a resistência última do aço.

A função retorna RRd_c e `menor_distancia_parafuso`.

4.1.3. Funções de Cálculo da Cantoneira

As funções de cálculo da cantoneira irão calcular as dimensões mínimas de altura da cantoneira, conforme critérios apresentados a seguir. A Figura 10 apresenta a parcela do fluxograma referente à Função de Cálculo da Cantoneira.



Fonte: Autor (2025)

4.1.3.1. Cálculo dos Parâmetros da Cantoneira

A função “calcular_parametros_cantoneira” é responsável por calcular os parâmetros essenciais da cantoneira para a ligação entre viga e pilar, incluindo a largura da cantoneira, o espaçamento entre os parafusos e a medida total da cantoneira.

Se a medida total da cantoneira exceder a altura da alma da viga menos 2 cm ou for menor que metade da altura da alma da viga, essa definição tem o intuito de garantir a estabilidade lateral (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008), caso não atenda aos parâmetros a função entra em um loop iterativo para recalculá-los.

Dentro do loop, a função recalcula o número de parafusos e a resistência, ajustando os parâmetros até que a condição de altura seja atendida.

Se necessário, a função altera o diâmetro do parafuso ou o tipo de parafuso, buscando alternativas até que uma configuração viável seja encontrada.

A função retorna os parâmetros calculados, incluindo as dimensões da cantoneira, o espaçamento entre os parafusos e as características dos parafusos selecionados.

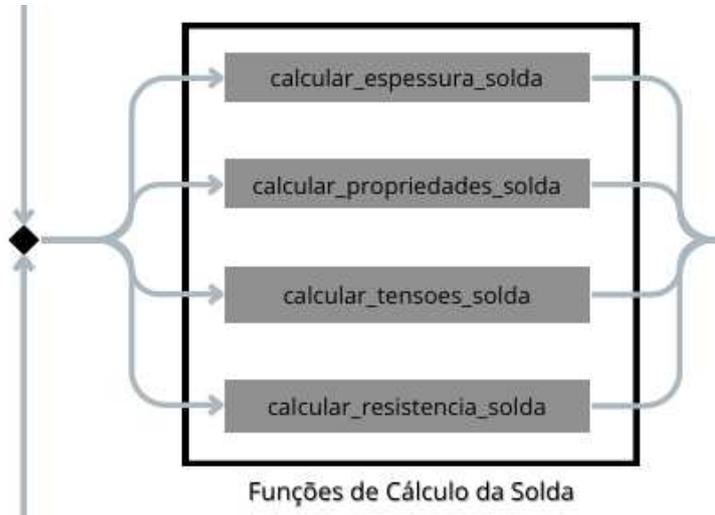
A função retorna B_1 , B_2 , z , f_{yb} , f_{ub} , d_b , **cantoneira_mtotal**, **escolha_diametro_iterativo**, **parafuso_tipo** e **escolha_tipo_iterativo**.

4.1.4. Funções de Cálculo da Solda

As funções de cálculo da solda utilizam os dados obtidos através dos parâmetros escolhidos pelo usuário para executar o cálculo das variáveis e equações relacionadas as

resistências ou solicitações atuantes na ligação soldada. A Figura 11 apresenta a parcela do fluxograma referente às Funções de Cálculo da Solda.

Figura 11 – Fluxograma das Funções de Cálculo da Solda



Fonte: Autor (2025)

4.1.4.1. Cálculo da Espessura da Solda

A função “calcular_espessura_solda” é responsável por calcular a espessura da solda necessária para a ligação entre a cantoneira e a viga, considerando as espessuras dos materiais envolvidos.

A função compara a espessura da cantoneira e a espessura da alma da viga para determinar a menor espessura soldada. A origem dessa espessura é registrada.

A função itera pelas espessuras de solda disponíveis e verifica se a menor espessura soldada está dentro dos limites definidos (mínimo e máximo). Se encontrar uma espessura válida, registra a espessura mínima da perna de solda de filete.

Se não encontrar uma espessura mínima apropriada, a função retorna uma mensagem de erro. Caso contrário, retorna a espessura mínima da solda, a menor espessura soldada e a origem da espessura soldada.

A função retorna **solda_espessura_minima**, **menor_espessura_soldada** e **origem_menor_espessura_soldada**.

4.1.4.2. Cálculo das Propriedades da Solda

A função “calcular_propriedades_solda” calcula as propriedades geométricas da solda, como a área, centro de gravidade e os momentos de inércia. Essas propriedades são fundamentais para a análise estrutural da ligação entre a cantoneira e a viga.

A garganta efetiva da solda (a) é calculada como 70% da perna da solda (XEREZ NETO; CUNHA, 2020). Essa proporção é uma diretriz comum na prática de soldagem, é uma aproximação considerando o raio efetivo da resistência da solda, também denominada garganta efetiva, conforme Equação (30).

$$a = 0,70 \cdot b \quad (30)$$

A área da solda (A_w) é calculada com base na garganta efetiva da solda e na soma das dimensões da solda. A área é importante para determinar a capacidade de carga da solda, conforme Equação (31).

$$A_w = (2 \cdot x + y) \cdot a \quad (31)$$

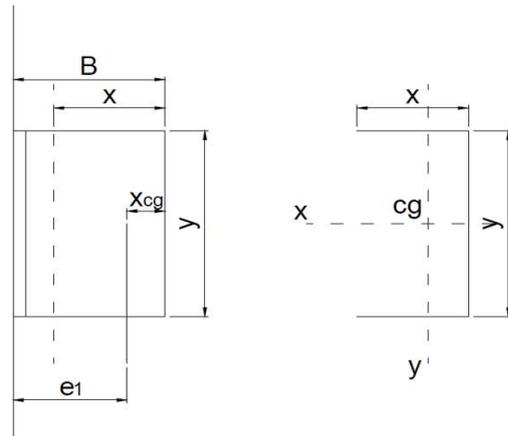
Onde $(2 \cdot x + y)$ representa a soma das dimensões da solda ao longo da cantoneira, sendo x e y mostrados na Figura 12.

O centro de gravidade (X_{cg}) da solda é calculado com base na posição relativa dos componentes da solda. Este cálculo é importante para determinar como as forças são distribuídas ao longo da solda, conforme Equação (32).

$$X_{cg} = x - \left(\frac{x^2}{2 \cdot x + y} + \frac{x \cdot y}{2 \cdot x + y} \right) \quad (32)$$

Essa equação leva em consideração as distâncias dos componentes da solda em relação ao eixo de referência.

Figura 12 – Representação das variáveis



Fonte: Maia (2023)

Cálculo do Momento de Inércia ao longo do Eixo x (I_x):

O momento de inércia (I_x) é calculado para avaliar a resistência da solda à flexão. É composto por dois componentes: I_{1x} e I_{1y} . I_1 refere-se a solda constante nas extremidades superior e inferior da chapa de ligação. O cálculo do momento de inércia em relação ao eixo x considera tanto a geometria da solda quanto a distância do centro de gravidade, conforme Equações (33) e (34).

$$I_{1x} = \frac{x \cdot a^3}{12} + (x \cdot a) \cdot \left(\frac{y}{2} - \frac{a}{2}\right)^2 \quad (33)$$

$$I_{1y} = \frac{a \cdot y^3}{12} + (a \cdot y) \cdot \left(\frac{a}{2} - \frac{a}{2}\right)^2 \quad (34)$$

O total I_x é a soma todos os componentes da solda, conforme Equação (35):

$$I_x = 2 \cdot I_{1x} + I_{1y} \quad (35)$$

Cálculo do Momento de Inércia ao longo do Eixo y (I_y):

O momento de inércia I_y é calculado para avaliar a resistência da solda à flexão. É composto por dois componentes: I_{2x} e I_{2y} . I_2 refere-se a solda constante na extremidade direita da chapa de ligação. O cálculo do momento de inércia em relação ao eixo x considera tanto a geometria da solda quanto a distância do centro de gravidade, conforme Equações (36) e (37).

$$I_{2x} = \frac{a \cdot x^3}{12} + (x \cdot a) \cdot \left(\frac{x}{2} - X_{cg}\right)^2 \quad (36)$$

$$I_{2y} = \frac{x \cdot a^3}{12} + (a \cdot y) \cdot \left(X_{cg} - \frac{a}{2}\right)^2 \quad (37)$$

O total I_y é a soma todos os componentes da solda, conforme Equação (38):

$$I_y = 2 \cdot I_{2x} + I_{2y} \quad (38)$$

Cálculo do Momento Polar de Inércia (I_p):

O momento polar de inércia (I_p) é a soma dos momentos de inércia ao longo dos eixos x e y, conforme Equação (39):

$$I_p = I_x + I_y \quad (39)$$

A função retorna b , A_w , X_{cg} , I_x , I_y e I_p .

4.1.4.3. Cálculo das Tensões na Solda

A função “calcular_tensoes_solda” é responsável por calcular as tensões que atuam na solda devido aos esforços de cisalhamento e momento. Esses cálculos são cruciais para garantir que a solda seja capaz de resistir às forças aplicadas sem comprometer a integridade estrutural.

A distância entre o centro de gravidade da solda e a borda mais solicitada da cantoneira (r) é determinada pela fórmula da hipotenusa, considerando o centro de gravidade da solda (X_{cg}) e a metade da largura da cantoneira (y), conforme Equação (40).

$$r = \sqrt{X_{cg}^2 + \left(\frac{y}{2}\right)^2} \quad (40)$$

A tensão de cisalhamento (f_v) na solda é calculada dividindo a força cortante (V_d) pela área total da solda (A_w), conforme a equação clássica de tensão (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (41).

$$f_v = \frac{V_d}{2 \cdot A_w} \quad (41)$$

A tensão é dividida por 2, pois estamos considerando que a solda é simétrica e carrega a força de maneira igual dos dois lados.

A tensão devida ao momento (f_m) é calculada multiplicando o momento fletor M_1 pela distância r , dividindo pelo momento polar de inércia I_p . Isso segue a equação padrão de tensão devido a momentos em seções de solda (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (42).

$$f_m = \frac{M_1}{I_p} \cdot r \quad (42)$$

A tensão devido ao momento é dividida em componentes nos eixos x e y (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equações (43) e (44).

$$f_{mx} = \frac{f_m \cdot y}{2 \cdot r} \quad (43)$$

$$f_{my} = \frac{f_m \cdot X_{cg}}{r} \quad (44)$$

A tensão resultante na garganta da solda ($f_{w,Sd}$) é determinada pela soma quadrática das componentes f_{mx} e f_{my} com a tensão de cisalhamento f_v . Esta equação combina a tensão de cisalhamento com as tensões de momento para encontrar a tensão total na solda (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (45).

$$f_{w,Sd} = \sqrt{(f_v + f_{my})^2 + f_{mx}^2} \quad (45)$$

A tensão resultante na garganta efetiva da solda ($f_{w,Sd}$) é reduzida pela constante 0,7, para considerar a tensão no metal base ($f_{MB,Sd}$) (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (46):

$$f_{MB,Sd} = 0,70 \cdot f_{w,Sd} \quad (46)$$

A função retorna f_v , f_m , r , f_{mx} , f_{my} , $f_{w,Sd}$ e $f_{MB,Sd}$.

4.1.4.4. Cálculo da Resistência na Solda

A função “calcular_resistencia_solda” calcula a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento da solda e do metal base. Esses cálculos são essenciais para verificar se a solda e o metal base têm a resistência necessária para suportar as solicitações aplicadas.

A resistência à ruptura da solda ($f_{w,Rd}$) é calculada utilizando a tensão de ruptura do eletrodo de solda (f_w), e aplicando o fator de 0,6 conforme as diretrizes de dimensionamento para soldas em filete. O valor é então dividido pelo coeficiente de ponderação ($\gamma_{a2} = 1,35$) (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (47).

$$f_{w,Rd} = \frac{0,60 \cdot f_w}{\gamma_{a2}} \quad (47)$$

A resistência ao escoamento do metal base ($f_{MB,Rd}$) é calculada da mesma forma que a resistência à ruptura da solda, mas utilizando a tensão de escoamento do metal base (f_y), tensão de escoamento do aço, e ajustado com um coeficiente de ponderação ($\gamma_{a1} = 1,10$) (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (48).

$$f_{MB,Sd} = \frac{0,60 \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (48)$$

A função retorna $f_{w,Rd}$ e $f_{MB,Rd}$.

4.1.5. Verificação das ligações

A partir das funções de cálculo executadas previamente, o código irá executar o processo de verificação, comparando as resistências com as solicitações, essa etapa do cálculo será iterativa, fazendo-se a validação, alterando os parâmetros e recalculando.

4.1.5.1. Verificação das Forças Aplicadas nos Parafusos

Na função de verificação dos parafusos, várias solicitações atuantes são comparadas com suas resistências correspondentes. O objetivo é garantir que os parafusos sejam capazes de suportar as solicitações de cisalhamento, tração e a combinação dessas solicitações. A Figura 13 apresenta a parcela do fluxograma referente à etapa de verificação da ligação parafusada.

Figura 13 – Fluxograma da Verificação da Ligação Parafusada



Fonte: Autor (2025)

Força de Cisalhamento Solicitante ($F_{v,Sd}$):

$$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd} \quad (49)$$

Se a força de cisalhamento solicitante ($F_{v,Sd}$) for maior que a resistência ($F_{v,Rd}$), o parafuso não terá resistência suficiente para suportar o esforço cortante, indicando a necessidade de ajuste.

Força de Tração Solicitante ($F_{t,Sd}$):

$$F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd} \quad (50)$$

Se $F_{t,Sd}$ for maior que $F_{t,Rd}$, o parafuso pode falhar por tração, e será necessário ajustar os parâmetros.

Força Combinada de Cisalhamento e Tração:

$$F_{t,Sd} \leq F_{t,Sd,máx} \quad (51)$$

Se a força combinada $F_{t,Sd}$ exceder $F_{t,Sd,máx}$, o parafuso poderá falhar, necessitando ajuste de diâmetro ou tipo.

Força de Esmagamento (F_{Vd}):

$$F_{Vd} \leq RRd_c \quad (52)$$

Ações em Caso de Não Conformidade

Se qualquer uma das verificações apresentadas não for atendida, a função executa as seguintes ações:

- **Ajuste do Diâmetro:** Se as forças aplicadas excederem as resistências, a função tenta ajustar o **diâmetro do parafuso** (d_b), selecionando o próximo diâmetro disponível usando a função “proximo_diametro_parafuso”.
- **Ajuste do Tipo de Parafuso:** Se não houver mais diâmetros disponíveis, a função passa a tentar um novo **tipo de parafuso**, com diferentes propriedades de resistência ao escoamento e ruptura, usando a função “proximo_tipo_parafuso”.

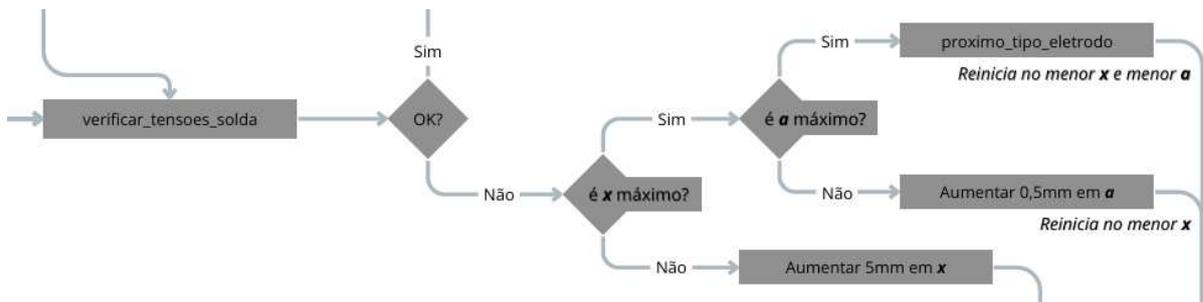
- **Ajuste do Espaçamento dos Parafusos:** Caso a força solicitante de cisalhamento ($F_{v,Sd}$) exceda a resistência ao esmagamento (RRd_c), a função ajusta o **espaçamento entre os parafusos** (ce_1 e ce_2) até que a condição seja atendida, ou até que os limites geométricos sejam atingidos.

A função retorna d_b , ce_1 , ce_2 , $iteracoes_p$, $escolha_diametro_iterativo$, $escolha_tipo_iterativo$ e $parafuso_tipo$,

4.1.5.2. Verificação das Forças Aplicadas na Solda

Na função de verificação das tensões na solda, várias forças e tensões atuantes são comparadas com suas resistências correspondentes. O objetivo é garantir que a solda selecionada seja capaz de suportar as forças de cisalhamento e momento aplicados, sem exceder as resistências do material da solda e do metal base. A Figura 14 apresenta a parcela do fluxograma referente à etapa de verificação da ligação soldada.

Figura 14 – Fluxograma da Verificação da Ligação Soldada



Fonte: Autor (2025)

Tensão na Garganta Efetiva da Solda ($f_{w,Sd}$):

$$f_{w,Sd} \leq f_{w,Rd} \quad (53)$$

Se $f_{w,Sd}$ for maior que $f_{w,Rd}$, a solda pode falhar por cisalhamento, indicando a necessidade de ajuste da perna de solda ou da espessura da solda.

Tensão no Metal Base ($f_{MB,Sd}$):

$$f_{MB,Sd} \leq f_{MB,Rd} \quad (54)$$

Se $f_{MB,Sd}$ exceder $f_{MB,Rd}$, o metal base pode entrar em escoamento, exigindo ajuste dos parâmetros da solda.

Ações em Caso de Não Conformidade

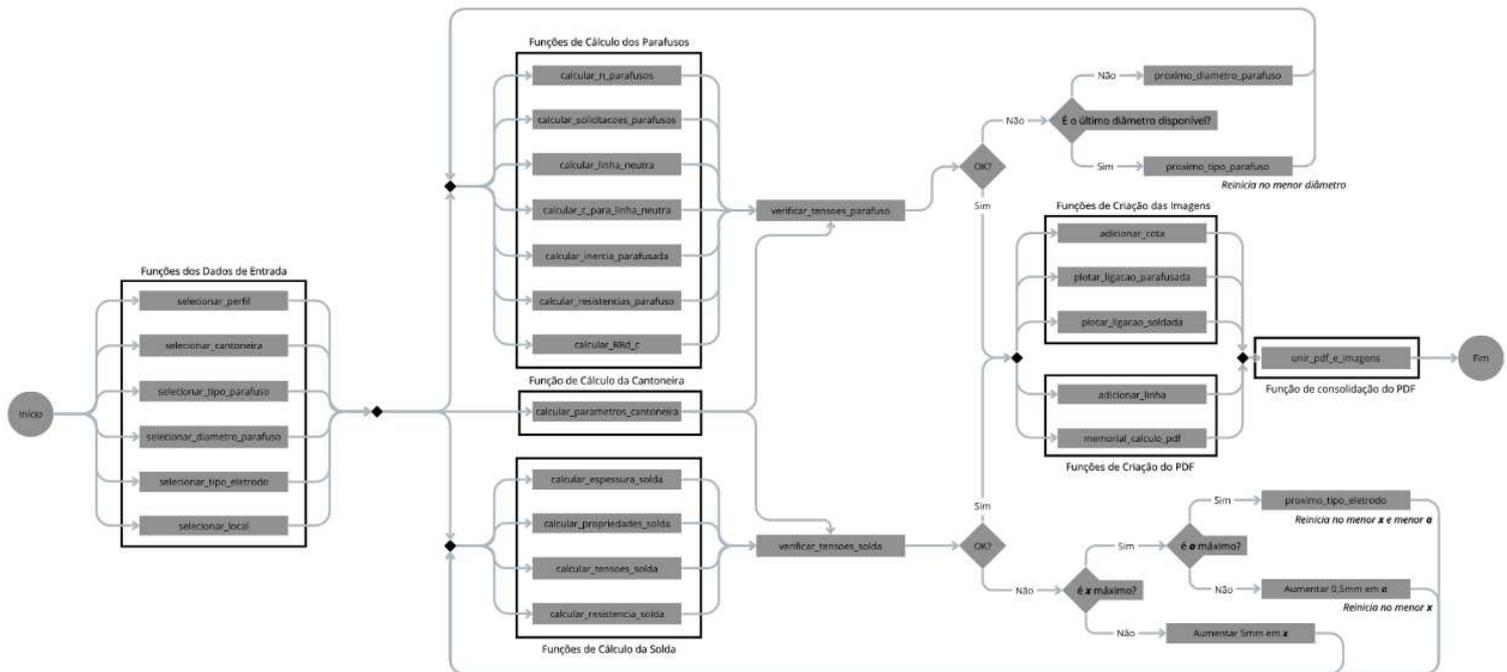
Se qualquer uma das verificações apresentadas não for atendida, o código toma as seguintes ações para ajustar os parâmetros e tentar satisfazer as condições:

- **Ajuste do Comprimento da Perna de Solda:** Se $f_{w,Sd} > f_{w,Rd}$ ou $f_{MB,Sd} > f_{MB,Rd}$, o código aumenta o comprimento da perna de solda x iterativamente até atingir o limite permitido. São acrescidos 5mm a cada iteração, até o limite da largura da aba da cantoneira em contato com a alma da viga. Se o comprimento x atingir o valor máximo, a espessura da solda será ajustada.
- **Ajuste da Espessura da Solda:** Se a perna de solda x atingir o limite máximo e ainda não atender às condições, o código aumenta a **espessura da solda** até o limite da **menor espessura soldada** entre os materiais. São acrescidos 0,5mm a cada iteração, até o limite da menor espessura soldada, entre a espessura da cantoneira e da alma da viga. Caso a espessura já tenha atingido o limite, o código tenta ajustar o tipo de eletrodo.
- **Ajuste do Tipo de Eletrodo:** Se os ajustes de comprimento e espessura não forem suficientes, o código seleciona um novo **tipo de eletrodo** com maior resistência, utilizando a função “proximo_tipo_eletrodo”. Após a troca do eletrodo, o comprimento da perna de solda x e a espessura são reiniciados e o processo de verificação é repetido.

A função retorna **iteracoes_s**, **x_iterativo**, **solda_espessura_iterativo** e **escolha_eletrodo_iterativo**.

O fluxograma apresentado na Figura 15, mostra detalhadamente as etapas de cálculo realizadas e as saídas programadas.

Figura 15 – Fluxograma da Ligação Viga-Pilar Flexível



Fonte: Autor (2025)

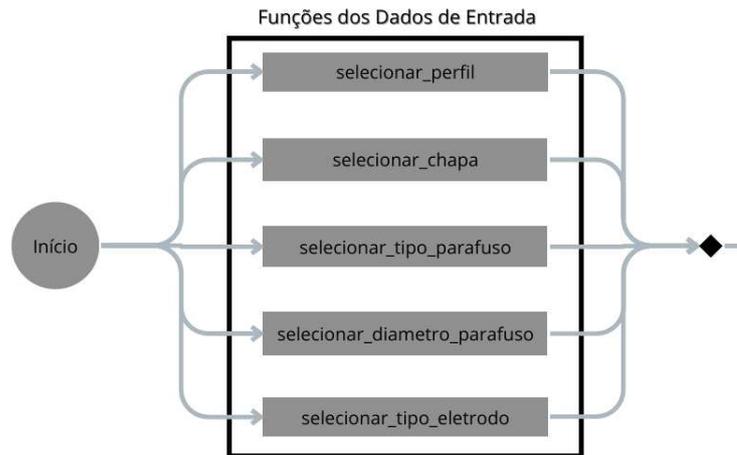
4.2. Ligação Viga-Pilar Rígida

Para a apresentação do código sobre a Ligação Viga-Pilar Rígida, tem-se códigos utilizados também na Ligação Viga-Pilar Flexível, deste modo, será omitida a explicação, visto que constam explicados anteriormente.

4.2.1. Dados de Entrada

Os dados de entrada serão compostos pelos dados iniciais que são obtidos através da escolha do usuário. Cada perfil, chapa, parafuso ou eletrodo disponível para seleção estão presentes em uma planilha eletrônica, denominada “Dados”, juntamente com todos os parâmetros de cálculo e dimensão dos referidos itens. As funções “selecionar_perfil”, “selecionar_tipo_parafuso”, “selecionar_diametro_parafuso” e “selecionar_tipo_eletrodo” foram omitidas, pois foram explicadas em 4.1.1. A Figura 16 apresenta a parcela do fluxograma referente às Funções dos Dados de Entrada.

Figura 16 – Fluxograma das Funções dos Dados de Entrada



Fonte: Autor (2025)

4.2.1.1. Selecionar Chapa

A função “selecionar_chapa” é responsável por permitir que o usuário selecione a espessura da chapa comercial a ser utilizada na ligação. Essa escolha é fundamental, pois a espessura da chapa impacta diretamente na capacidade de carga da conexão e na integridade estrutural.

A função começa exibindo ao usuário uma lista de espessuras de chapas comerciais disponíveis. Essas opções são extraídas de um “DataFrame” que contém as chapas disponíveis, permitindo que o usuário veja todas as opções antes de fazer uma escolha.

O usuário é solicitado a inserir o número correspondente à chapa desejada. A entrada do usuário é armazenada na variável “escolha_chapa”.

Após a seleção, a função verifica se o número fornecido pelo usuário está dentro do intervalo válido. Se a escolha for correta, a função coleta os dados da chapa selecionada a partir do “DataFrame” e retorna as seguintes informações:

- **Chapa:** Espessura da chapa selecionada em milímetros, que é importante para os cálculos de resistência.

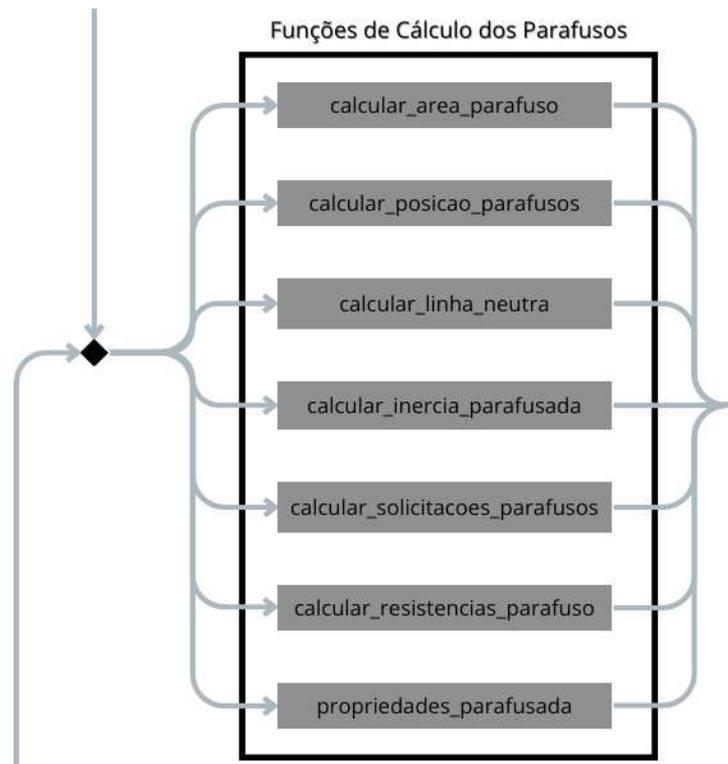
Caso o usuário insira um número inválido, a função exibe uma mensagem de erro e solicita uma nova seleção, chamando-se recursivamente.

A função retorna a espessura da chapa escolhida, que será utilizada posteriormente nos cálculos da ligação.

4.2.2. Funções de Cálculo dos Parafusos

As funções de cálculo dos parafusos utilizam os dados obtidos através dos parâmetros escolhidos pelo usuário para executar o cálculo das variáveis e equações relacionadas as resistências ou solicitações atuantes na ligação parafusada. A Figura 17 apresenta a parcela do fluxograma referente às Funções de Cálculo dos Parafusos.

Figura 17 – Fluxograma das Funções de Cálculo dos Parafusos



Fonte: Autor (2025)

4.2.2.1. Cálculo da Área do Parafuso

A função “calcular_area_parafuso” tem como objetivo calcular a área da seção transversal do parafuso com base no seu diâmetro, uma informação crucial para determinar a resistência ao cisalhamento e à tração que o parafuso pode suportar em uma ligação rígida do tipo viga-pilar.

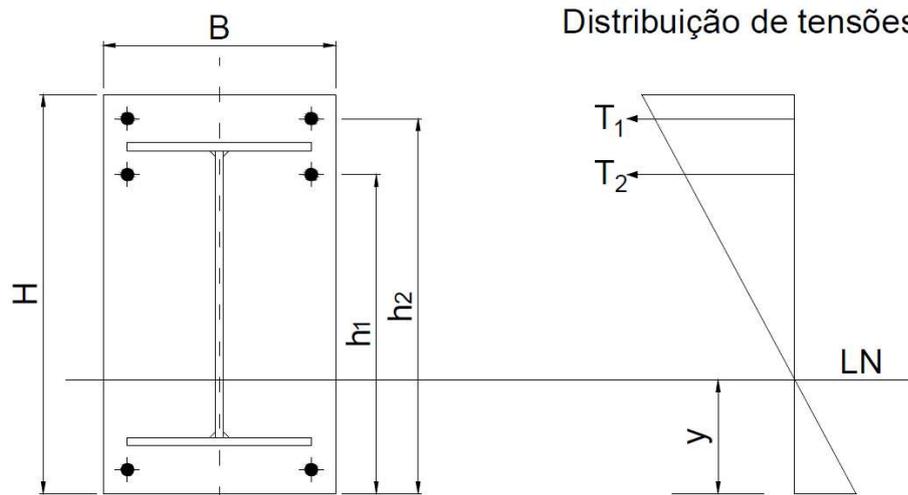
A função utiliza a equação geométrica da área de um círculo para calcular a área da seção transversal do parafuso, que é necessária para o cálculo das tensões atuantes no parafuso. A equação usada é baseada na equação da área de um círculo, conforme apresentado na Equação (1).

A função retorna A_b .

4.2.2.2. Cálculo da Posição dos Parafusos

A função “calcular_posicao_parafusos” é utilizada para determinar as posições dos parafusos em uma chapa. Essas posições são essenciais para a definição da distribuição dos esforços na ligação viga-pilar e no cálculo da resistência ao cisalhamento e tração de cada parafuso. A Figura 18 mostra a configuração da ligação e a distribuição dos parafusos.

Figura 18 – Representação das variáveis



Fonte: Maia (2023)

A função calcula as posições dos parafusos em uma chapa de ligação com base em parâmetros geométricos da viga e da chapa. A função inicia criando uma lista “parafuso_alturas”, que irá armazenar as posições dos parafusos em relação à base da chapa.

Para esse cálculo considera-se que a quantidade de parafusos e suas posições são fixas, alterando apenas as medidas de acordo com as variáveis, desse modo, o armazenamento é feito a partir do cálculo das posições individuais, não de modo iterativo.

Finalmente, a função calcula “parafuso_hmax”, que corresponde à maior distância entre os parafusos da lista “parafuso_alturas”, indicando a posição máxima dos parafusos em relação à base da chapa.

A função retorna **parafuso_alturas** e **parafuso_hmax**.

4.2.2.3. Cálculo da Linha Neutra

A função “calcular_linha_neutra” é utilizada para determinar a posição da linha neutra em uma ligação, considerando as áreas resistentes e as posições dos parafusos. A linha neutra é uma linha teórica onde a deformação é nula durante a aplicação de cargas, sendo crucial para a distribuição de tensões ao longo da chapa.

A função resolve uma equação do segundo grau para determinar a posição da linha neutra com base nas áreas resistentes dos parafusos e nas suas distâncias em relação à base da chapa. A linha neutra representa a posição na chapa onde as tensões de tração e compressão se equilibram.

A função começa inicializando uma lista “parafuso_alturas_area”, que armazena os produtos da posição de cada parafuso com a sua área resistente.

A função calcula o produto da distância de cada parafuso com a área resistente, excluindo o parafuso inferior, que não contribui para o cálculo da linha neutra. A soma das áreas dos parafusos superiores “soma_ap” é obtida a partir dessa lista.

A posição da linha neutra é obtida resolvendo uma equação do segundo grau. O discriminante é calculado para verificar a existência de soluções reais para a equação. Caso o discriminante seja negativo, a função gera um erro, indicando que não há solução real.

A função calcula as duas raízes da equação quadrática e seleciona o menor valor válido entre as raízes da equação e retorna a posição da linha neutra.

A função retorna y_{LN} (linha neutra).

4.2.2.4. Cálculo da Inércia da Chapa Parafusada

A função “calcular_inercia_parafusada” é responsável por calcular a inércia de uma chapa com parafusos em relação à linha neutra, levando em consideração a geometria da chapa e a contribuição dos parafusos. A inércia é uma grandeza importante na análise estrutural, pois influencia a resistência à flexão da peça.

A inércia da chapa parafusada é calculada considerando a inércia dos parafusos e a inércia da chapa em relação à linha neutra. Essa análise permite determinar a capacidade da chapa de resistir a esforços de flexão, levando em conta a contribuição dos parafusos. A inércia do parafuso é calculada com base no diâmetro, conforme Equação (19).

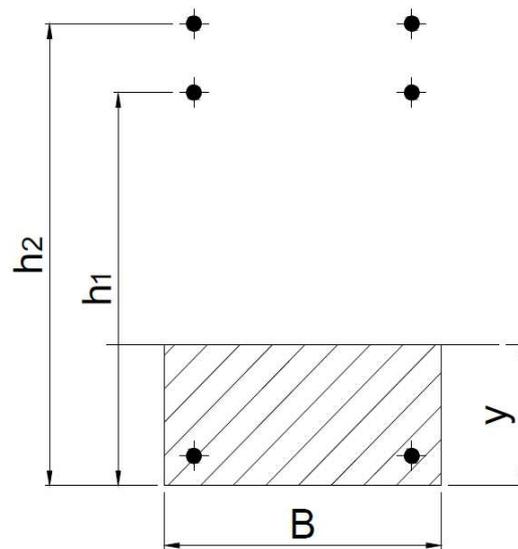
A função ignora o primeiro parafuso (inferior) e utiliza apenas os parafusos superiores para calcular suas distâncias à linha neutra, pois dada a posição do parafuso, ele está na região de tensões comprimidas, não contribuindo para a resistência da ligação e distribuição das tensões. A inércia adicional de cada parafuso é calculada somando a inércia do parafuso com o

produto da área resistente do parafuso pela distância ao quadrado da linha neutra, que segue a equação do teorema dos eixos paralelos (Steiner), conforme Equação (21).

A inércia da chapa em relação à linha neutra é calculada, conforme Equação (22). B_2 apresentado na equação é substituído pela largura da chapa ($chapa_l$).

A inércia total da chapa parafusada é a soma da inércia da chapa e das contribuições de inércia dos parafusos, conforme Equação (23), ilustrado pela Figura 19.

Figura 19 – Representação da inércia da chapa e das contribuições de inércia dos parafusos



Fonte: Maia (2023)

A função retorna $I_chapa_parafusada$, I_chapa , I_furos , I_furo e $parafuso_distancias$.

4.2.2.5. Cálculo das Solicitações nos Parafusos

A função “calcular_solicitacoes_parafusos” é utilizada para determinar os esforços de cisalhamento e de tração que agem sobre os parafusos de uma ligação. Esses valores são fundamentais para avaliar a resistência dos parafusos em relação aos esforços aplicados.

A força solicitante de cisalhamento ($F_{v,sd}$) é determinado dividindo a força de corte V_d aplicada pela quantidade de parafusos, conforme Equação (9).

A força solicitante de tração ($F_{t,sd}$) é calculado com base no momento fletor M_d , levando em consideração a inércia da chapa parafusada, na distância do parafuso mais distante da linha neutra e a área resistente do parafuso A_b , conforme Equação (24).

A função retorna $F_{v,Sd}$ e $F_{t,Sd}$.

4.2.2.6. Cálculo das Resistências dos Parafusos

A função “calcular_resistencias_parafuso” calcula as resistências ao cisalhamento e à tração dos parafusos, além da interação entre essas solicitações.

A resistência ao cisalhamento ($F_{v,Rd}$) de um parafuso é calculada utilizando a resistência última (f_{ub}) e a área resistente do parafuso (A_b), aplicando um coeficiente de ponderação ($\gamma_{a2} = 1,35$) (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (25).

A resistência à tração ($F_{t,Rd}$) é calculada considerando a resistência última (f_{ub}) e a área resistente do parafuso (A_b), aplicando um coeficiente de ponderação ($\gamma_{a2} = 1,35$) (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (26).

A resistência combinada de cisalhamento e tração ($F_{t,Sd,máx}$) é calculada para verificar a interação entre as duas solicitações. Essa interação considera a resistência última (f_{ub}), a área resistente (A_b), o coeficiente de ponderação ($\gamma_{a2} = 1,35$), e a solicitação de cisalhamento $F_{v,Sd}$ (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (27).

A função retorna $F_{v,Rd}$, $F_{t,Rd}$ e $F_{t,Sd,máx}$.

4.2.2.7. Função para verificar Espessuras e Distâncias

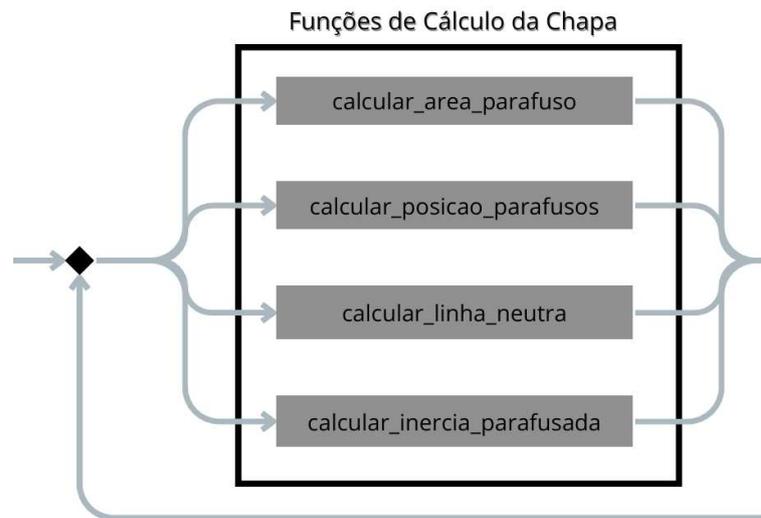
A função “propriedades_parafusada” compara a espessura da chapa e da mesa do pilar. A menor espessura é identificada e a origem dessa espessura (se é a chapa ou a mesa do pilar) é registrada.

A função retorna **menor_espessura_parafusada**, **menor_distancia_parafuso** e **origem_menor_espessura_parafusada**.

4.2.3. Funções de Cálculo da Chapa

As funções de cálculo da chapa irão calcular as dimensões da chapa o cálculo das variáveis e equações relacionadas as resistências ou solicitações atuantes na chapa de ligação, conforme critérios apresentados a seguir. A Figura 20 apresenta a parcela do fluxograma referente às Funções de Cálculo da Chapa.

Figura 20 – Fluxograma da Função de Cálculo da Cantoneira



Fonte: Autor (2025)

4.2.3.1. Cálculo das Dimensões da Chapa

A função “calcular_chapa_base” é utilizada para determinar as dimensões mínimas da chapa da ligação entre a viga e o pilar, considerando a altura da viga, a largura da mesa da viga e o diâmetro do parafuso. Essas dimensões são essenciais para garantir a resistência e a estabilidade da ligação.

A altura da chapa é calculada somando a altura da viga e uma folga adicional relacionada ao diâmetro do parafuso. Para padronizar os resultados, em cálculo utilizou-se medidas múltiplas de 10mm, utilizou-se 4 vezes o espaçamento pois considera-se a distância da borda ao parafuso e do parafuso à mesa da viga, nas regiões superior e inferior, conforme Equação (55).

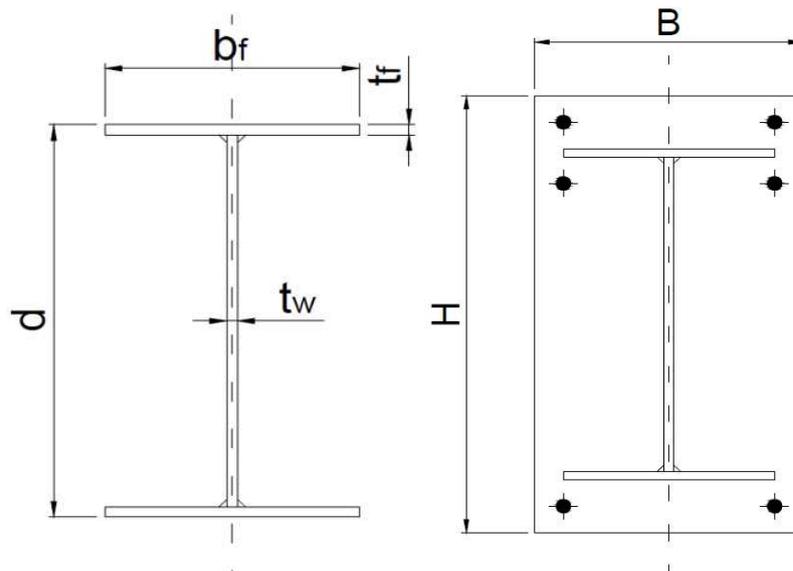
$$chapa_h = viga_h + 4 \cdot ce_1 \cdot d_b \quad (55)$$

A largura da chapa é calculada de forma semelhante, levando em conta a largura da mesa da viga e o diâmetro do parafuso. Em cálculo utilizou-se medidas múltiplas de 10mm, utilizou-se 2 vezes o espaçamento pois considera-se a distância da borda ao parafuso, nos lados esquerdo e direito da viga, conforme Equação (56).

$$chapa_l = mesa_{bf} + 2 \cdot ce_1 \cdot d_b \quad (56)$$

A função também verifica se a largura da chapa calculada não ultrapassa a largura máxima permitida do pilar. Se exceder, a largura da chapa é ajustada para esse valor máximo. A Figura 21 mostra as dimensões da chapa e da viga.

Figura 21 – Dimensões da chapa de ligação



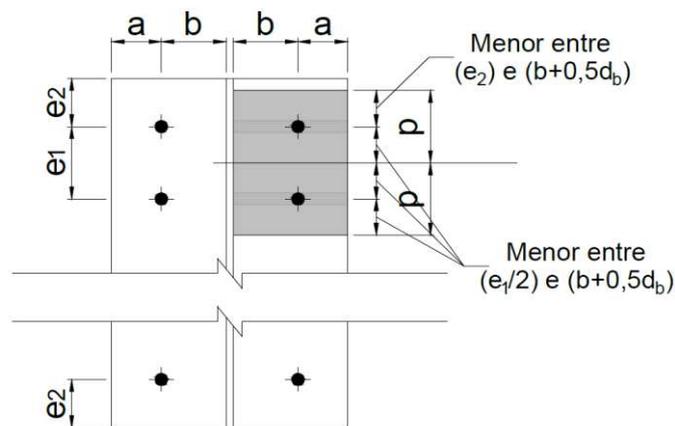
Fonte: Maia (2023)

A função retorna **chapa_h** e **chapa_l**.

4.2.3.2. Cálculo dos Parâmetros da Chapa

A função “calcular_parametros_chapa” é utilizada para determinar os parâmetros relacionados ao espaçamento e às dimensões da chapa, levando em consideração a altura da viga, as dimensões da chapa e o diâmetro do parafuso. A Figura 22 mostra o modelo a ser considerado para determinação dos parâmetros utilizados para cálculo da espessura da chapa.

Figura 22 – Modelo com parâmetros da chapa de ligação



Fonte: Maia (2023)

Os valores **a** e **b** são representados como “**ac**” e “**bc**” no código, respectivamente, e são calculados conforme as Equações (57) e (58).

Onde:

a representa o espaçamento da borda da chapa ao centro do furo, sendo definido pela Equação (57).

$$a = ce_1 \cdot d_b \quad (57)$$

b representa o espaçamento entre o centro do furo e a mesa da viga. Calcula o espaço restante na altura disponível para a folga, conforme Equação (58).

$$b = \frac{chapa_h - viga_h}{2} - a \quad (58)$$

Os valores e_1 e e_2 são calculados para determinar o espaço restante na largura da chapa, conforme Equações (59) e (60).

Onde:

e_2 representa o espaçamento da borda da chapa ao centro do furo, sendo definido como Equação (59).

$$e_2 = ce_1 \cdot d_b \quad (59)$$

e_1 representa o espaçamento entre os centros dos dois furos no sentido horizontal. Calcula o espaço disponível na largura da chapa, conforme a Equação (60).

$$e_1 = chapa_l - 2 \cdot d_b \quad (60)$$

Os valores p_1 e p_2 são definidos para determinar o menor valor de p (ABNT NBR 8800:2024) (Figura 11).

Onde:

$$p_1 \text{ é o menor entre } e_2 \text{ e } b + \frac{d_b}{2}$$

$$p_2 \text{ é o menor entre } \frac{e_1}{2} \text{ e } b + \frac{d_b}{2}$$

As combinações possíveis de p são calculadas e o menor valor é determinado. O valor de p é o menor entre $p_1 + p_2$ e $p_2 + p_2$ (ABNT NBR 8800:2024).

A função retorna a , b , e_1 , e_2 e p .

4.2.3.3. Cálculo das Espessuras da Chapa

A função “calcular_espessuras” é responsável por determinar as espessuras mínima e máxima da chapa em uma ligação parafusada, levando em consideração os esforços aplicados, as propriedades geométricas da ligação e os parâmetros do material.

A espessura mínima (t_{min}) da chapa é determinada pela Equação (61), que leva em consideração o esforço de tração no parafuso ($F_{t,SD}$), a distância b , o diâmetro do parafuso (d_b) e a tensão de escoamento do material (f_y). A partir dela define-se a menor espessura para que a chapa suporte a força de tração.

$$t_{min} = \sqrt{\frac{4,44 \cdot F_{t,SD} \cdot \left(b - \frac{d_b}{2}\right)}{\left(p \cdot f_y \cdot \left(1 + \frac{p - d_b}{p}\right)\right)}} \quad (61)$$

A espessura máxima (t_{max}) é obtida por uma equação similar à de t_{min} , mas sem o fator adicional relacionado à distribuição de esforços, apresentado na Equação (62). A partir do t_{max} , é possível definir se haverá ou não acréscimo no esforço de tração do parafuso ($F_{t,SD}$) pelo efeito de alavanca. Caso a chapa seja maior que t_{max} não haverá efeito alavanca.

$$t_{max} = \sqrt{\frac{4,44 \cdot F_{t,SD} \cdot \left(b - \frac{d_b}{2}\right)}{(p \cdot f_y)}} \quad (62)$$

A função retorna t_{min} e t_{max} .

4.2.3.4. Cálculo do Acréscimo de Carga por Efeito de Alavanca

A função “calcular_acrescimo_tracao” é utilizada para recalculer a força de tração solicitante ($F_{t,SD}$) considerando o efeito de alavanca, caso a espessura da chapa esteja abaixo do limite máximo t_{max} . Esse efeito resulta em um acréscimo na força de tração devido à deformação excessiva da chapa.

O acréscimo Q na força de tração solicitante ocorre quando a espessura da chapa é menor que t_{max} . O efeito alavanca é calculado pela Equação (63), levando em consideração a deformação da chapa.

$$Q = \frac{F_{t_{sd}} \cdot \left(b - \frac{d_b}{2} \right) - \left(\frac{p \cdot chapa_t^2}{4,44} \cdot fy \right)}{a + \frac{d_b}{2}} \quad (63)$$

Caso haja acréscimo devido ao efeito de alavanca, a nova força de tração solicitante $F_{t,SdQ}$ será a força original $F_{t,Sd}$ somada ao acréscimo Q , conforme a Equação (64).

$$F_{t,SdQ} = F_{t,Sd} + Q \quad (64)$$

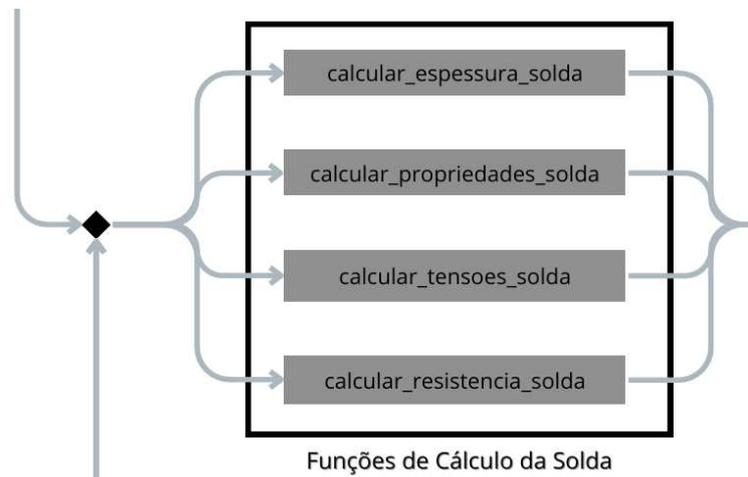
Se a espessura da chapa for maior que t_{max} , o valor de Q será zero, e a força de tração solicitante permanecerá inalterada.

A função retorna Q e $F_{t,SdQ}$.

4.2.4. Funções de Cálculo da Solda

As funções de cálculo da solda utilizam os dados obtidos através dos parâmetros escolhidos pelo usuário para executar o cálculo das variáveis e equações relacionadas as resistências ou solicitações atuantes na ligação soldada. A Figura 23 apresenta a parcela do fluxograma referente às Funções de Cálculo da Solda.

Figura 23 – Fluxograma das Funções de Cálculo da Solda



Funções de Cálculo da Solda
Fonte: Autor (2025)

4.2.4.1. Cálculo da Espessura da Solda

A função “calcular_espessura_solda” é responsável por calcular a espessura da solda necessária para a ligação entre a chapa e a viga, considerando as espessuras dos materiais envolvidos. Esse processo de cálculo é similar ao executado em 4.1.4.1, com a diferença que se faz a verificação separadamente entre as soldas na mesa da viga e na alma da viga. Essa

diferenciação visa otimizar o projeto pois a espessura da alma da viga é menor que a espessura da mesa da viga o que iria limitar a capacidade de solda na mesa da viga.

A função compara a espessura da chapa e a espessura da alma da viga para determinar uma das menores espessuras soldadas e compara a espessura da chapa e a espessura da mesa da viga para determinar a outra menor espessura soldada. As origens dessas espessuras são registradas.

A função itera pelas espessuras de solda disponíveis e verifica se a menor espessura soldada está dentro dos limites definidos (mínimo e máximo). Se encontrar uma espessura válida, registra a espessura mínima da perna de solda de filete.

Se não encontrar uma espessura mínima apropriada, a função retorna uma mensagem de erro. Caso contrário, retorna a espessura mínima da solda, a menor espessura soldada e a origem da espessura soldada.

A função retorna **solda_espessura_minima1**, **menor_espessura_soldada1**, **origem_menor_espessura_soldada1**, **solda_espessura_minima2**, **menor_espessura_soldada2** e **origem_menor_espessura_soldada2**.

4.2.4.2. Função para Calcular as Propriedades da Solda

A função “calcular_propriedades_solda” é utilizada para calcular a perna da solda, a área total da solda e o momento de inércia da solda, considerando as dimensões da viga e as espessuras das chapas envolvidas na solda.

Garganta Efetiva da Solda (a_1 e a_2)

A garganta efetiva da solda (a) é calculada como 70% da perna da solda (XEREZ NETO; CUNHA, 2020). Essa proporção é uma diretriz comum na prática de soldagem, garantindo que a solda tenha resistência suficiente em relação aos materiais que está unindo. Como trabalha-se com espessuras diferentes de solda na alma e na mesa da viga, terão 2 valores de garganta efetiva, conforme Equação (30).

Afim de garantir o máximo de eficiência nas soldas, considerou-se duas gargantas efetivas, sendo uma definida na alma da viga (a_1) e a seguinte na mesa da viga (a_2). Essa separação se deve ao fato que a espessura da solda é limitada pela menor espessura soldada,

com isso, ao atingir o limite máximo da solda na alma da viga é possível que espessura da solda na mesa da viga continue aumentando até o seu limite, antes de alterar o tipo de eletrodo.

A área total da solda (A_w) é calculada somando as áreas das soldas ao longo da alma e das mesas da viga. O cálculo leva em consideração as dimensões da viga, como a altura da viga, a largura das mesas, a espessura da alma e a espessura das mesas. Tem-se a área de solda total e área de solda na alma, conforme Equações (65) e (66).

$$A_{w_{alma}} = 2 \cdot 0,85 \cdot (viga_h - mesa_{tf}) \cdot a_1 \quad (65)$$

$$A_{w_{total}} = A_{w_{alma}} + 2 \cdot mesa_{bf} \cdot a_2 + 4 \cdot \frac{(mesa_{bf} - alma_{tw})}{2} \cdot a_2 \quad (66)$$

O momento de inércia da solda I_w é calculado em três partes: duas para as soldas nas mesas, na parte externa ($I_{w_{x1}}$) e interna da mesa ($I_{w_{x2}}$), e uma para a solda na alma (I_{w_y}), com base nas dimensões e nas distâncias das áreas em relação ao eixo de referência, conforme apresentado na Figura 24. Essas partes são somadas para obter o momento de inércia total, conforme Equações (67), (68) e (69).

$$I_{w_{x1}} = \frac{a_2 \cdot mesa_{bf}^3}{12} + (a_2 \cdot mesa_{bf}) \cdot \left(\frac{viga_h + a_2}{2}\right)^2 \quad (67)$$

$$I_{w_{x2}} = \frac{a_2 \cdot \left(\frac{(mesa_{bf} - alma_{tw})}{2}\right)^3}{12} + \left(a_2 \cdot \frac{(mesa_{bf} - alma_{tw})}{2}\right) \cdot \left(\frac{viga_h - 2 \cdot mesa_{tf} - a_2}{2}\right)^2 \quad (68)$$

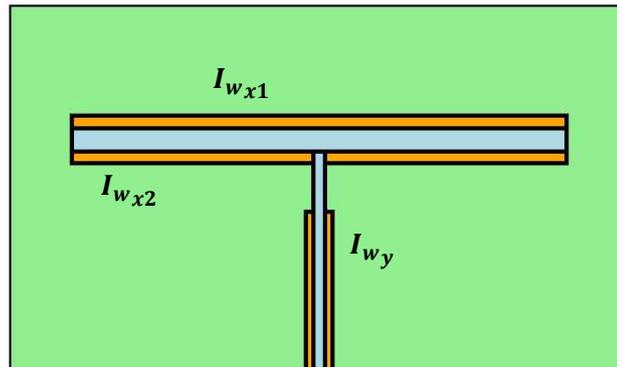
$$I_{w_y} = \frac{a_1 \cdot (0,85 \cdot (viga_h - mesa_{tf}))^3}{12} + \left(a_1 \cdot (0,85 \cdot (viga_h - mesa_{tf}))\right) \cdot 0^2 \quad (69)$$

Obtendo-se os valores das inércias de cada filete, pode-se obter a inércia total da solda, conforme Equação (70).

$$I_w = 2 \cdot I_{w_{x1}} + 4 \cdot I_{w_{x2}} + 2 \cdot I_{w_y} \quad (70)$$

A função retorna a_1 , a_2 , $A_{w_{total}}$, $A_{w_{alma}}$ e I_w .

Figura 24 – Demonstração das parcelas de inércia da solda



Fonte: Autor (2025)

4.2.4.3. Cálculo das Tensões na Solda

A função “calcular_tensoes_solda” é utilizada para determinar as tensões de cisalhamento e tensões normais na alma e na mesa de uma viga, resultantes dos esforços aplicados. Ela considera as tensões atuantes na solda e no metal base, tanto na alma quanto na mesa, e retorna as tensões críticas.

Cálculo da Tensão de Cisalhamento na Alma (f_v):

A tensão de cisalhamento na alma é calculada dividindo a força cortante atuante pela área da alma da viga (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (71).

$$f_v = \frac{V_d}{A_{w_{alma}}} \quad (71)$$

Cálculo da Tensão Normal Máxima na Mesa (f_{m_a}):

A tensão normal na mesa é gerada pelo momento fletor aplicado (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (72).

$$f_{m_a} = \left(\frac{M_d}{I_w} \right) \cdot \frac{(viga_h + a_2)}{2} \quad (72)$$

Essa equação considera a altura da viga e a garganta efetiva da solda a_2 para determinar a posição de cálculo.

Cálculo da Tensão Resultante na Alma (f_{m_b}):

A tensão resultante na alma é função da altura da alma e da espessura da mesa (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (73).

$$f_{m_b} = \left(\frac{M_d}{I_w} \right) \cdot \frac{0,85 \cdot (viga_h - 2 \cdot mesa_{tf})}{2} \quad (73)$$

Tensão Resultante na Mesa (f_{w_a}):

A tensão resultante na mesa da solda é assumida como sendo a mesma que a tensão normal máxima (f_{m_a}).

Tensão Resultante na Alma (f_{w_b}):

A tensão resultante na alma da solda é a combinação das tensões de cisalhamento e as tensões normais (f_{m_b}) (ABNT NBR 8800:2024), calculadas pela Equação (74).

$$f_{w_b} = \sqrt{f_v^2 + f_{m_b}^2} \quad (74)$$

Cálculo das Tensões no Metal Base (f_{MB_a} e f_{MB_b}):

As tensões no metal base são 70% das tensões na solda, conforme padrões de cálculo (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equações (75) e (76).

$$f_{MB_a} = 0,7 \cdot f_{w_a} \quad (75)$$

$$f_{MB_b} = 0,7 \cdot f_{w_b} \quad (76)$$

Solicitações Críticas:

- **Tensão Crítica na Solda ($f_{w_{sd}}$):** A maior tensão entre f_{w_a} e f_{w_b} .
- **Tensão Crítica no Metal Base ($f_{MB_{sd}}$):** A maior tensão entre f_{MB_a} e f_{MB_b} .

A função retorna f_v , f_{m_a} , f_{m_b} , f_{w_a} , f_{w_b} , f_{MB_a} , f_{MB_b} , $f_{w_{sd}}$ e $f_{MB_{sd}}$.

4.2.4.4. Cálculo da Resistência na Solda

A função “calcular_resistencia_solda” é usada para determinar as resistências de uma solda em relação à ruptura do metal da solda e ao escoamento do metal base. Esses cálculos são importantes para garantir que a solda seja dimensionada adequadamente para resistir às forças aplicadas.

A resistência à ruptura da solda ($f_{w,Rd}$) é calculada pela tensão de ruptura do eletrodo utilizada na solda, dividida pelo coeficiente de ponderação ($\gamma_{a2} = 1,35$), considerando uma

constante de 0,6 conforme a prática de cálculo (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (47).

A resistência ao escoamento do metal base ($f_{MB,Rd}$) é calculada usando o limite de escoamento do material base (f_y) e o coeficiente de ponderação ($\gamma_{a1} = 1,10$) (ABNT NBR 8800:2024), conforme Equação (48).

A função retorna $f_{w,Rd}$ e $f_{MB,Rd}$:

4.2.5. Verificação das ligações

4.2.5.1. Verificação das Forças Aplicadas nos Parafusos

Na função de verificação dos parafusos, várias solicitações atuantes são comparadas com suas resistências correspondentes. O objetivo é garantir que os parafusos sejam capazes de suportar as solicitações de cisalhamento, tração e a combinação dessas solicitações. A Figura 25 apresenta a parcela do fluxograma referente à etapa de verificação da ligação parafusada.

Figura 25 – Fluxograma da Verificação da Ligação Parafusada



Fonte: Autor (2025)

Força de Cisalhamento Solicitante ($F_{v,Sd}$)

Se a força de cisalhamento solicitante ($F_{v,Sd}$) for maior que a resistência ($F_{v,Rd}$), o parafuso não terá resistência suficiente para suportar o esforço cortante, indicando a necessidade de ajuste, conforme Equação (49).

Força de Tração Solicitante ($F_{t,Sd}$)

Se $F_{t,Sd}$ for maior que $F_{t,Rd}$, o parafuso pode falhar por tração, e será necessário ajustar os parâmetros, conforme Equação (50).

Forças Combinadas de Cisalhamento e Tração

Verifica-se também se as resistências combinadas de cisalhamento e tração ($F_{t,Sd,máx}$) suportam a força de tração $F_{t,Sd}$, conforme Equação (51).

Ações em Caso de Não Conformidade

Se qualquer uma das verificações acima não for atendida, a função executa as seguintes ações:

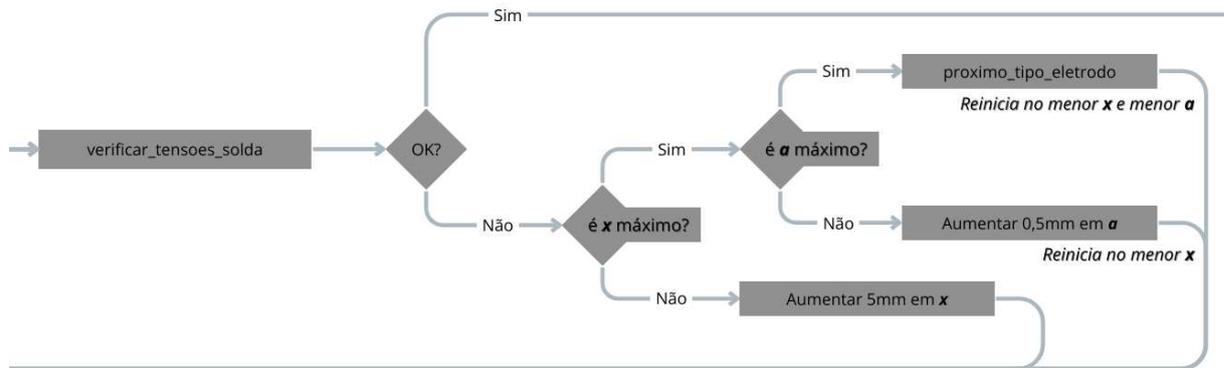
- **Ajuste do Diâmetro:** Se as forças aplicadas excederem as resistências, a função tenta ajustar o diâmetro do parafuso (d_b), selecionando o próximo diâmetro disponível usando a função “proximo_diametro_parafuso”.
- **Ajuste do Tipo de Parafuso:** Se não houver mais diâmetros disponíveis, a função passa a tentar um novo **tipo de parafuso**, com diferentes propriedades de resistência ao escoamento e ruptura, usando a função “proximo_tipo_parafuso”.

A função retorna d_b , `iteracoes_p`, `escolha_diametro_iterativo`, `escolha_tipo_iterativo` e `parafuso_tipo`.

4.2.5.2. Verificação das Forças Aplicadas na Solda

Na função de verificação das tensões na solda, várias forças e tensões atuantes são comparadas com suas resistências correspondentes. O objetivo é garantir que a solda selecionada seja capaz de suportar as forças de cisalhamento e momento aplicados, sem exceder as resistências do material da solda e do metal base. A Figura 26 apresenta a parcela do fluxograma referente à etapa de verificação da ligação soldada.

Figura 26 – Fluxograma da Verificação da Ligação Soldada



Fonte: Autor (2025)

Tensão na Garganta Efetiva da Solda ($f_{w,sd}$)

Se $f_{w,sd}$ for maior que $f_{w,rd}$, a solda pode falhar por cisalhamento, indicando a necessidade de ajuste da perna de solda ou da espessura da solda, conforme Equação (53).

Tensão no Metal Base ($f_{MB,sd}$)

Se $f_{MB,sd}$ exceder $f_{MB,rd}$, o metal base pode entrar em escoamento, exigindo ajuste dos parâmetros da solda ou a seleção de um novo eletrodo, conforme Equação (54).

Ações em Caso de Não Conformidade

Se qualquer uma das verificações não for atendida, o código toma as seguintes ações para ajustar os parâmetros e tentar satisfazer as condições:

- **Ajuste da Espessura da Solda:** Se $f_{w,sd} > f_{w,rd}$ ou $f_{MB,sd} > f_{MB,rd}$, o código aumenta espessura da solda na mesa e na alma iterativamente até atingir o limite da **menor espessura soldada** entre os materiais, valido para ambas as soldas, processo só se encerra caso ambas cheguem ao limite, indo assim, a próxima etapa. Caso a espessura já tenha atingido o limite, o código tenta ajustar o tipo de eletrodo.
- **Ajuste do Tipo de Eletrodo:** Se os ajustes de comprimento e espessura não forem suficientes, o código seleciona um novo **tipo de eletrodo** com maior resistência, utilizando a função “proximo_tipo_eletrodo”. Após a troca do eletrodo, o comprimento da perna de solda x e a espessura são reiniciados e o processo de verificação é repetido.

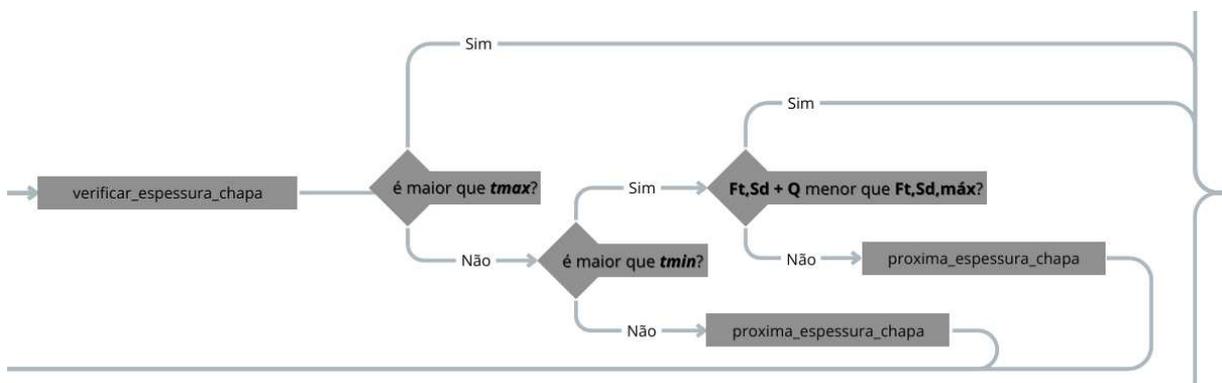
- **Ajuste na Espessura da chapa:** Se os ajustes de espessura da solda e tipo de eletrodo não forem suficientes, o código seleciona uma nova **espessura de chapa**, utilizando a função “proxima_espessura_chapa”. Após a troca da chapa, a espessura da solda e o eletrodo são reiniciados e o processo de verificação é repetido.

A função retorna **iteracoes_s**, **solda_espessura_iterativo1**, **solda_espessura_iterativo2**, **solda_eletrodo**, **escolha_eletrodo_iterativo**, **chapa** e **escolha_chapa_iterativo**.

4.2.5.3. Verificação da Espessura da Chapa

A função de verificação da espessura da chapa tem como objetivo garantir que a chapa escolhida atenda aos requisitos de projeto, considerando tanto a espessura mínima necessária quanto a espessura máxima permitida. O processo envolve iterar sobre diferentes espessuras de chapa até encontrar uma que satisfaça todas as condições de resistência e limites de espessura. A Figura 27 apresenta a parcela do fluxograma referente à etapa de verificação da chapa de ligação.

Figura 27 – Fluxograma da Verificação da Chapa



Fonte: Autor (2025)

Comparação com os Limites de Espessura

- **t_{min} :** Se a espessura da chapa for menor que o valor mínimo definido, o código ajusta automaticamente para a próxima espessura disponível, até encontrar uma chapa que atenda a esse requisito.
- **t_{max} :** Se a chapa estiver entre o valor mínimo e o valor máximo, a função prossegue com o cálculo das tensões considerando o efeito alavanca. Se a espessura exceder o limite máximo, a função finaliza a verificação, visto que não ocorrerá efeito alavanca.

Cálculos de Tensão e Efeito Alavanca

Durante a verificação, a função calcula o incremento de tração causado pelo efeito alavanca na chapa, usando a função “calcular_acrescimo_tracao”. Se as tensões resultantes forem menores ou iguais à resistência à tração dos parafusos ($F_{t,Rd}$), a chapa é considerada adequada. Caso contrário, a função ajusta a espessura da chapa para a próxima disponível e repete o processo até encontrar uma espessura que satisfaça as condições.

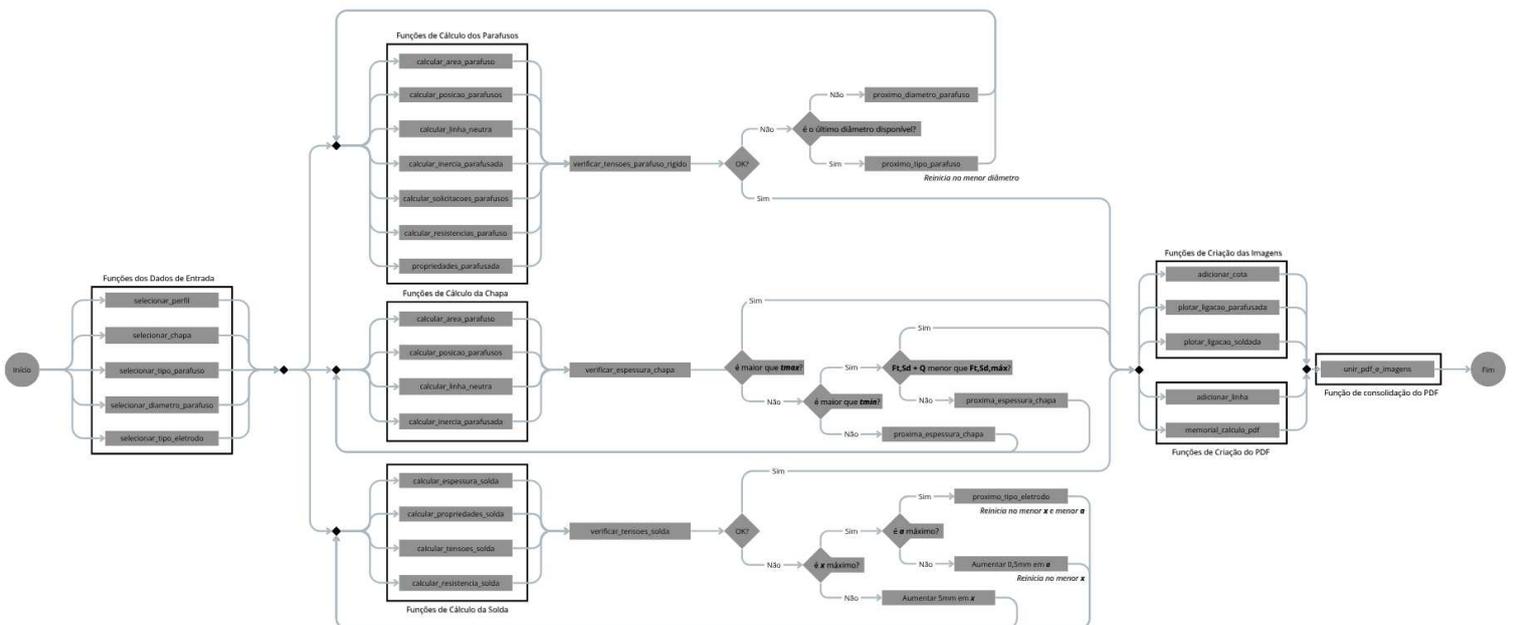
Ajustes Iterativos

A função realiza ajustes iterativos na espessura da chapa. A cada iteração, é verificado se a espessura atende aos limites estabelecidos. Se a espessura estiver adequada, a função realiza os cálculos de resistência e verifica as tensões. Caso a espessura não seja suficiente, o processo continua ajustando a espessura até que seja encontrada uma chapa que atenda às condições ou até que não haja mais espessuras disponíveis.

A função retorna **iteracoes_c**, **chapa** e **escolha_chapa_iterativo**.

O fluxograma apresentado na Figura 28, mostra detalhadamente as etapas de cálculo realizadas e as saídas programadas.

Figura 28 – Fluxograma da Ligação Viga-Pilar Rígido



Fonte: Autor (2025)

4.3. Funções de Plotagem

Ao fim dos processos de cálculo os valores são apresentados ao usuário através de um memorial de cálculo com todas as variáveis calculadas e todas as verificações e a plotagem das ligações. Através da codificação em Python, foram utilizadas outras funções para a criação das imagens cotadas e do memorial de cálculo por escrito que é consolidado e criado em PDF a cada vez que o código é aplicado.

Criação dos Desenhos Cotados

A função “adicionar_cota” acrescenta setas, linhas e legendas de medida em um eixo “Matplotlib”. Em “plotar_ligacao_parafusada”, o perfil da viga (mesa, alma e mesa) é desenhado com retângulos coloridos; a cantoneira recebe contornos, espessuras e furos representados por círculos e cruzetas. Em seguida, são calculados e marcados automaticamente os espaçamentos verticais e horizontais de cada elemento. De forma análoga, “plotar_ligacao_soldada” ilustra a chapa de viga, a cantoneira e o filete de solda, incluindo cotas de espessura, comprimento de soldagem e distância entre faces.

Composição do Memorial de Cálculo em PDF

As funções do “ReportLab” (“memorial_calculo_pdf” e “adicionar_linha”) constroem passo a passo um memorial de cálculo formatado, listando:

- Dados de entrada (forças, perfis, materiais e tipos de parafuso/solda)
- Resultados intermediários (número de parafusos, espaçamentos, posições, propriedades geométricas, esforços)
- Verificações de resistência, iterações e conclusões

Consolidação Final e Entrega ao Usuário

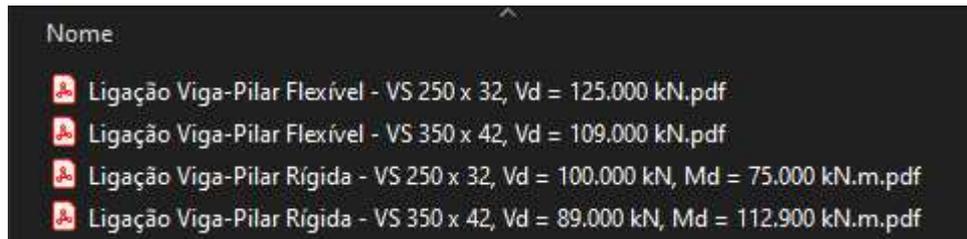
Ao terminar o memorial textual, o código salva um PDF cujo nome inclui o perfil e a carga de projeto. Em “unir_pdf_e_imagens”, todas as figuras geradas (PNG) são inseridas em um PDF temporário e, em seguida, mescladas ao documento original, garantindo que texto e ilustrações fiquem em um único arquivo para visualização ou impressão.

Toda essa estrutura modular, escrita em Python, torna o processo reprodutível, rastreável e de simples manutenção: bastam novos parâmetros de perfil ou carga para que o memorial e as ilustrações sejam refeitos automaticamente, sem intervenção manual.

5. RESULTADOS

Após a execução, o código cria arquivos com os resultados que ficam salvos na pasta onde os códigos estão salvos, renomeando os arquivos de acordo com as características selecionadas, de tipo de ligação, perfil e carregamentos, conforme a Figura 14.

Figura 29 – Plotagem dos resultados



Fonte: Autor (2025)

Essa saída possibilita a fácil identificação do resultado para o cálculo executado e organização dos arquivos criados de acordo com os parâmetros utilizados.

A seguir demonstra-se como o código é executado dentro de um software livre de linguagem Python. Para o presente trabalho, utilizou-se o software Spyder.

5.1. Ligação Viga-Pilar Flexível – VS 350 x 42 ($V_d = 109\text{kN}$)

Inicia-se executando o código, após isso o software faz a leitura do código de acordo com a lógica estrutura e solicita os dados ao usuário. A Figura 30 mostra os dados de entrada da ligação viga-pilar flexível e as opções apresentadas ao usuário.

Figura 30 – Dados de entrada e opções da ligação viga-pilar flexível

```

In [1]: %runfile 'D:/Documentos/UFJF/Trabalho de Conclusão de Curso/Trabalho de
Conclusão de Curso II - ETU098/Trabalho/Viga-Pilar Flexível.py' --wdir
Digite a força cortante na viga (kN): 109

Selecione o perfil da viga:
Selecione o tipo de perfil:
1. Perfis VS
2. Perfis CS
3. Perfis CVS
Digite o número do tipo de perfil: 1

Selecione o perfil da viga:
1. VS 150 x 15
2. VS 150 x 18
3. VS 150 x 19
  
```

```
80. VS 650 x 128
81. VS 650 x 143
82. VS 650 x 155
Digite o número do perfil: 42

Selecione o perfil do pilar:
Selecione o tipo de perfil:
1. Perfis VS
2. Perfis CS
3. Perfis CVS
Digite o número do tipo de perfil: 3

Selecione o perfil da viga:
1. CVS 150 x 15
2. CVS 150 x 18
3. CVS 150 x 20
41. CVS 350 x 136
42. CVS 400 x 82
43. CVS 400 x 87
Digite o número do perfil: 21

Selecione a cantoneira de abas iguais:
1. L 12,70 x 3,18
2. L 15,88 x 3,18
3. L 19,05 x 3,18
48. L 152,40 x 19,05
49. L 203,20 x 15,88
50. L 203,20 x 19,05
Digite o número da cantoneira: 23

Selecione o tipo de parafuso:
1. ASTM A307 (12,5<db<38)
2. ASTM A325 (12,5<db<25)
3. ASTM A325 (32<db<38)
4. ASTM A490 (12,5<db<38)
Digite o número do parafuso: 2

Selecione o diâmetro do parafuso:
1. 12.5mm
2. 16.0mm
3. 19.0mm
4. 22.0mm
5. 25.0mm
Digite o número do diâmetro do parafuso: 1

Selecione o eletrodo:
1. CLASSE 6 OU 60
2. CLASSE 7 OU 70
3. CLASSE 8 OU 80
Digite o número do eletrodo: 1

Selecione onde a viga será fixada no pilar:
1. Mesa
2. Alma
Digite o número do local: 2
```

Fonte: Autor (2025)

A Figura 31 mostra os resultados obtidos para as seguintes entradas:

- **V_d :** 109,000 kN
- **Perfil da viga:** VS 350 x 42 (Viga fixada na Alma do Pilar)
- **Perfil do pilar:** CVS 300 x 47
- **Perfil da cantoneira:** L 63,50 x 6,35
- **Parafuso selecionado:** ASTM A325 12,5 mm
- **Eletrodo selecionado:** CLASSE 6 OU 60

Figura 31 – Resultados da ligação viga-pilar flexível

```

Iteração: 0
FVd: 16.509 kN <= Fv_Rd: 33.748 kN
RT_Sd: 11.672 kN <= Ft_Rd: 56.246 kN
RT_Sd: 11.672 kN <= Fvt_Rd: 43.628 kN
FVd: 16.509 kN <= RRd_c: 42.333 kN
As tensões atendem a todas as resistências.

Iteração: 0
fwSd (18.814 kN/cm2) > FwRd (18.444 kN/cm2)
As tensões não atendem às resistências. Necessário ajustar parâmetros.

Acréscimo de 5 mm na perna de solda, novo comprimento: 30.0 mm

Iteração: 1
fwSd (17.424 kN/cm2) <= FwRd (18.444 kN/cm2)
fMBSd (12.197 kN/cm2) <= FMBRd (13.636 kN/cm2)
As tensões atendem a ambas as resistências.

```

Fonte: Autor (2025)

Após a execução e as verificações das solicitações e resistências, o código irá apresentar os resultados em um memorial de cálculo resumido e uma plotagem das ligações, conforme resultados obtidos. As Figuras 32 a 35 mostram as etapas de verificação da ligação e resultados no arquivo de memorial de cálculo plotado em PDF.

Figura 32 – Especificações selecionadas ou finais

Memorial de Cálculo

Força cortante na viga: 109.000 kN

Perfis selecionados ($f_y = 250$ MPa, $f_u = 400$ MPa):

Perfil da viga: VS 350 x 42

Perfil do pilar: CVS 300 x 47

Viga está fixada na Alma do Pilar

Parafuso selecionado:

Tipo de parafuso: ASTM A325 ($f_{yb} = 635$ MPa, $f_{ub} = 825$ MPa)

Diâmetro do parafuso: 12.5 mm ($A_b = 1.227$ cm²)

Cantoneira selecionada:

Perfil da cantoneira: L 63,50 x 6,35 ($b = 63.5$ mm, $t = 6.35$ mm)

Eletrodo selecionado:

Tipo de eletrodo: CLASSE 6 OU 60 ($F_w = 60$ ksi, $F_w = 415$ MPa)

Fonte: Autor (2025)

Figura 33 – Verificação da ligação parafusada

Verificação da ligação parafusada:

Iterações: 0

FV_d (16.509 kN) \leq FvR_d (33.748 kN)

FV_d (16.509 kN) \leq RR_{dc} (42.333 kN)

RTS_d (11.479 kN) \leq FtR_d (56.246 kN)

RTS_d (11.479 kN) \leq $FvtR_d$ (43.628 kN)

As tensões atendem a todas as resistências.

Fonte: Autor (2025)

Figura 34 – Verificação da ligação soldada

Verificação da ligação soldada:

Iterações: 1

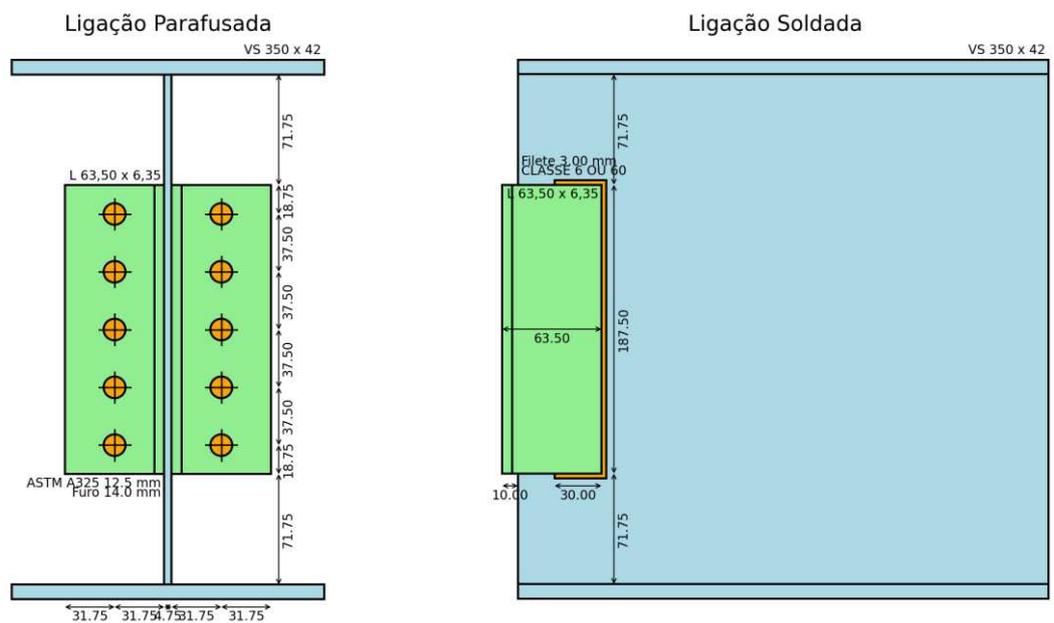
$f_w S_d$ (17.424 kN/cm²) \leq $F_w R_d$ (18.444 kN/cm²)

$f_{MB} S_d$ (12.197 kN/cm²) \leq $F_{MB} R_d$ (13.636 kN/cm²)

As tensões atendem a todas as resistências.

Fonte: Autor (2025)

Figura 35 – Detalhes da ligação



Fonte: Autor (2025)

O memorial de cálculo com os resultados completos pode ser verificado no Apêndice

A.

5.2. Ligação Viga-Pilar Rígida – VS 350 x 42 ($V_d = 89\text{kN}$ e $M_d = 112,9\text{kN.m}$)

Inicia-se executando o código, após isso o software faz a leitura do código de acordo com a lógica estrutura e solicita os dados ao usuário. A Figura 36 mostra os dados de entrada da ligação viga-pilar rígida e as opções apresentadas ao usuário.

Figura 36 – Dados de entrada da ligação viga-pilar rígida

```

In [4]: %runfile 'D:/Documentos/UFJF/Trabalho de Conclusão de Curso/Trabalho de
Conclusão de Curso II - ETU098/Trabalho/Viga-Pilar Rígido.py' --wdir
Digite a força cortante na viga (kN): 89

Digite o momento fletor na viga (kN.m): 112.9

Selecione o perfil da viga:
Selecione o tipo de perfil:
1. Perfis VS
2. Perfis CS
3. Perfis CVS
Digite o número do tipo de perfil: 1

Selecione o perfil:
1. VS 150 x 15
2. VS 150 x 18
3. VS 150 x 19
80. VS 650 x 128
81. VS 650 x 143
82. VS 650 x 155
Digite o número do perfil: 42

Selecione o perfil do pilar:
Selecione o tipo de perfil:
1. Perfis VS
2. Perfis CS
3. Perfis CVS
Digite o número do tipo de perfil: 2

Selecione o perfil:
1. CS 150 x 25
2. CS 150 x 29
3. CS 150 x 31
36. CS 350 x 108
37. CS 350 x 112
38. CS 350 x 119
Digite o número do perfil: 24

Selecione a chapa:
1. 4.75
2. 6.3
3. 8.0

```

```
30. 254.0
31. 280.0
32. 305.0
Digite o número da chapa: 7

Selecione o tipo de parafuso:
1. ASTM A307 (12,5<db<38)
2. ASTM A325 (12,5<db<25)
3. ASTM A325 (32<db<38)
4. ASTM A490 (12,5<db<38)
Digite o número do parafuso: 2

Selecione o diâmetro do parafuso:
1. 12.5mm
2. 16.0mm
3. 19.0mm
4. 22.0mm
5. 25.0mm
Digite o número do diâmetro do parafuso: 2

Selecione o eletrodo:
1. CLASSE 6 OU 60
2. CLASSE 7 OU 70
3. CLASSE 8 OU 80
Digite o número do eletrodo: 2
```

Fonte: Autor (2025)

A Figura 37 mostra os resultados obtidos para as seguintes entradas:

- V_d : 89,000 kN
- M_d : 112,900 kN/m²
- **Perfil da viga:** VS 350 x 42
- **Perfil do pilar:** CS 300 x 76
- **Espessura da chapa:** 19,0 mm
- **Parafuso selecionado:** ASTM A325 16,0 mm
- **Eletrodo selecionado:** CLASSE 7 OU 70

Figura 37 – Resultados da ligação viga-pilar rígida

```

Iteração: 0
A espessura 19.000 mm atende ao t_min 16.029 mm.

Iteração: 0
A espessura 19.000 mm está dentro do limite t_max 21.047 mm. Considere a
sobrecarga do efeito alavanca.

Ft_Sd_Q: 88.731 kN <= Fvt_Rd: 94.688 kN
As tensões nos parafusos, considerando o efeito alavanca, atendem a todas as
resistências.

Iteração: 0
Fv_Sd: 14.833 kN <= Fv_Rd: 55.292 kN
Ft_Sd: 80.367 kN <= Ft_Rd: 92.153 kN
Ft_Sd: 80.367 kN <= Fvt_Rd: 94.688 kN
As tensões nos parafusos atendem a todas as resistências.

Iteração: 0
fwSd (14.316 kN/cm2) <= FwRd (36.667 kN/cm2)
fMBSd (10.021 kN/cm2) <= FMBRd (13.636 kN/cm2)
As tensões atendem a ambas as resistências.

```

Fonte: Autor (2025)

Após a execução e as verificações das solicitações e resistências, o código irá apresentar os resultados em um memorial de cálculo resumido e uma plotagem das ligações, conforme resultados obtidos. As Figuras 38 a 41 mostram as etapas de verificação da ligação.

Figura 38 – Especificações selecionadas ou finais

Memorial de Cálculo

Força cortante na viga: 89.000 kN
 Momento fletor na viga: 112.900 kN

Perfis selecionados ($f_y = 250$ MPa, $f_u = 400$ MPa):

Perfil da viga: VS 350 x 42
 Perfil do pilar: CS 300 x 76

Parafuso selecionado:

Tipo de parafuso: ASTM A325 ($f_{yb} = 635$ MPa, $f_{ub} = 825$ MPa)
 Diâmetro do parafuso: 16.0 mm ($A_b = 2.011$ cm²)

Chapa selecionada:

Chapa (t): 19.000 mm

Eletrodo selecionado:

Tipo de eletrodo: CLASSE 7 OU 70 ($F_w = 70$ ksi, $F_w = 825$ MPa)

Fonte: Autor (2025)

Figura 39 – Verificação da ligação parafusada

Verificação da ligação parafusada:

Iterações: 0

F_{vSd} (14.833 kN) \leq F_{vRd} (55.292 kN)

F_{tSd} (80.367 kN) \leq F_{tRd} (92.153 kN)

F_{tSd} (80.367 kN) \leq F_{vRd} (94.688 kN)

As tensões atendem a todas as resistências.

Fonte: Autor (2025)

Figura 40 – Verificação da ligação soldada

Verificação da ligação soldada:

Iterações: 0

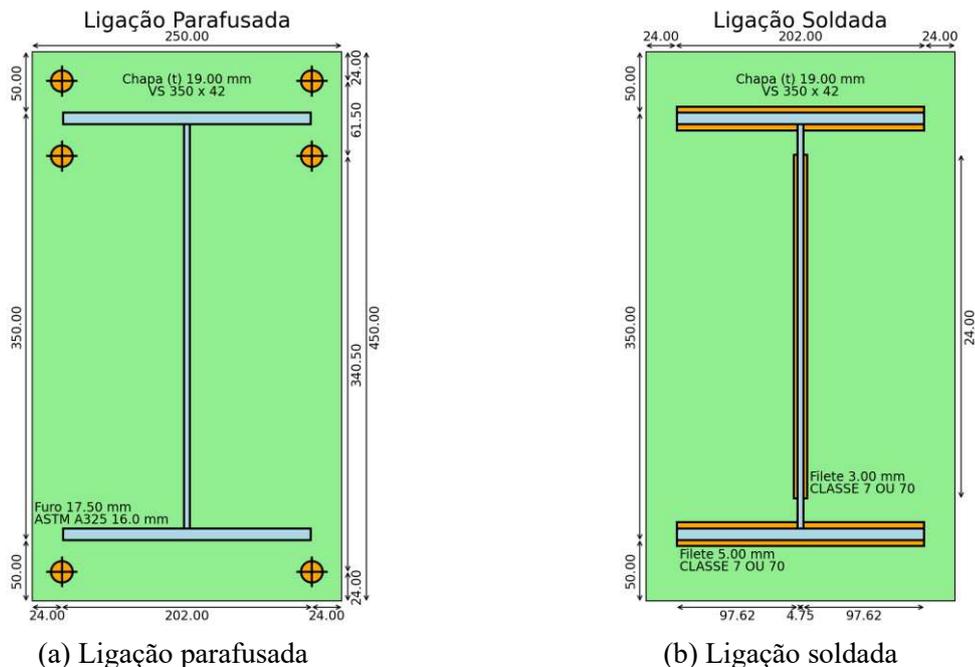
f_{wSd} (14.316 kN/cm²) \leq F_{wRd} (36.667 kN/cm²)

f_{MBSd} (10.021 kN/cm²) \leq F_{MBRd} (13.636 kN/cm²)

As tensões atendem a todas as resistências.

Fonte: Autor (2025)

Figura 41 – Detalhes da ligação



(a) Ligação parafusada

(b) Ligação soldada

Fonte: Autor (2025)

O memorial de cálculo com os resultados completos pode ser verificado no Apêndice

B.

6. CONCLUSÃO

A ferramenta desenvolvida para o cálculo de ligações viga-pilar, tanto rígidas quanto flexíveis, apresentou resultados altamente satisfatórios quando comparados com os exemplos práticos e da literatura, mostrando-se confiável e precisa. A precisão dos cálculos, corroborada pelos exemplos testados, valida o uso dessa aplicação em projetos estruturais, permitindo a redução do tempo gasto em cálculos repetitivos e, ao mesmo tempo, garantindo a conformidade com a ABNT NBR 8800:2024.

A ferramenta visa a um dimensionamento utilizando o menor custo, possibilitando ao usuário informar dados de entrada relacionados aos elementos estruturais, visando também à otimização dos recursos disponíveis, diminuindo a variabilidade de ligações similares e aumentando os níveis de racionalização do projeto.

6.1. Características importantes da ferramenta

6.1.1. Automação de processos repetitivos

Uma das maiores vantagens da ferramenta é a capacidade de realizar múltiplas iterações em frações de segundo, ajustando variáveis como o número de parafusos, espessura das soldas e perfis de aço conforme os critérios normativos. Isso evita o trabalho manual repetitivo que, além de consumir tempo, pode gerar erros humanos.

6.1.2. Comparação com cálculos manuais

Nos exemplos testados, os resultados gerados pela ferramenta foram coerentes com os obtidos manualmente, demonstrando precisão na verificação de solicitações e resistências. A validação foi feita por meio da comparação com planilhas e notas de aula, confirmando que a programação simula de forma adequada os métodos tradicionais de cálculo.

6.1.3. Flexibilidade e personalização

O código foi projetado para ser flexível, permitindo que o Engenheiro ajuste parâmetros como o tipo de parafuso, diâmetro, eletrodo de solda e perfis utilizados. Isso proporciona uma vantagem em relação a outros softwares comerciais, que muitas vezes limitam a personalização, especialmente no ajuste de fatores de segurança e materiais específicos do projeto.

6.1.4. Verificação simultânea de ligações soldadas e parafusadas

A ferramenta permite realizar a verificação de diferentes tipos de ligação (soldadas e parafusadas) de forma simultânea. Isso oferece ao Engenheiro uma visão abrangente das

alternativas disponíveis para a conexão entre viga e pilar, otimizando a escolha com base na eficiência econômica e técnica.

6.1.5. Geração automática de memorial de cálculo

Ao final de cada verificação, o código gera um memorial de cálculo detalhado, incluindo todos os passos e resultados obtidos. Esse documento é essencial para a revisão e validação dos cálculos por parte de outros profissionais e facilita a rastreabilidade do processo de projeto.

6.1.6. Representação gráfica das ligações

A criação automática de diagramas e gráficos que representam visualmente as ligações é um diferencial que melhora a compreensão dos resultados e facilita a comunicação dos mesmos para as equipes envolvidas no projeto.

6.2. Destaques dos códigos

6.2.1. Funções modulares

Cada parte do código foi organizada em funções específicas, o que facilita a manutenção e a extensão da ferramenta. Funções como “calcular_n_parafusos”, “calcular_solicitacoes_parafusos” e “verificar_ligacao_soldada” permitem que o programa seja escalável e adaptável a novos tipos de perfis ou condições de cálculo.

6.2.2. Validação e ajustes automáticos

O código implementa verificações automáticas para garantir que parâmetros normativos, como o espaçamento mínimo entre parafusos e a espessura mínima das soldas, sejam respeitados. Caso esses critérios não sejam atendidos, o programa ajusta os valores automaticamente, recalculando até que as condições normativas sejam satisfeitas.

6.2.3. Controle de iterações

As funções de cálculo iteram sobre as variáveis até encontrar uma solução viável para a ligação, o que elimina a necessidade de múltiplos cálculos manuais. A cada iteração, o número de parafusos ou a espessura da solda é ajustado, garantindo que a solução final seja otimizada.

6.2.4. Limitações

Os códigos desenvolvidos como um todo, atuam no suporte do projetista, facilitando o dimensionamento das ligações de estruturas em aço, eliminando ou reduzindo significativamente a necessidade de cálculos manuais, porém, não elimina a necessidade de um

projeto e validação de um engenheiro qualificado. As escolhas devem seguir os preceitos de rigidez adequados e condizentes com a ligação dimensionada.

6.3. Vantagens em relação ao cálculo manual

6.3.1. Economia de tempo

A ferramenta possibilita que centenas de combinações de perfis, parafusos e soldas sejam verificadas em segundos, algo que demoraria horas se feito manualmente. Esse ganho de produtividade é essencial em projetos de grande porte.

6.3.2. Redução de erros humanos

Ao automatizar os cálculos, a ferramenta elimina o risco de erros comuns em cálculos manuais, como esquecimentos ou arredondamentos incorretos.

6.3.3. Eficiência econômica

A ferramenta evita tanto o subdimensionamento quanto o superdimensionamento das ligações, resultando em um projeto mais otimizado, que utiliza os materiais de forma eficiente e segura, reduzindo custos.

6.4. Considerações

Em suma, a ferramenta de cálculo automatizada desenvolvida para o dimensionamento de ligações viga-pilar traz benefícios claros em termos de precisão, economia de tempo e segurança. Sua implementação, aliada à capacidade de gerar documentações e representações gráficas, a torna uma solução viável e eficiente para Engenheiros que buscam otimizar o processo de cálculo estrutural em aço.

6.5. Sugestão para Trabalhos Futuros

- Atualizações nas bases de dados
- Otimização das funções
- Criação de outros tipos de ligações
- Criação de aplicação executável
- Criação de interface gráfica (front-end)

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 8800:2024. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações**. Rio de Janeiro, 2024.

BELLEI, Ildony H.; PINHO, Fernando O.; PINHO, Mauro O. **Edifícios de múltiplos andares em aço**. 2. ed., São Paulo, PINI, 2008

GERDAU. **Ligações para estruturas de aço: guia prático para estruturas com perfis laminados**. São Paulo: Gerdau, 2014. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/blog-do-aco/publication-category/catalogos/>

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Ligações em estruturas de aço: volume 1**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2011.

Murray, Thomas M.; Sumner, Emmett A. **Fundamentos de Diseño de Conexiones com énfasis en el método de diseño por estados limites**. Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 2006. Disponível em https://files.uladech.edu.pe/docente/32862799/ESTRUCTURAS_ACERO/SESION_05/fundamentos_del_diseno_de_conexiones.pdf <

MAIA, Wanderson F. **Notas de Aula - Projeto de Estruturas Metálicas**. UFJF, Juiz de Fora, 2023.

XEREZ NETO, Jary de; CUNHA, Alex Sander de. **Estruturas metálicas: manual prático para projetos, dimensionamento e laudos técnicos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020. E-book.

Memorial de Cálculo

Força cortante na viga: 125.000 kN

Perfis selecionados ($f_y = 250$ MPa, $f_u = 400$ MPa):

Perfil da viga: VS 250 x 32

Perfil do pilar: CS 300 x 122

Viga está fixada na Mesa do Pilar

Parafuso selecionado:

Tipo de parafuso: ASTM A325 ($f_{yb} = 635$ MPa, $f_{ub} = 825$ MPa)

Diâmetro do parafuso: 12.5 mm ($A_b = 1.227$ cm²)

Cantoneira selecionada:

Perfil da cantoneira: L 63,50 x 6,35 ($b = 63.5$ mm, $t = 6.35$ mm)

Eletrodo selecionado:

Tipo de eletrodo: CLASSE 6 OU 60 ($F_w = 60$ ksi, $F_w = 415$ MPa)

Resultados dos Cálculos:

Cantoneira:

Comprimento total: 15.000 cm

Espaçamentos:

Entre parafuso e a borda: 1.875 cm

Entre parafusos: 3.750 cm

Parafusos:

Resistência unitária (RR_{dv}): 29.998 kN

n (calculado): 6.250

n (adotado): 8

Menor espessura parafusada: 6.350 cm

Origem da menor espessura parafusada: Cantoneira (t)

Menor espaçamento: 1.875 cm

Propriedades geométricas:

Linha neutra: 2.613 cm

Inércia: 240.972 cm⁴

Posição dos parafusos:

h_1 : 1.875 cm

h_2 : 5.625 cm

h_3 : 9.375 cm

h_4 : 13.125 cm

Solicitações nos parafusos:

Braços de alavanca:

z: 11.250 cm

e1: 5.506 cm

e2: 3.412 cm

Momentos:

M1: 344.141 kN.cm

M2: 213.281 kN.cm

Cisalhamento:

FV1: 15.625 kN

FV2: 18.958 kN

FVd: 24.567 kN

RTSd: 18.422 kN

Resistências dos parafusos:

FvRd: 29.998 kN

FtRd: 56.246 kN

FvtRd: 28.316 kN

RRd: 42.333 kN

Verificação da ligação parafusada:

Iterações: 0

FVd (24.567 kN) \leq FvRd (29.998 kN)

FVd (24.567 kN) \leq RRdc (42.333 kN)

RTSd (18.422 kN) \leq FtRd (56.246 kN)

RTSd (18.422 kN) \leq FvtRd (28.316 kN)

As tensões atendem a todas as resistências.

Solda:

Menor espessura soldada: 4.750 mm

Origem da menor espessura soldada.: Viga, Alma (tw)

Espessura mínima da solda: 3.000 mm

Espessura solda: 3.500 mm

Garganta efetiva: 2.450 mm

Dimensões:

x: 4.500 mm

y: 15.000 mm

Propriedades geométricas:

Aw: 5.880 cm²

Xcg: 0.844 cm

Ix: 188.930 cm⁴

Iy: 9.999 cm⁴

Ip: 198.929 cm⁴

r: 7.547 cm

Tensões na solda:

fv: 10.629 kN/cm²

fm: 13.057 kN/cm²

fmx: 12.975 kN/cm²

f_{my} : 1.460 kN/cm²

Tensões resultantes:

f_{wSd} : 17.734 kN/cm²

f_{MBSd} : 12.414 kN/cm²

Resistências:

F_{wRd} : 18.444 kN/cm²

F_{MBRd} : 13.636 kN/cm²

Verificação da ligação soldada:

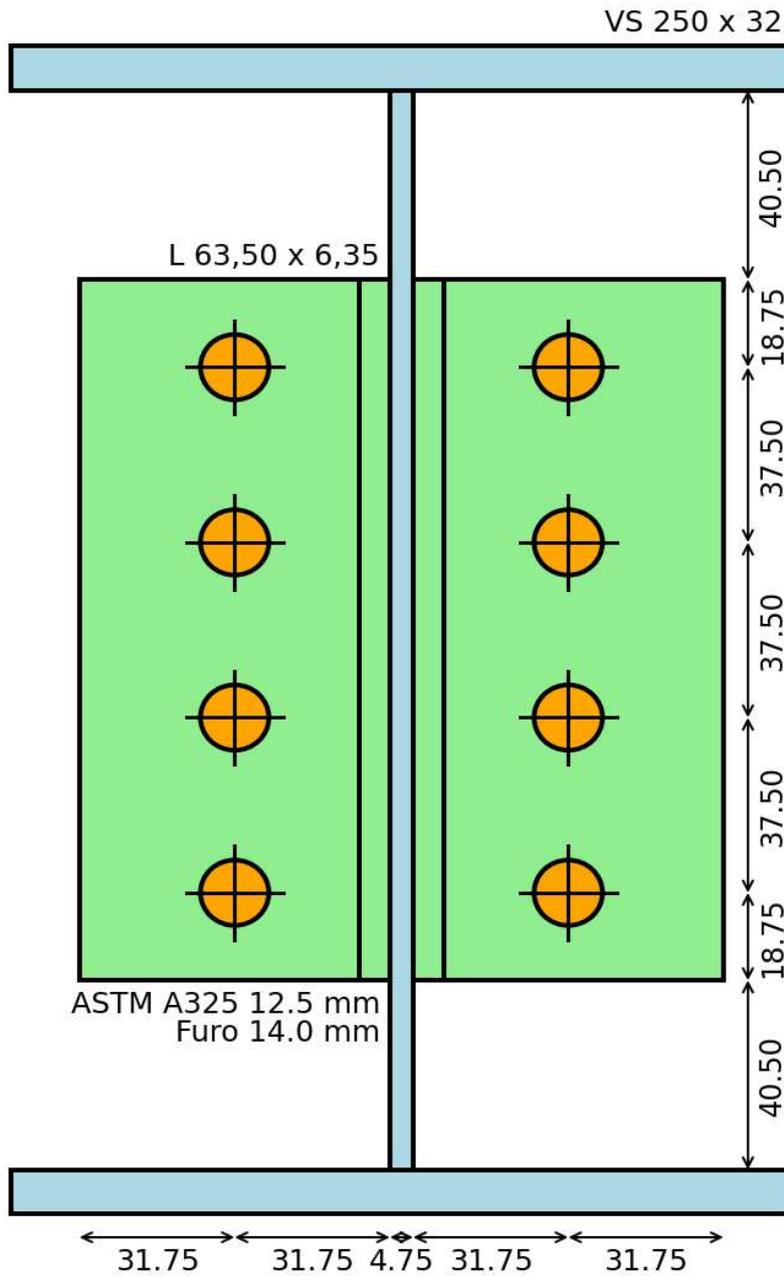
Iterações: 10

f_{wSd} (17.734 kN/cm²) \leq F_{wRd} (18.444 kN/cm²)

f_{MBSd} (12.414 kN/cm²) \leq F_{MBRd} (13.636 kN/cm²)

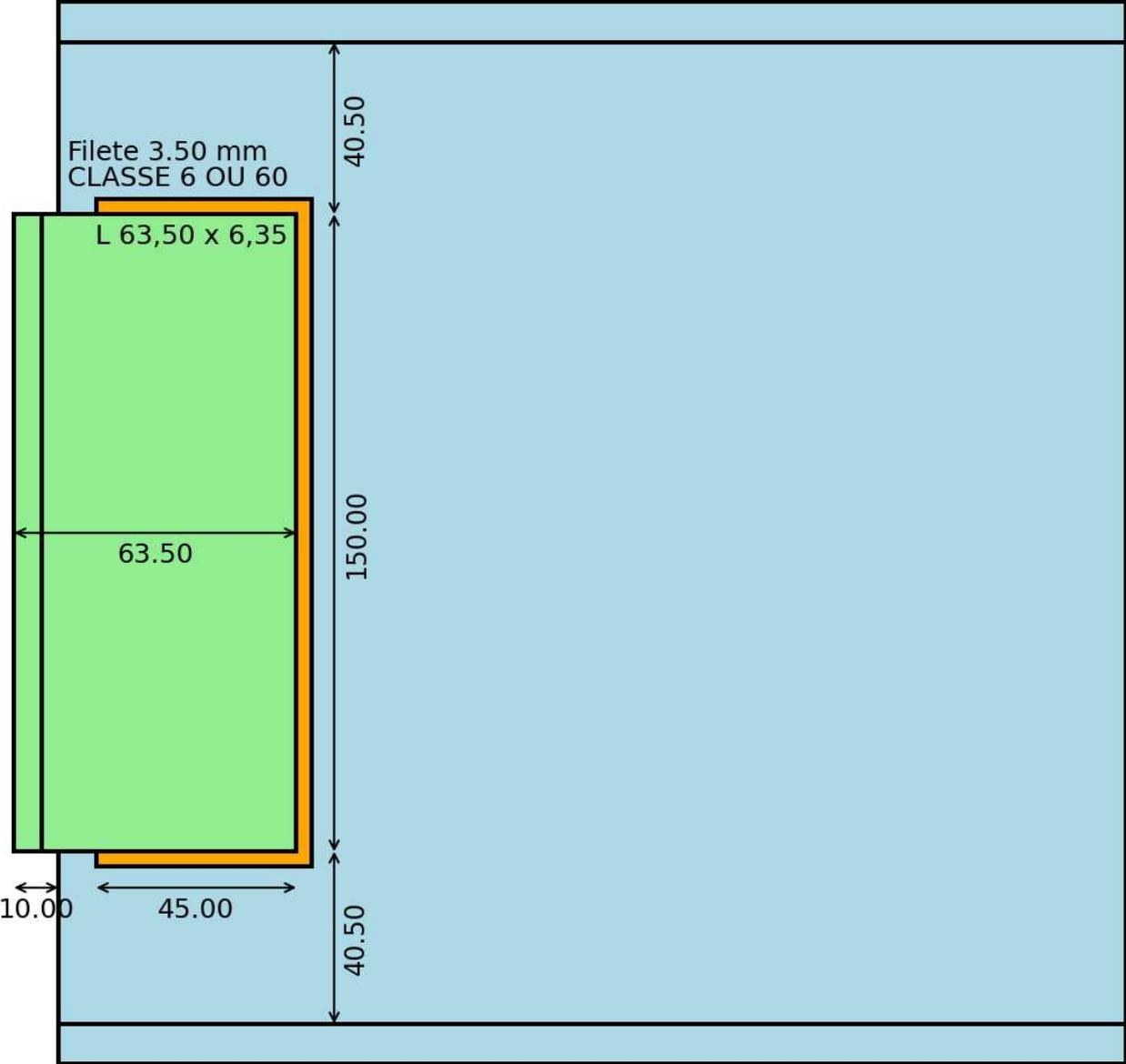
As tensões atendem a todas as resistências.

Ligação Parafusada



Ligação Soldada

VS 250 x 32



Memorial de Cálculo

Força cortante na viga: 89.000 kN
Momento fletor na viga: 112.900 kN

Perfis selecionados ($f_y = 250$ MPa, $f_u = 400$ MPa):

Perfil da viga: VS 350 x 42
Perfil do pilar: CS 300 x 76

Parafuso selecionado:

Tipo de parafuso: ASTM A325 ($f_{yb} = 635$ MPa, $f_{ub} = 825$ MPa)
Diâmetro do parafuso: 16.0 mm ($A_b = 2.011$ cm²)

Chapa selecionada:

Chapa (t): 19.000 mm

Eletrodo selecionado:

Tipo de eletrodo: CLASSE 7 OU 70 ($F_w = 70$ ksi, $F_w = 825$ MPa)

Resultados dos Cálculos:

Chapa:

Altura: 450 mm
largura: 250 mm

Espaçamentos:

a: 24.000 mm
b: 26.000 mm
e1: 202.000 mm
e2: 24.000 mm
p: 58.000 mm

Espessuras:

t_{min}: 16.029 mm
t_{max}: 21.047 mm

$t_{min} \leq \text{chapa} < t_{max}$

Há efeito alavanca, é necessário considerar sobrecarga Q na tração.

Carregamentos:

Q: 8.364 kN
F_{tSd}+Q: 88.731 kN

Parafusos:

n (adotado): 6

Menor espessura parafusada: 12.500 mm

Origem da menor espessura parafusada: Pilar, Mesa (tf)

Menor espaçamento: 24.000 mm

Propriedades geométricas:

Linha neutra: 4.731 cm
Inércia: 10696.161 cm⁴

Posição dos parafusos:

h1: 2.400 cm
h2: 36.450 cm
h3: 42.600 cm

Solicitações nos parafusos:

FvSd: 14.833 kN
FtSd: 80.367 kN

Resistências dos parafusos:

FvRd: 55.292 kN
FtRd: 92.153 kN
FvRd: 94.688 kN

Verificação da ligação parafusada:

Iterações: 0
FvSd (14.833 kN) <= FvRd (55.292 kN)
FtSd (80.367 kN) <= FtRd (92.153 kN)
FtSd (80.367 kN) <= FvRd (94.688 kN)

As tensões atendem a todas as resistências.

Solda:

Solda na alma da viga:

Menor espessura soldada: 4.750 mm
Origem da menor espessura soldada: Viga, Alma (tw)
Espessura mínima da solda: 3.000 mm

Espessura solda: 3.000 mm
Garganta efetiva: 2.100 mm

Solda na mesa da viga:

Menor espessura soldada: 9.500 mm
Origem da menor espessura soldada:: Viga, Mesa (tf)
Espessura mínima da solda: 5.000 mm

Espessura solda: 5.000 mm
Garganta efetiva: 3.500 mm

Propriedades geométricas:

AwTotal: 39.484 cm²
AwAlma: 11.817 cm²
Iw: 13939.090 cm⁴

Tensões na solda:

f_v: 7.532 kN/cm²
f_{ma}: 14.316 kN/cm²

fmb: 11.394 kN/cm²
fwa: 14.316 kN/cm²
fwb: 13.658 kN/cm²
fMBa: 10.021 kN/cm²
fMBb: 9.561 kN/cm²

Tensões resultantes:

fwSd: 14.316 kN/cm²
fMBSd: 10.021 kN/cm²

Resistências:

FwRd: 36.667 kN/cm²
FMBRd: 13.636 kN/cm²

Verificação da ligação soldada:

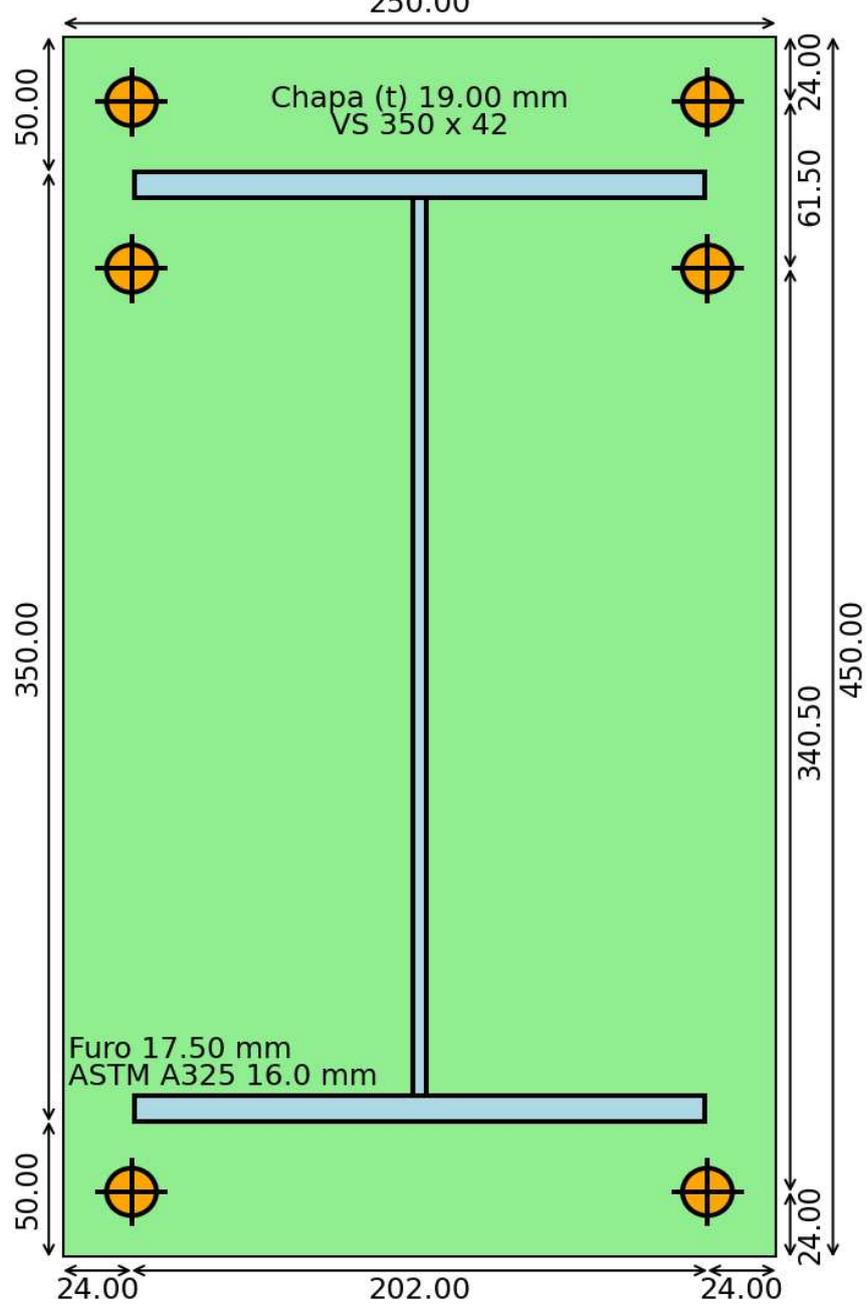
Iterações: 0

fwSd (14.316 kN/cm²) <= FwRd (36.667 kN/cm²)

fMBSd (10.021 kN/cm²) <= FMBRd (13.636 kN/cm²)

As tensões atendem a todas as resistências.

Ligação Parafusada



Ligação Soldada

