INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO (ILATIT)

ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

Aço Tool: Um Software Educacional para Verificação a Tração e Compressão Simples de Perfis Metálicos segundo a Norma NBR 8800

Gabriel Alejandro Colmenarez Peña

Foz do Iguaçu

2025

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO (ILATIT)

ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

Aço Tool: Um Software Educacional para Verificação a Tração e Compressão Simples de Perfis Metálicos segundo a Norma NBR 8800

Gabriel Alejandro Colmenarez Peña

Trabalho de conclusão de curso apresentada à Faculdade de Engenharia Civil de Infraestrutura da Universidade Federal de Integração Latino-Americana como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Licenciado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Aref Kalilo Lima Kzam

Foz do Iguaçu

2025

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

GABRIEL ALEJANDRO COLMENAREZ PEÑA

Aço Tool: Um Software Educacional para Verificação a Tração e Compressão Simples de Perfis Metálicos segundo a Norma NBR 8800

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Arte, Cultura e História da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

BANCA EXAMINADORA

_____

Orientador: Prof. Dr. Aref Kalilo Kzam
UNILA

_____

Prof. Dr. Cesar Winter de Mello
UNILA

_____

Prof. Dr. Paulo Junges
UNILA

Foz do Iguaçu, 14 de Março de 2025.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Dedico este trabalho a mim, por ter aguentado quando o mais profundo grito de angústia saia de dentro e parecia ser mais forte do que tudo. Obrigado por não desistir e saber que em Deus você poderia alcançar. Eu que passei por momentos que somente eu serei capaz de lembrar e compreender, mas mesmo assim não me perdi em meio a escuridão e não me permitir abaixar a cabeça. Segui firme e hoje estou aqui, celebrando essa conquista.

Agradecimentos

Agradeço este trabalho primeiramente ao meu irmão Alexander, ele foi a pessoa que sempre nos momentos mais difíceis acreditou em mim e não me deixou desistir. Quero agradecer também a toda minha família, especialmente à minha avó que criou eu e meu irmão como uma mãe solo e nunca permitiu que faltasse nada para nós. Também agradeço a todas as minhas tias: Olga, Carmen, Nelly e Mireya que sempre estiveram presentes na minha vida ajudando a tornar-me a pessoa que sou hoje.

Quero agradecer a minha prima, Mariolga,que foi o pilar fundamental no meu desenvolvimento como pessoa, e que sempre me deu apoio e conselhos. Aos meus amigos e colegas de sala de aula: Natália, Melissa, Sharon, Cristian, Adriana, Tatiana, Elisa Soledad, Thainá, Everton, Alessia, sem o apoio deles não teria chegado tão longe, os agradecimentos vêm do fundo de meu coração.

Aos meus amigos da vida e família de coração: Lis, Ana Julia, Ana Carolina, André, Santiago, Victoria, Gabriel, Magda, Luiz Paulo, Eliane, Julia, Patricia, Marcelo, Sirtob, Marlon, Diego, Francisco e Jesus. Saibam que a amizade de vocês foi um dos pilares que não me deixou adoecer e desistir desses anos de universidade.

Agradeço imensamente a todos os meus professores, sendo que alguns deles merecem um destaque especial, uma vez que transformaram a minha vida:

Ana Carolina: seu comprometimento com a qualidade de ensino do curso ajudou no desenvolvimento do pensamento crítico que todo engenheiro precisa.

Paulo Junges: Mais do que um professor, é um amigo fora da sala de aula, extremamente comprometido com o aprendizado dos alunos.

Mara Rubia: Considerada por muitos como uma mãe, um exemplo a seguir como pessoa e como profissional.

André Torii: Provavelmente as aulas mais organizadas que eu tive, admiro o tempo que deve ter investido na elaboração da apostila, que certamente é um ponto marcante no aprendizado. Professor e pessoa admirável.

Aref Kzam: Professor e amigo, o primeiro em acreditar em minha pesquisa, aquele que plantou e viu crescer meu desenvolvimento como engenheiro. Por tanto, te agradeço profundamente.

A Professora Edna, por sua dedicação, incentivo e ensinamentos, que foram fundamentais ao longo da minha jornada acadêmica. Sua orientação e apoio contribuíram imensamente para o meu crescimento profissional e pessoal.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Também expresso minha sincera gratidão ao Professor César Winter, por ter me concedido a oportunidade de realizar minha primeira iniciação científica. Sua confiança e incentivo foram essenciais para meu desenvolvimento pessoal, permitindo-me explorar novos conhecimentos e aprofundar minha formação na pesquisa acadêmica.

A todos os meus colegas de estágio, alguns ganharam uma menção especial: Aline, Isabella, Ana Laura, Patricia mãe, Patricia filha, Matheus, Yumi nunca imaginei que seria tão bem acolhido por uma equipe.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

É só falar a verdade

Mata-Lima (2024)

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Resumo

O presente trabalho descreve o desenvolvimento do *software* Aço Tool para verificação estrutural de perfis metálicos do tipo I, H e 2L, em conformidade com os critérios estabelecidos pela Norma Brasileira (NBR) 8800:2024. A ferramenta foi projetada para auxiliar profissionais da engenharia e estudantes no dimensionamento de peças metálicas, proporcionando uma interface intuitiva e instrutiva, desenvolvida com a biblioteca *CustomTkinter* na linguagem *python*. O *software* Aço Tool permite a inserção de dados, a análise automática dos esforços solicitantes e resistentes, bem como a verificação à tração e compressão pura dos elementos. A partir de um banco de dados de perfis provenientes do catálogo da Gerdau, é possível a seleção direta dos elementos a serem analisados. Além disso, visando flexibilidade e personalização, o usuário pode adicionar novos perfis ao banco. A ferramenta realiza os cálculos ao considerar parâmetros geométricos e mecânicos das seções, e apresenta os resultados de forma clara para sua interpretação. Essa abordagem contribui para o aprendizado sobre o comportamento mecânico de perfis metálicos. O *software* também possui a funcionalidade de exportação de um memorial de cálculo, permitindo que os usuários documentem as análises realizadas de maneira estruturada

Palavras-chaves: Perfis Metálicos; NBR 8800; Software; Verificação; Aço Tool.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Resumen

El presente trabajo describe el desarrollo del *software* Aço Tool para la verificación estructural de perfiles metálicos tipo I, H y 2L, en conformidad con los criterios establecidos por la Norma Brasileña (NBR) 8800:2024. La herramienta fue diseñada para asistir a profesionales de la ingeniería y estudiantes en el dimensionamiento de piezas metálicas, proporcionando una interfaz intuitiva e instructiva, desarrollada con la biblioteca *CustomTkinter* en el lenguaje de programación *Python*. El *software* Aço Tool permite la introducción de datos, el análisis automático de los esfuerzos solicitantes y resistentes, así como la verificación de la tracción y la compresión pura de los elementos. A partir de una base de datos de perfiles provenientes del catálogo de Gerdau, es posible la selección directa de los elementos a ser analizados. Además, con el objetivo de garantizar flexibilidad y personalización, el usuario puede agregar nuevos perfiles a la base de datos. La herramienta realiza cálculos considerando los parámetros geométricos y mecánicos de las secciones y presenta los resultados de manera clara para su interpretación. Este enfoque contribuye al aprendizaje sobre el comportamiento mecánico de los perfiles metálicos. El *software* también cuenta con la funcionalidad de exportación de un informe de cálculo, permitiendo a los usuarios documentar los análisis realizados de manera estructurada.

Palabras clave: Perfiles Metálicos; NBR 8800; Software; Verificación; Aço Tool.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Abstract

The present work describes the development of the Aço Tool *software* for the structural verification of I, H, and 2L steel profiles, in compliance with the criteria established by the Brazilian Standard (NBR) 8800:2024. The tool was designed to assist engineering professionals and students in the design of steel components, providing an intuitive and instructive interface, developed with the *CustomTkinter* library in the *Python* programming language. The *Aço Tool* software allows data input, automatic analysis of applied and resistant forces, as well as verification of pure tension and compression in structural elements. Based on a profile database from the Gerdau catalog, users can directly select the elements to be analyzed. Additionally, aiming for flexibility and customization, users can add new profiles to the database. The tool performs calculations by considering the geometric and mechanical parameters of the sections and presents the results clearly for interpretation. This approach contributes to the learning process regarding the mechanical behavior of steel profiles. The *software* also includes a calculation report export functionality, allowing users to document the analyses performed in a structured manner.

Keywords: Steel Profiles; NBR 8800; Software; Verification; Aço Tool.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxograma de operação do software 18
Figura 2 – Interface de seleção do tipo de perfil. 22
Figura 3 – Interface de seleção dos códigos de perfil. 23
Figura 4 – Planilha CVS contendo informações dos perfis 27
Figura 5 – Janela Principal 29
Figura 6 – Pop-up do Tipo de Material Escolhido 30
Figura 7 – Guia de Usuário 31
Figura 8 – Interface de dados de entrada 32
Figura 9 – Aviso de Não Conformidade aos Criterios de Tração 35
Figura 10 – Feedback de Verificação 35
Figura 11 – Menssagem de erro quando o elemento não atende ao critério de esbeltez . 40
Figura 12 – Parâmetros geométricos e verificações do elemento 42
Figura 13 – Output do software 43
Figura 14 – Output do software 44
Figura 15 – Output do software 45
Figura 16 – Parâmetros geométricos do perfil 46
Figura 17 – Verificações do perfil 47
Figura 18 – Output do software 48
Figura 19 – Parâmetros geométricos do perfil 49
Figura 20 – Verificações do perfil à tração 50
Figura 21 – Verificações de esbeltez 50
Figura 22 – Output do software 51

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Sumário

1 Introdução . . . 13
2 Objetivos . . . 15
2.1 Objetivo general . . . 15
2.2 Objetivos específicos . . . 15
3 Revisão Bibliográfica . . . 16
3.1 Engenharia de Estruturas Metálicas . . . 16
3.2 Uso de TICs no Ensino de Engenharia Civil . . . 17
4 Metodologia . . . 18
5 Desenvolvimento do Software . . . 20
5.1 Bibliotecas . . . 20
5.2 Criação do atalho . . . 21
5.3 Funções . . . 22
5.3.1 Função `atualizar_códigos_perfil` . . . 22
5.3.2 Função `exibir_dados_perfil` . . . 23
5.3.3 Função Adicionar_Elementos . . . 23
5.4 Dicionários . . . 24
5.5 Incorporação da Barra Lateral na Interface Gráfica . . . 25
5.6 Incorporação do Tooltip na Interface Gráfica do Software . . . 25
5.7 Cálculo da constante de empenamento e constante de torção . . . 26
5.8 Inserção manual de Perfis . . . 26
6 Uso do software . . . 29
6.1 Janela Principal . . . 29
6.2 Guia de Usuario . . . 31
6.3 Inserir Dados . . . 32
6.4 Verificação de Esforços . . . 33
6.5 Verificação do limite de esbeltez . . . 39
7 Resultados e Discussões . . . 41
7.1 Validação Interna Durante o Desenvolvimento . . . 41
7.2 Comparação de resultados . . . 42
7.2.1 Comparação com o *software* Robot Structural Analysis . . . 42
7.2.2 Comparação com Bibliografía . . . 46
7.2.2.1 Verificação à compressão . . . 46
7.2.2.2 Verificação a tração . . . 48
8 Considerações Finais . . . 52
8.1 Sugestões para Trabalhos Futuros . . . 52
8.1.1 Implementação de Validações e Tratamento de Erros . . . 52

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

8.1.2 Integração de maior número de perfis estruturais 52
8.1.3 Aprimoramento da Interface Gráfica 53
8.1.4 Geração de Relatórios Personalizados 53
8.1.5 Ampliação das verificações estruturais 53

Referências Bibliográficas 54

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

1 Introdução

O cálculo de verificação de estruturas metálicas é essencial na engenharia civil, no Brasil, a Norma Brasileira (NBR) 8800 estabelece critérios técnicos para garantir a segurança das construções. Os perfis metálicos são elementos estruturais fabricados a partir de aço, podendo ser obtidos por processos de laminação ou conformação a frio (MALAGUTTI *et al.*, 2015) , estes possuem um grande número de verificações, o que torna necessária uma sistematização dos processos de cálculo para uma posterior análise (SIMSEN *et al.*, 2020).

Nas últimas décadas, o método de ensino vem-se transformando por conta das tecnologias (PASSOS *et al.*, 2017). Nesse contexto as tecnologias de informação e comunicação, também chamadas de TICs, permitem um processo de aprendizagem que habilita recursos didáticos para as diferentes necessidades dos discentes e ajudam a superar as dificuldades da sala de aula (OLIVEIRA *et al.*, 2015). A educação assistida por computador é uma ferramenta chave para realizar uma mudança na educação tradicional (LAGOS, 2000). No entanto, é importante que a educação superior complemente as tecnologias com teoria, para que permitam desenvolver melhores resultados na realização de atividades (NAZÁRIO; BENTO, 2016).

Diversos estudos internacionais têm mostrado que a integração de recursos tecnológicos do tipo realidade aumentada e modelagem de informações da construção (BIM por suas sigles em inglês) tem efeitos positivos no desenvolvimento de habilidades práticas e entendimento das disciplina (BASTO; JUNIOR, 2016; MCGOUGH *et al.*, 2013; DINIS *et al.*, 2017). Nesse contexto, há relevância da presença da tecnologia no ensino superior, pois o mercado de trabalho impõe aos profisionais conhecimento técnico e habilidades no campo de trabalho (NAZÁRIO; BENTO, 2016). Percebe-se que a prática de adicionar conteúdos de *software* tipo BIM, que é uma metodologia baseada em modelos digitais que integra informações geométricas (EASTMAN *et al.*, 2011), está mais amadurecida no exterior do que no Brasil (AUGUSTO *et al.*, 2015). Nesse sentido, a integração de recursos computacionais no ensino de engenharia civil não é muito utilizada (GUIMARÃES *et al.*, 2022). Entre os possíveis obstáculos que um curso pode enfrentar para implementar recursos tecnológicos se encontram a falta de professores capacitados, laboratórios, bibliografias e espaço na matriz curricular (CHECCUCCI, 2014).

De fato, em um mercado de trabalho competitivo, a qualificação profissional tornou-se uma exigência fundamental na contratação de novos talentos, já que as empresas buscam indivíduos que possam atender ou até superar as expectativas. Para suprir essa demanda, é crucial que as instituições de ensino preparem profissionais alinhados às necessidades do mercado. Para acompanhar o avanço tecnológico, é imperativo que esses profissionais adquiram habilidades em *software* essenciais para suas atividades. Portanto, a formação acadêmica deve englobar não apenas o conhecimento teórico, mas também a prática, a fim de garantir o uso

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

eficaz de tecnologias que melhorem o desempenho e os resultados das tarefas profissionais (NAZÁRIO; BENTO, 2016)

A modernização dos métodos de ensino usados pelos docentes é importante em diversas áreas; na engenharia civil, é ressaltante que os *softwares* ajudam a entender cálculos complexos e trabalhosos. Assim, a base teórica ainda é importante; os *softwares* deve ser usado como uma ferramenta para complementar as aulas (MACHADO *et al.*, 2021)

Diante do exposto, é evidente a importância de integrar as tecnologias de informação e comunicação (TICs) no ensino de engenharia civil, especialmente para o aprendizado de normas técnicas. Para atender a essa necessidade, foi elaborado um *software* que seja intuitivo, fácil de usar e didático, a fim de auxiliar os estudantes no processo de aprendizagem. Esse *software* deve ser capaz de simplificar o processo de verificação de estruturas metálicas conforme a norma brasileira de aço, proporcionando um ambiente prático e interativo para a realização dos cálculos e análises. A criação de uma ferramenta educacional com essas características não apenas facilita o entendimento das verificações estruturais, como também prepara os futuros engenheiros para o uso de tecnologias que são cada vez mais exigidas no mercado de trabalho, contribuindo assim para a formação de profissionais mais qualificados e adaptados às demandas contemporâneas.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Desenvolver um *software* educacional que permita a estudantes e profissionais da engenharia civil a verificar esforços em perfis I, H e 2L de acordo com a norma NBR 8800:2024.

2.2 Objetivos específicos

- Implementar uma interface intuitiva que permita a inserção e manipulação dos dados dos perfis estruturais.
- Automatizar a verificação de perfis metálicos considerando os critérios da NBR:8800 (2024) de resistência à tração e compressão.
- Apresentar os resultados da verificação estrutural de forma clara e organizada.
- Permitir a exportação dos resultados em um memorial de cálculo estruturado.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Engenharia de Estruturas Metálicas

As estruturas metálicas são amplamente utilizadas em construções civis e industriais devido à alta resistência, flexibilidade e durabilidade do material. No entanto, para o dimensionamento correto dessas estruturas, é crucial garantir sua segurança e funcionalidade, fazendo o uso de teorias complexas de resistência dos materiais, estabilidade estrutural e análise de carga (PFEIL; PFEIL, 2013)

CARVALHO *et al.* (2002) destacam que a análise estrutural envolve a determinação dos esforços internos e deslocamentos, assegurando que os elementos resistam às solicitações previstas. As normas técnicas, como a NBR 8800, fornecem diretrizes para o projeto de estruturas de aço, estabelecendo critérios para estados limites últimos e de serviço.

A **NBR 8800:2008** estabelece os critérios normativos para o projeto e dimensionamento de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto. Segundo Silveira (2005), essa norma foi elaborada com base nas diretrizes do *AISC-LRFD* (*American Institute of Steel Construction - Load and Resistance Factor Design*), adotando o método dos **estados-limites**, que garante a segurança estrutural tanto em condições normais de operação quanto em situações de carregamento extremo. Além disso, a norma considera aspectos como flambagem, escoamento plástico e fadiga.

O Método dos Estados Limites (MEL) é uma abordagem moderna utilizada no dimensionamento estrutural, cujo objetivo principal é garantir que uma estrutura atenda a requisitos de segurança (SANTOS, 2018). Esse método substituiu o tradicional Método das Tensões Admissíveis, pois permite uma análise mais precisa da resistência e do comportamento estrutural em diferentes condições de carregamento (BONZANINI, 2013). O MEL se baseia na verificação de dois estados principais: os Estados Limites Últimos (ELU), que englobam situações que podem levar ao colapso da estrutura, como falha por ruptura ou instabilidade global (CASTRO; MALITE, 2002); e os Estados Limites de Serviço (ELS), que garantem que a estrutura funcione adequadamente sem apresentar deformações excessivas, fissuração ou vibrações que comprometam seu uso (CASTRO, 1997).

O desenvolvimento de *software educacional* envolve a criação de ferramentas tecnológicas para facilitar o processo de ensino-aprendizagem por meio de simulações, exercícios interativos e visualizações. Na engenharia civil, esses softwares são essenciais para auxiliar no entendimento de normas técnicas e conceitos complexos, como os cálculos exigidos pela **NBR 8800** (PRESSMAN, 2014).

Para criar um software educacional eficaz, é necessário seguir metodologias da enge-

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

nharia de software, como definição de requisitos, projeto, implementação, testes e manutenção. A interface do usuário deve ser intuitiva, e o software deve ser eficiente e preciso em seus cálculos, especialmente em aplicações de engenharia, onde erros podem comprometer o aprendizado e a aplicação prática (PRESSMAN, 2014).

3.2 Uso de TICs no Ensino de Engenharia Civil

As *Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs)* desempenham um papel crucial na modernização do ensino de engenharia civil, proporcionando aos estudantes a oportunidade de praticar e aplicar conceitos teóricos em ambientes simulados. Essas ferramentas permitem que os alunos realizem cálculos e análises de forma prática, melhorando a compreensão dos conteúdos e contribuindo para o desenvolvimento de habilidades essenciais para o mercado de trabalho (GUIMARÃES *et al.*, 2022).

Estudos mostram que o uso de TICs no ensino, como a modelagem BIM (*Building Information Modeling*), aumenta a retenção do conhecimento e melhora a integração entre teoria e prática, o que é essencial para a formação de engenheiros civis preparados para os desafios do mercado (GUIMARÃES *et al.*, 2022).

A evolução dos softwares de cálculo estrutural tem proporcionado maior precisão e eficiência nos projetos de engenharia. Os autores Mendes e Fraga (2018) desenvolveram um software acadêmico denominado "Professor Estrutural", utilizando a linguagem de programação Java e a API JavaFX, facilitando o estudo da análise estrutural por meio de diagramas de esforços e deslocamentos.

A linguagem de programação Python tem se destacado na engenharia estrutural devido à sua versatilidade e eficiência na implementação de rotinas para cálculos complexos. Sua sintaxe simplificada permite que engenheiros desenvolvam soluções personalizadas para análise estrutural. Conforme discutido por Shishkov (2021), Python é uma linguagem de programação dinâmica geral que permite aos programadores codificar conceitos utilizando um menor número de linhas de código. Essa característica permite integrar o uso de bibliotecas com algoritmos e rotinas para otimizar projetos estruturais.

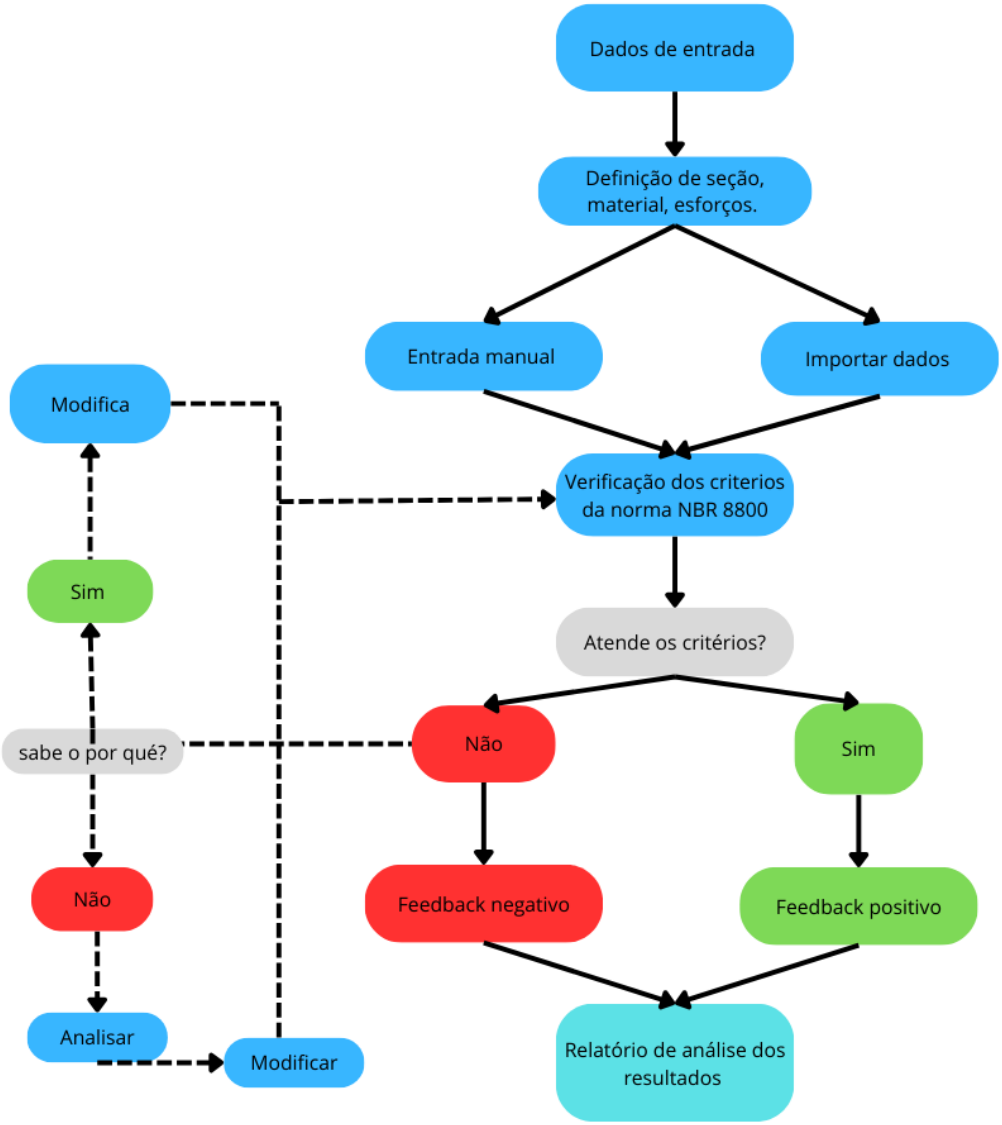
Python possui um vasto ecossistema de bibliotecas que ampliam significativamente suas capacidades, tornando-o uma das linguagens de programação mais versáteis e eficientes para diversas áreas do conhecimento. Essas bibliotecas oferecem ferramentas para manipulação de dados, cálculos numéricos, aprendizado de máquina, visualização gráfica, desenvolvimento web e automação de processos. Segundo Van Rossum e Drake (2022), a principal vantagem desse ecossistema está na simplicidade e na facilidade de integração entre as bibliotecas, permitindo que desenvolvedores e pesquisadores implementem soluções complexas com poucas linhas de código.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

4 Metodologia

A metodologia adotada no desenvolvimento do software para análise estrutural de perfis de aço seguiu uma abordagem modular e estruturada, visando futuras melhorias e adição de funções; foram definidas as camadas principais do sistema, abrangendo a interface gráfica, lógica de cálculos estruturais e a gestão de dados. Para facilitar o entendimento, foi elaborado um fluxograma com o desenvolvimento do software.

Figura 1 – Fluxograma de operação do software



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A camada de interface gráfica foi implementada com uso da linguagem python, versão 3.12.3 (ROSSUM; DRAKE, 2009), utilizando as bibliotecas *Tkinter*, versão 8.6 (LUNDH,

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

1999), e *CustomTkinter* versão 5.2.2 (SCHIMANSKY, 2023). A interface principal é composta por um menu de navegação lateral e botões organizados dentro de *frames*, permitindo a inserção, exibição e edição de elementos estruturais. Além disso, *Combobox* para seleção de perfis e tipo de aço garantem uma interação dinâmica.

A camada de lógica de cálculos tem como função principal a manipulação dos perfis estruturais, a verificação dos esforços atuantes e a validação da capacidade resistente dos elementos à tração e compressão simples. Os dados são organizados em dicionários aninhados, categorizando as informações conforme três grupos: *parâmetros do elemento*, *dados de entrada* e *resultados dos cálculos*.

A camada de gestão de dados foi projetada para gerenciar a entrada e saída de informações. A leitura dos perfis estruturais é realizada a partir de arquivos CSV, processados com a biblioteca *Pandas* (MCKINNEY *et al.*, 2010) para estruturar os dados de maneira eficiente. Além disso, os elementos adicionados pelo usuário podem ser salvos e recuperados no formato JSON, o que possibilita a continuidade das análises sem a necessidade de repetição da entrada de dados. Para assegurar a compatibilidade do software com diferentes sistemas operacionais, a biblioteca *os* foi utilizada para definir dinamicamente os diretórios de trabalho, permitindo a manipulação adequada dos arquivos sem a necessidade de caminhos absolutos.

O funcionamento do sistema tem início com o usuário selecionando o tipo de aço e o perfil estrutural desejado, inserindo, em seguida, os valores correspondentes aos esforços e às condições de apoio. Ao acionar o botão verificar, seleciona-se o tipo de fabricação do perfil (soldado ou laminado). Com essas informações, o *software* realiza os cálculos estruturais e verifica se o elemento atende às normas técnicas vigentes. Os resultados são apresentados de forma organizada, facilitando a interpretação e permitindo uma análise clara e objetiva. Além disso, caso necessário, os dados podem ser salvos para consultas futuras.

A exportação dos cálculos é realizada por meio da geração de relatórios em PDF, utilizando a biblioteca *ReportLab*. Essa funcionalidade permite ao usuário visualizar detalhadamente todas as verificações realizadas, incluindo os dados geométricos do perfil, os esforços atuantes e os coeficientes de resistência aplicados.

Existe também a opção de edição, que permite modificar os esforços, condições de engaste e comprimento do elementos, e a opção de exclusão de elementos, que elimina o elemento da memoria do *software*.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

5 Desenvolvimento do Software

O desenvolvimento do software seguiu um modelo incremental, permitindo a implementação e validação contínua de suas funcionalidades. O uso de *CustomTkinter* 5.2.2 (SCHIMANSKY, 2023), garante um layout intuitivo e acessível para usuários com diferentes níveis de conhecimento técnico. A interface foi estruturada com botões para inserção de dados, campos de entrada para forças e seleção das propriedades geométricas dos perfis metálicos, menus suspensos para seleção de materiais e fatores de apoio, botões informativos, além de janelas pop-up para exibição dos resultados e mensagens de erro. A programação orientada a eventos foi empregada para possibilitar uma interação fluida e responsiva.

5.1 Bibliotecas

O *Python* 3.12.3 (ROSSUM; DRAKE, 2009) possui um grande catálogo de bibliotecas especializadas. Como destacado por McKinney (2017), a linguagem facilita a manipulação de grandes volumes de informação e a automação de tarefas repetitivas, reduzindo o tempo de desenvolvimento de projetos. A continuação, são explicadas as principais bibliotecas usadas para desenvolver o software.

A manipulação de arquivos foi implementada por meio da biblioteca *Pandas* 2.2.3 (MCKINNEY *et al.*, 2010), que permite a importação de tabelas de perfis estruturais a partir de arquivos tipo planilha em formato CSV. O software utiliza uma planilha baseada no catálogo de perfis da Gerdau, contendo uma base de dados de perfis metálicos. Entretanto, para permitir flexibilidade e atender às necessidades específicas dos usuários, é possível modificar os arquivos CSV incluindo novos tipos de perfil. Dessa forma, os usuários podem adicionar novas seções transversais e atualizar os dados conforme necessário, sem a necessidade de modificar o código-fonte do programa.

O comando `pd.read_csv` realiza a leitura dos arquivos CVS e as informações são inseridas em listas.

A biblioteca Os (ROSSUM; DRAKE, 2009) foi utilizada para a manipulação do sistema de arquivos e diretórios, permitindo que o aço tool acesse, modifique e armazene informações de maneira eficiente. Por meio das chamadas `os.path.abspath()` e `os.path.dirname()`, o programa obtém dinamicamente o caminho do diretório onde o *script* está localizado. Além disso, o uso de `os.chdir(caminho_script)` possibilita o ajuste automático do diretório de trabalho para esse local, garantindo a leitura e gravação de arquivos sem a necessidade de caminhos absolutos fixos.

Ao evitar caminhos absolutos, o programa pode ser realocado para outros diretórios

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

sem comprometer seu funcionamento. Além disso, a manipulação automatizada dos arquivos elimina a necessidade de intervenção manual do usuário na seleção e gerenciamento dos dados.

A biblioteca *ReportLab* (ROBINSON; BECKER, 2025) foi empregada para manipular e gerar arquivos PDF utilizando comandos de importação. No código, o módulo *reportlab.lib.pagesizes* define os parâmetros do documento. Já o módulo *reportlab.pdfgen.canvas* permite a inserção de textos, gráficos e outros elementos no PDF, sendo responsável por estruturar a apresentação dos cálculos e informações sobre os elementos estruturais analisados. Com isso, o memorial de cálculo é formatado de forma clara e organizada.

O módulo *tkinter.filedialog* permite a abertura de uma janela para selecionar o local onde o PDF será salvo. Já o módulo *tkinter.messagebox* exibe mensagens de alerta e confirmação para informar o usuário sobre o sucesso do processo ou possíveis erros na geração do memorial. Já a biblioteca *Datetime* é empregada para inserir automaticamente a data e hora da criação do documento.

A biblioteca Sys interage com o sistema operacional, permitindo a obtenção do caminho absoluto do *script* em execução por meio de `os.path.abspath()`. Isso é necessário para definir corretamente os diretórios de trabalho e garantir a localização adequada dos arquivos utilizados pelo programa.

A biblioteca webbrowser foi utilizada para abrir links no navegador padrão do sistema. No código, essa funcionalidade é aplicada no botão do guia do usuário, permitindo que o catálogo de perfis estruturais seja acessado diretamente por meio do comando `webbrowser.open(url)`.

A biblioteca PIL 11.1.0(CLARK, 2015), especificamente, os módulos *Image* e *ImageTk*, são utilizados para a exibição de imagens dentro da interface gráfica. No código, a função *Image.open()* carrega a imagem do disco, enquanto *ImageTk.PhotoImage()* a converte para um formato compatível com *CustomTtkinter*.

A biblioteca sectionproperties 3.7.3 (LEEUWEN; FERSTER, 2024)é uma ferramenta voltada para a análise de propriedades geométricas e estruturais de seções transversais. Seu principal objetivo é fornecer uma maneira eficiente e automatizada de calcular parâmetros como momentos de inércia, centroide, raio de giração, módulo de torção, constante de empenamento e centro de cisalhamento.

5.2 Criação do atalho

A criação de um atalho para a execução do software tem como finalidade proporcionar um acesso mais prático ao programa diretamente a partir da área de trabalho, eliminando a necessidade de abrir um terminal para sua inicialização. A geração do atalho é realizada por meio das bibliotecas *winshell* e *win32com.client*, que permitem a interação com os serviços do Windows para acessar diretórios específicos do sistema e configurar a criação do atalho.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

5.3 Funções

As funções do sistema são blocos de código que executam tarefas específicas dentro do *software*. Elas são ligadas aos botões e condições para executar essas tarefas quando indicado.

5.3.1 Função `atualizar_códigos_perfil`

A função atualiza dinamicamente os códigos de perfis disponíveis em um *dropdown* da interface gráfica. Essa atualização ocorre com base no tipo de perfil selecionado pelo usuário, garantindo que sejam exibidos apenas os correspondentes ao tipo de perfil escolhido.

A função inicia-se com a recepção de dois parâmetros. O primeiro, `tipo_perfil`, representa uma *string* que indica o formato do perfil estrutural; o segundo parâmetro, combo `_código_perfil`, refere-se ao elemento gráfico do tipo *Combobox* da interface, que será atualizado com os códigos disponíveis para o respectivo tipo de perfil.

A lógica de atualização é baseada na filtragem dos códigos de perfil armazenados em listas criadas com a biblioteca pandas. O comando `pd.read_csv()` é empregado para importar os arquivos CVS, que contêm as propriedades geométricas e mecânicas dos perfis de aço; cada arquivo está ligado a um tipo de perfil específico. O argumento decimal =","garante que os valores numéricos sejam corretamente interpretados quando o separador decimal for uma vírgula. Os dados lidos são convertidos para listas, permitindo que cada linha do arquivo CSV seja representada como um dicionário contendo os atributos do perfil, como área, altura, largura da mesa e momento de inércia (Ix), entre outros.

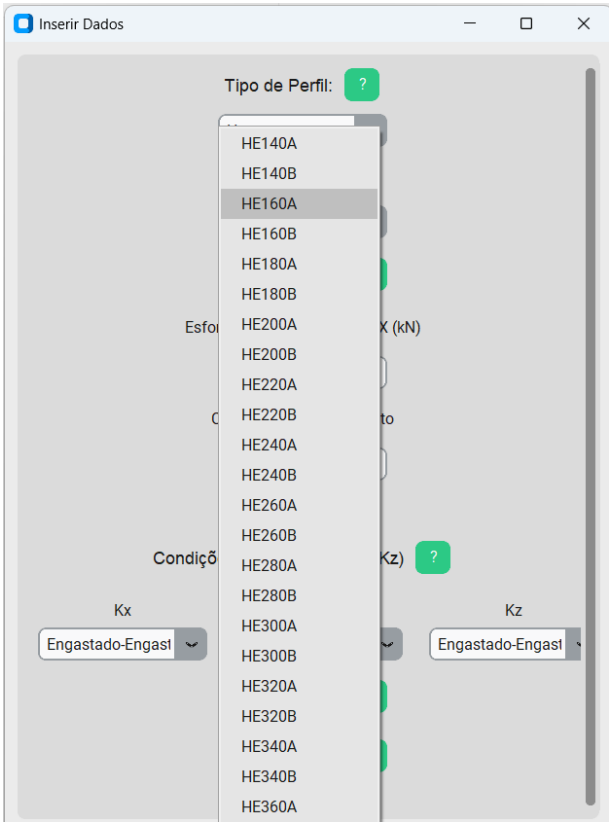
Após a filtragem dos códigos, a atualização do combobox é realizada por meio do método .configure(values=IDs), que redefine os valores exibidos no menu suspenso da interface. Esse mecanismo possibilita que o usuário visualize apenas as opções pertinentes ao perfil selecionado.

Figura 2 – Interface de seleção do tipo de perfil.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Figura 3 – Interface de seleção dos códigos de perfil.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.3.2 Função `exibir_dados_perfil`

A função `exibir_dados_perfil` permite ao usuário visualizar as propriedades detalhadas do perfil estrutural selecionado. Ao ser chamada, a função obtém o código do perfil escolhido pelo usuário na interface gráfica. Em seguida, percorre a lista de perfis em busca do perfil correspondente. Suas propriedades são organizadas em formato de texto e exibidas em um *messagebox*. Essa funcionalidade é útil para que o usuário possa revisar as características do perfil antes de utilizá-lo em cálculos estruturais.

5.3.3 Função Adicionar_Elementos

A função `adicionar_elemento()` é usada para armazenar e organizar os dados de um novo elemento estrutural inserido pelo usuário. Primeiramente, o código identifica o perfil estrutural selecionado no *dropdown* e busca seu correspondente dentro das listas. Para isso, obtém-se o perfil selecionado pelo usuário e percorre-se a lista de perfis até encontrar um item cujo "ID"coincida com a escolha do usuário.

A função coleta os parâmetros de esforço axial (X), comprimento e área líquida. O comprimento do elemento é validado para garantir que não seja zero. Se o usuário indicar

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

que o perfil possui furos na seção transversal, a área líquida deve ser inserida manualmente; caso contrário, o programa assume automaticamente a área bruta do perfil. Além disso, os coeficientes de comprimento eficaz (Kx, Ky, Kz) são obtidos a partir dos *dropdowns*.

Com todos os parâmetros validados, a função cria um dicionário contendo as propriedades do elemento e o adiciona à lista elementos_armazenados.

5.4 Dicionários

Os dicionários no Python são estruturas de dados baseadas no modelo "chave-valor", nas quais cada chave é única e está associada a um valor, que pode assumir diversos tipos, como números, *strings*, listas e até mesmo outros dicionários. No presente trabalho, os dicionários foram empregados como um meio eficiente de organizar os dados relativos aos perfis de aço.

A implementação dos dicionários ocorreu em três etapas fundamentais dentro do código: entrada de dados, realização dos cálculos estruturais e exibição dos resultados. Na etapa de entrada de dados, os elementos estruturais são representados como dicionários, onde cada chave corresponde a um atributo específico do perfil, como seção transversal, material e esforços atuantes. Além disso, foi desenvolvido um dicionário específico para armazenar as unidades de medida associadas a cada parâmetro inserido, bem como um outro dicionário dedicado às variáveis calculadas.

A utilização de dicionários aninhados permitiu a segmentação dos dados de entrada, dos resultados e da verificação normativa em diferentes níveis dentro de uma mesma estrutura. Durante a exibição dos resultados, a estrutura de chamada `"chave: valor unidade"` é empregada para acessar os diferentes níveis do dicionário, permitindo a apresentação simultânea dos valores calculados e suas respectivas unidades de medida.

Ao adicionar um novo elemento, o código percorre cada linha do *DataFrame* correspondente ao tipo de perfil selecionado, extraindo e armazenando suas propriedades geométricas em um dicionário específico. Inicialmente, essa interação ocorre por meio do método `.iterrows()`, que possibilita o acesso individual a cada linha da base de dados. Para cada perfil processado, é criado um dicionário que armazena informações essenciais, como o identificador do perfil (ID) e seu formato geométrico, definido por uma *string*.

Posteriormente, o código percorre todas as propriedades geométricas listadas no dicionário de unidades, associando-as dinamicamente aos valores extraídos do *DataFrame*. Esse dicionário, por sua vez, é adicionado a uma lista que mantém o registro de todos os perfis presentes no conjunto de dados, permitindo seu acesso pelo software durante os cálculos estruturais.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

5.5 Incorporação da Barra Lateral na Interface Gráfica

A incorporação da barra lateral na interface gráfica principal do *software* teve como principal objetivo organizar o acesso às funcionalidades essenciais. A barra lateral foi projetada para conter botões compactos com ícones representativos, permitindo que o usuário identifique rapidamente cada função.

A estrutura da barra lateral foi implementada utilizando um *Frame* do *customtkinter* (*CTkFrame*), posicionado no lado esquerdo da interface principal (*root*). Esse *frame* fixo foi configurado com um tamanho reduzido, garantindo que os botões fiquem alinhados verticalmente sem interferir nas demais seções da interface.

A inserção dos botões na barra lateral foi realizada a partir de uma lista, onde cada entrada continha um ícone e uma descrição correspondente. Durante a iteração dessa lista, cada botão foi criado dinamicamente utilizando *CTkButton*, com ajustes específicos para tamanho fixo, cores e espaçamento. Os botões disponíveis na barra permitem: salvar, editar e apagar os perfis analisados e exibir em uma janela os resultados após a análise dos elementos.

5.6 Incorporação do Tooltip na Interface Gráfica do Software

A implementação das dicas de ferramenta (*tooltips*) na interface gráfica do aço tool teve como objetivo otimizar o uso dos botões da barra lateral. Com esse recurso, o usuário pode visualizar descrições curtas e informativas sobre a função de cada botão ao simplesmente passar o cursor sobre eles. Para viabilizar essa funcionalidade, foi criada uma classe personalizada chamada *CustomToolTip*, responsável por gerar, exibir e ocultar os tooltips de maneira dinâmica.

A estrutura da classe começa associando cada botão a um texto descritivo correspondente. Para garantir que as dicas apareçam no momento certo, foram configurados eventos que detectam quando o cursor entra ou sai da área do botão. O evento `"Enter"` aciona a função `show_tooltip()`, que cria uma pequena janela flutuante contendo a descrição da funcionalidade. Da mesma forma, ao remover o cursor, o evento `"Leave"` dispara a função `hide_tooltip()`, responsável por fechar essa janela automaticamente, caso ela esteja visível.

Um dos desafios desse processo foi posicionar corretamente as tooltips na tela, evitando que ficassem sobrepostas a outros elementos da interface. Para isso, a posição da dica foi ajustada dinamicamente com base nas coordenadas do botão, obtidas por meio das funções `winfo_rootx()` e `winfo_rooty()`, que retornam a localização exata do *widget* na tela.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

5.7 Cálculo da constante de empenamento e constante de torção

A expressão para C_w e J varia conforme a geometria do perfil. Mediante a estrutura condicional *if*, o software identifica o formato do perfil e calcula a constante de empenamento, fazendo uso da biblioteca *sectionproperties*.

Os módulos `pre.library` e `analysis.section` realizam a modelagem do perfil e sua análise respetivamente. Para armazenar os dados do perfil, é criado um dicionário chamado secao. Esse dicionário recebe as dimensões geométricas do perfil, que são organizadas utilizando a função `i_section()` para um perfil H.

Após a modelagem, a seção precisa ser discretizada em uma malha para permitir cálculos estruturais precisos. Isso é feito com o comando `create_mesh()` antes de criar o objeto: `secao_analise = Section(secao)`.

Uma vez definida a malha, os dicionários da seção é objeto a analisar, são determinadas as características geométricas e de distorção com as funções:

```
secao_analise.calculate_geometric_properties()
secao_analise.calculate_warping_properties()
```

Usando os comandos `.get_gamma()` e `.get_j()` são obtidos os valores da constante de empenamento e constante de torção da seção transversal.

O cálculo destes parâmetros para perfis 2L deve ser inserido manualmente no software, isto pela dificuldade de modelagem deste tipo de perfil na biblioteca *sectionproperties*. Durante a verificação de resultados, é aberta uma nova janela que permite inserir os valores de constante de empenamento, constante de torção e coordenada do centro de cisalhamento na direção Y.

5.8 Inserção manual de Perfis

É possível modificar o arquivo CSV que contém as informações dos perfis apenas adicionando informações do perfil novo em uma linha adicional. No entanto, o nome do arquivo CSV não pode ser alterado, pois ele está diretamente vinculado ao *dropdown* de seleção dos perfis. Caso o nome do arquivo seja modificado, o software não conseguirá acessá-lo corretamente, resultando em erro.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Figura 4 – Planilha CVS contendo informações dos perfis

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	HE100B	20,4	26	100	6	80	10	100	450	89,9	4,16	104,2	167	33,5	2,53	51,4
2	HE140A	24,7	31,4	133	5,5	80	8,5	140	1033	155	5,73	173	389	55,6	3,52	84,8
3	HE140B	33,7	43	140	7	80	12	140	1509	216	5,93	245	550	78,5	3,58	120
4	HE160A	30,4	38,8	152	6	134	9	160	1673	220,1	6,57	245,2	616	76,9	3,98	117,6
5	HE160B	42,6	54,3	160	8	134	13	160	2492	311,5	6,78	354	889	111,2	4,05	170
6	HE180A	35,5	45,3	171	6	152	9,5	180	2510	293,6	7,45	324,9	925	102,7	4,52	156,5
7	HE180B	51,2	65,3	180	8,5	152	14	180	3831	425,7	7,66	481,5	1363	151,4	4,57	231
8	HE200A	42,3	53,8	190	6,5	170	10	200	3693	388,7	8,28	429,5	1336	133,6	4,98	203,8
9	HE200B	61,3	78,1	200	9	170	15	200	5697	569,7	8,54	642,6	2003	200,3	5,07	305,8
10	HE220A	50,5	64,3	210	7	188	11	220	5410	515,3	9,17	568,5	1955	177,7	5,51	270,6
11	HE220B	71,5	91	220	9,5	188	16	220	8091	735,6	9,43	827,1	2843	258,5	5,59	393,9
12	HE240A	60,3	76,8	230	7,5	206	12	240	7764	675,1	10,05	744,7	2769	230,7	6	351,7
13	HE240B	83,2	106	240	10	206	17	240	11260	938,3	10,31	1053,2	3923	326,9	6,08	498,4
14	HE260A	68,2	86,8	250	7,5	225	12,5	260	10456	836,5	10,97	919,9	3668	282,1	6,5	430,2
15	HE260B	93	118,5	260	10	225	17,5	260	14921	1147,7	11,22	1283	5135	395	6,58	602,3
16	HE280A	76,4	97,3	270	8	244	13	280	13675	1012,9	11,86	1112,3	4763	340,2	7	518,1
17	HE280B	104,2	132,7	280	10,5	244	18	280	19442	1388,7	12,1	1549,5	6598	471,3	7,05	719,4
18	HE300A	88,3	112,5	290	8,5	262	14	300	18265	1259,7	12,74	1383,4	6310	420,6	7,49	641,2
19	HE300B	117	149,1	300	11	262	19	300	25168	1677,8	12,99	1868,8	8563	570,9	7,58	870,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Além disso, as colunas A até P devem corresponder a dados específicos e precisam ser inseridas em uma ordem predefinida para que o programa possa realizar os cálculos corretamente. A sequência correta das informações a serem inseridas é:

- **ID**: Identifica o perfil, este deve ser único para garantizar a correta leitura e adição de elementos
- **Massa linear**: Massa por unidade de comprimento do perfil metálico (kg/m).
- **Área**: Área da seção transversal do perfil (cm^2).
- **Altura**: Altura total do perfil metálico (mm).
- **tw**: Espessura da alma do perfil metálico (mm).
- **Almah**: Altura útil da alma do perfil metálico (mm).
- **tf**: Espessura da mesa do perfil metálico (mm).
- **bf**: Largura da mesa do perfil metálico (mm).
- **Ix**: Momento de inércia em relação ao eixo x (cm^4).
- **Wx**: Módulo de resistência em relação ao eixo x (cm^3).
- **Rx**: Raio de giração em relação ao eixo x (cm).
- **Zx**: Módulo plástico de resistência em relação ao eixo x (cm^3).
- **Iy**: Momento de inércia em relação ao eixo y (cm^4).

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

- **Wy**: Módulo de resistência em relação ao eixo y (cm^3).
- **Ry**: Raio de giração em relação ao eixo y (cm).
- **Zy**: Módulo plástico de resistência em relação ao eixo y (cm^3).

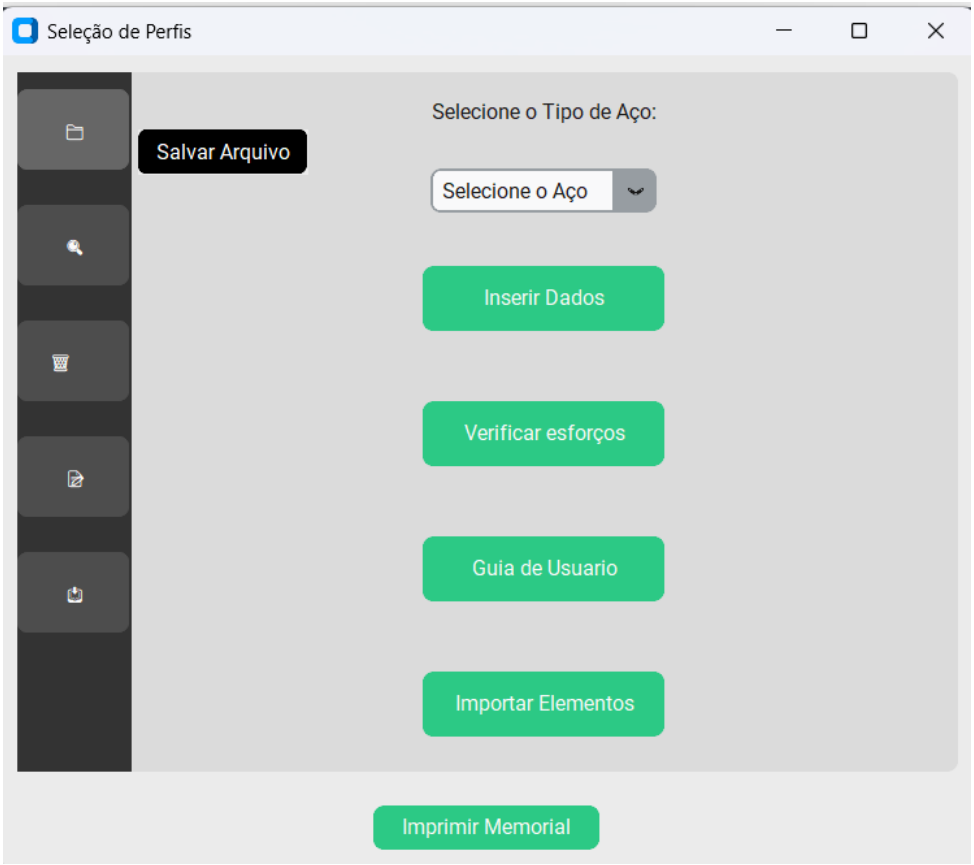
Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

6 Uso do software

6.1 Janela Principal

A interfacce do aço tool foi desenvolvida utilizando a biblioteca *CustomTkinter* (SCHIMANSKY, 2023), A barra lateral esquerda contém uma série de botões representados por ícones, permitindo acesso rápido a funções como salvar, exibir resultados, excluir, editar e importar dados. Para garantir uma experiência intuitiva, cada botão exibe um *tooltip* ao passar o mouse, explicando sua função. Essa barra foi implementada dentro de um *CTkFrame* fixo.

Figura 5 – Janela Principal



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

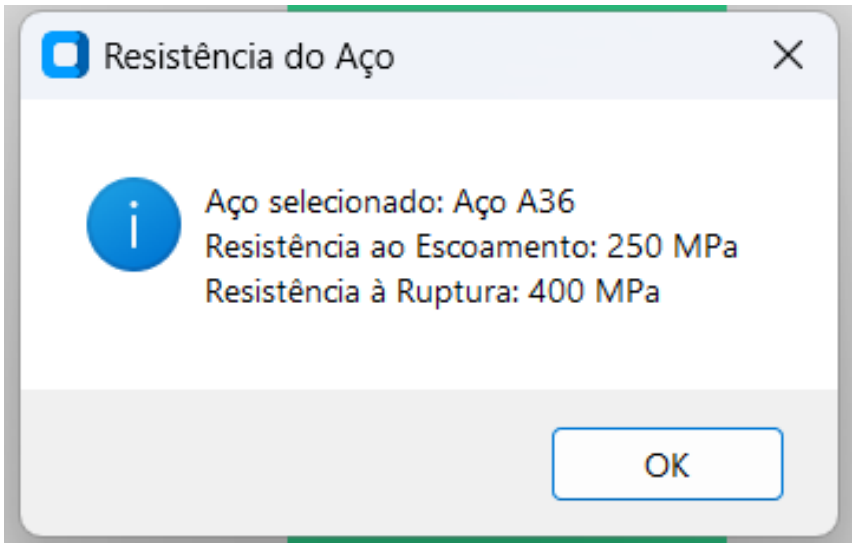
No painel central, os principais controles do *software* estão organizados verticalmente, incluindo um menu suspenso para a seleção do tipo de aço e botões para execução das operações fundamentais. Inserir Dados é responsável pela adição de novos elementos estruturais ao sistema. Ao ser pressionado, esse botão abre uma nova janela onde o usuário pode especificar os dados de entrada.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

O menu suspenso (*dropdown*) que exibe as opções disponíveis de aço, permitindo ao usuário selecionar rapidamente o material que será utilizado na análise estrutural. Esse menu está diretamente conectado a um banco de dados que armazena as propriedades mecânicas dos diferentes tipos de aço.

A interface foi projetada para ser dinâmica e responsiva. Assim que o usuário escolhe um tipo de aço, os valores de resistência mecânica são imediatamente exibidos em uma mensagem informativa. Para isso, foi utilizada a funcionalidade `messagebox.showinfo()`, que exibe um *pop-up* com os detalhes do material selecionado.

Figura 6 – Pop-up do Tipo de Material Escolhido



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Em seguida, o botão "Verificar Esforços"permite validar se os perfis atendem aos requisitos normativos. Quando ativado, ele executa a função `verificar()`, que realiza os cálculos estruturais e compara os esforços solicitantes com as resistências disponíveis. Caso algum elemento não atenda aos critérios exigidos, o software exibe mensagens de alerta.

O botão "Guia de Usuário"foi incluído para fornecer suporte direto ao usuário. Quando pressionado, ele abre um manual interativo em uma nova janela, exibindo um conjunto de instruções detalhadas sobre o funcionamento do software. Além das explicações textuais, o guia inclui imagens explicativas e links para tabelas de referência externas.

A funcionalidade de importação de elementos é acessada por meio do botão "Importar Elementos", que permite carregar arquivos *JSON* contendo dados estruturais previamente salvos. A função associada a esse botão, `importar_elementos()`, abre um explorador de arquivos, permitindo ao usuário selecionar o documento desejado. Se o arquivo estiver corrompido ou não for compatível, o software emite uma mensagem de erro.

O botão "Imprimir Memorial"está localizado na parte inferior da interface e tem como

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

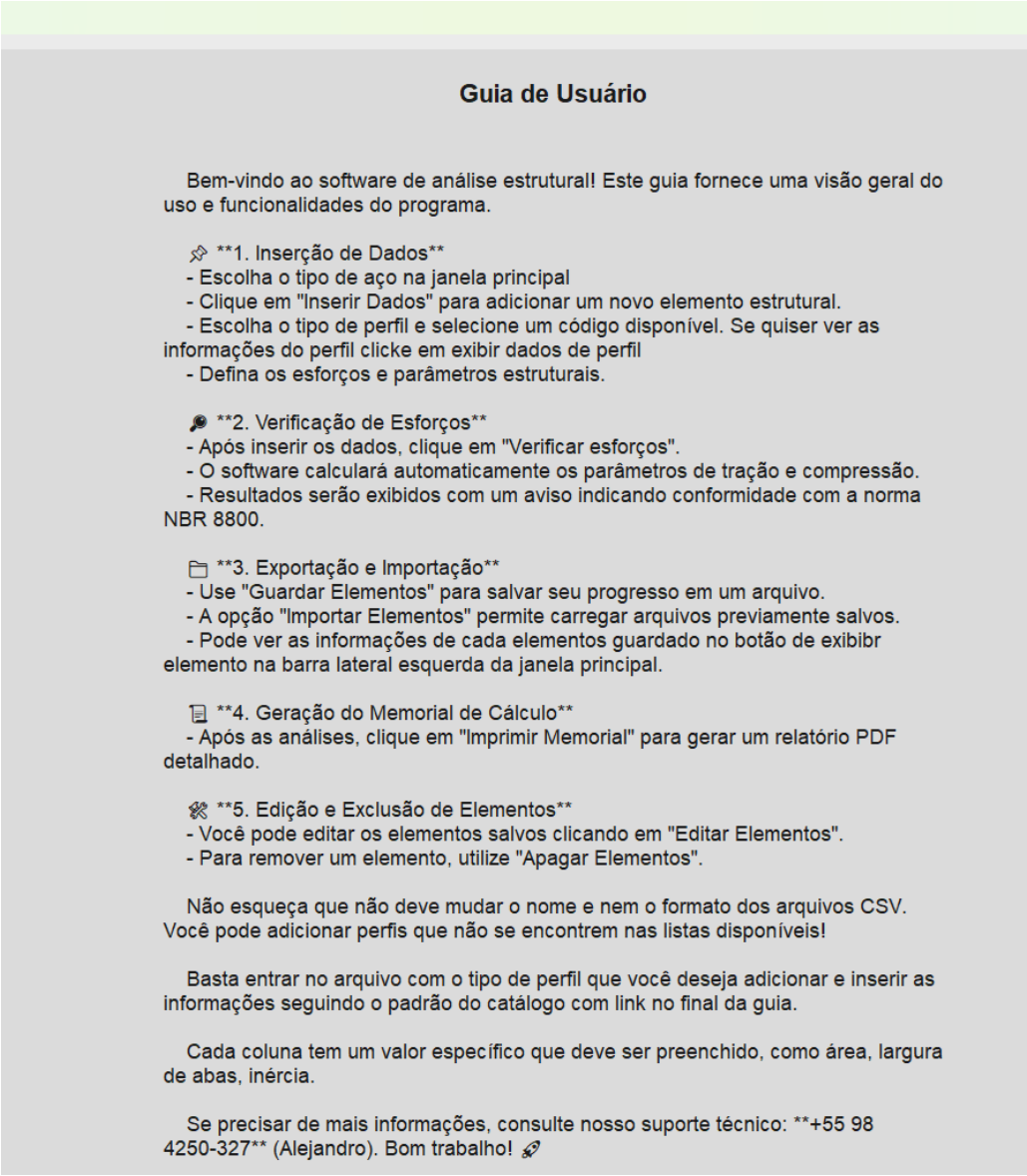
função gerar um relatório técnico em formato PDF com os dados dos elementos analisados.

6.2 Guia de Usuario

O Guia do Usuário foi desenvolvido como uma ferramenta interativa para auxiliar os usuários na utilização do aço tool. A guia é apresentada em uma janela separada que permite a navegação pelos principais recursos do programa.

Além disso, foi incluído um atalho para um catálogo externo da Gerdau, permitindo que o usuário consulte dados adicionais sem sair do ambiente do programa.

Figura 7 – Guia de Usuário



Guia de Usuário

Bem-vindo ao software de análise estrutural! Este guia fornece uma visão geral do uso e funcionalidades do programa.

📌 **1. Inserção de Dados**
- Escolha o tipo de aço na janela principal
- Clique em "Inserir Dados" para adicionar um novo elemento estrutural.
- Escolha o tipo de perfil e selecione um código disponível. Se quiser ver as informações do perfil clicke em exibir dados de perfil
- Defina os esforços e parâmetros estruturais.

🔎 **2. Verificação de Esforços**
- Após inserir os dados, clique em "Verificar esforços".
- O software calculará automaticamente os parâmetros de tração e compressão.
- Resultados serão exibidos com um aviso indicando conformidade com a norma NBR 8800.

📁 **3. Exportação e Importação**
- Use "Guardar Elementos" para salvar seu progresso em um arquivo.
- A opção "Importar Elementos" permite carregar arquivos previamente salvos.
- Pode ver as informações de cada elementos guardado no botão de exibibr elemento na barra lateral esquerda da janela principal.

📜 **4. Geração do Memorial de Cálculo**
- Após as análises, clique em "Imprimir Memorial" para gerar um relatório PDF detalhado.

🛠 **5. Edição e Exclusão de Elementos**
- Você pode editar os elementos salvos clicando em "Editar Elementos".
- Para remover um elemento, utilize "Apagar Elementos".

Não esqueça que não deve mudar o nome e nem o formato dos arquivos CSV. Você pode adicionar perfis que não se encontrem nas listas disponíveis!

Basta entrar no arquivo com o tipo de perfil que você deseja adicionar e inserir as informações seguindo o padrão do catálogo com link no final da guia.

Cada coluna tem um valor específico que deve ser preenchido, como área, largura de abas, inércia.

Se precisar de mais informações, consulte nosso suporte técnico: **+55 98 4250-327** (Alejandro). Bom trabalho! 🚀

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

6.3 Inserir Dados

Os dados de entrada são obtidos a partir de cálculos manuais ou softwares de cálculos estruturais; estes referem-se aos esforços, propriedades e condições de engaste nos elementos. Poderão ser inseridos manualmente ou importados de arquivos previamente inseridos em formatos de arquivo JSON.

Caso o usuário opte por inserir os dados manualmente, uma nova aba será aberta como a imagem a seguir:

Figura 8 – Interface de dados de entrada

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os tipos de perfil disponíveis são: I, H e 2L. O código do perfil representa um modelo de perfil obtido do banco de dados. O botão de exibir dados do perfil permite visualizar as

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

propriedades geométricas de cada perfil.

Existe um campo de entrada para o esforço correspondente, comprimento do elemento e também inclui uma *checkbox* para indicar se o perfil possui furos na seção transversal. Caso essa opção seja selecionada pelo usuário, o software automaticamente exibe um novo campo para a entrada da área líquida da seção (cm^2).

A seleção das condições de apoio do elemento estrutural, representadas pelos coeficientes de comprimento eficaz K_x, K_y e K_z. Esses coeficientes influenciam diretamente a análise de estabilidade global do elemento e são utilizados no cálculo da flambagem nas diferentes direções principais da seção transversal. Para possibilitar essa configuração, foram implementados dropdowns, nos quais o usuário pode selecionar entre diferentes opções de restrição das extremidades da barra, tais como:

- Engastado-Engastado ($K = 0.5$)
- Engastado-Livre ($K = 2.0$)
- Rotulado-Rotulado ($K = 1.0$)
- Engastado-Rotulado ($K = 0.7$)

Foi incluído um botão de ajuda ("?") ao lado do título "Condições de Apoio"e "Tipo de perfil". Esse botão tem a função de fornecer informações adicionais ao usuário. Ao ser acionado, este botão exibe uma janela emergente contendo informação referente ao *label* no qual o botão se encontra.

O botão "Adicionar Elemento"é responsável por processar os dados inseridos e armazená-los na lista de elementos do *software*, e o botão "Fechar", que permite encerrar a janela de inserção e retornar à interface principal.

6.4 Verificação de Esforços

A execução da função `verificar_esforços` verifica se há elementos armazenados para análise. Caso não existam, uma mensagem de erro é exibida ao usuário. Em seguida, o tipo de aço selecionado pelo usuário é recuperado da interface gráfica e suas propriedades, a resistência ao escoamento e resistência à ruptura, são extraídas do dicionário `tipos_aco`. São definidos os fatores de segurança definidos pela tabela 3 da (NBR:8800, 2024) considerando o estado-límite ultimo (ELU), sendo:

$$\gamma_{a1} = 1.1, \quad \text{(aplicado à resistência ao escoamento)}$$

$$\gamma_{a2} = 1.25, \quad \text{(aplicado à resistência à ruptura)}$$

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Após essa etapa, é criado um *loop* que percorre a lista `elementos_armazenados`, analisando cada perfil individualmente. Para cada elemento, são extraídos os dados de entrada e armazenados num novo dicionário chamado barra. Se o esforço for positivo, significa que o perfil está submetido à tração pura. O condicional *if* executa o cálculo das resistências nominais do perfil, considerando dois critérios:

- **Resistência à tração da seção bruta:**

$$N_{t,Rd}^{bruta} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \tag{6.1}$$

  onde:

  - $N_{t,Rd}^{bruta}$ é a resistência à tração considerando a seção bruta, em kN;
  - A_g é a área bruta da seção transversal, em cm^2;
  - f_y é a resistência ao escoamento do aço, em MPa;
  - γ_{a1} é o coeficiente de segurança normativo.

- **Resistência à tração da seção líquida:**

$$N_{t,Rd}^{liquida} = \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}} \tag{6.2}$$

  onde:

  - $N_{t,Rd}^{líquida}$ é a resistência à tração considerando a seção líquida, em kN;
  - A_e é a área líquida da seção transversal, em cm^2;
  - f_u é a resistência à ruptura do aço, em MPa;
  - γ_{a2} é o coeficiente de segurança normativo.

O menor valor entre essas duas resistências é considerado como a capacidade resistente final:

$$N_{t,Rd}^{definitivo} = \min\left(N_{t,Rd}^{bruta}, N_{t,Rd}^{liquida}\right) \tag{6.3}$$

onde:

- $N_{t,Rd}^{definitivo}$ é a resistência à tração final adotada, em kN.

A razão entre a resistência adotada e o esforço aplicado é calculada por:

$$\text{Relacao}_t = \frac{N_{t,Rd}^{definitivo}}{N_{t,sd}} \tag{6.4}$$

onde:

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

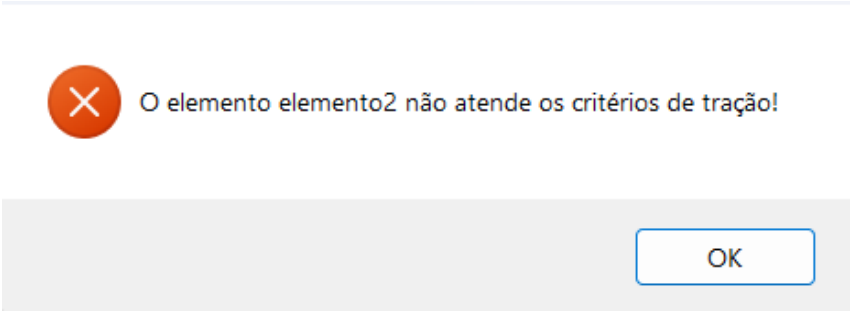
- Relação$_t$ é a relação entre resistência à tração e esforço aplicado, adimensional;
- $N_{t,sd}$ é o esforço solicitante de tração, em kN.

Se a seguinte condição for satisfeita:

$$N_{t,Rd}^{definitivo} \geq N_{t,sd} \tag{6.5}$$

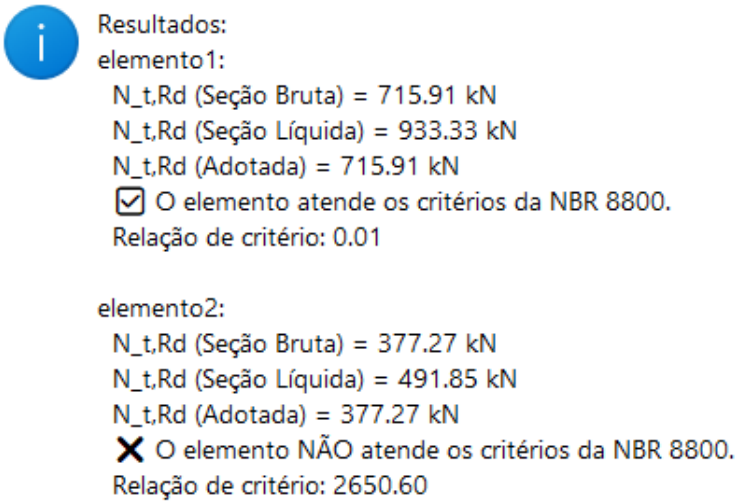
O perfil atende aos critérios normativos; caso contrário, um alerta de erro é emitido ao usuário. Uma janela de feedback é exibida ao usuário, apresentando os resultados da análise estrutural.

Figura 9 – Aviso de Não Conformidade aos Criterios de Tração



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 10 – Feedback de Verificação



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Os resultados são guardados no dicionário mediante o comando `barra.update`.

Caso o esforço aplicado seja negativo, o perfil está submetido à compressão. É calculado o fator de redução associado à esbeltez do elemento Q, que corrige as resistências para efeitos de flambagem local do elemento. Cada dicionário tem uma chave que guarda o tipo de perfil selecionado; durante o *loop*, é feito um chamado desta chave para classificar o grupo do perfil e fazer o cálculo de redução da mesa e alma correspondente.

O fator de redução global Q é definido como o produto dos fatores de redução da alma Q_a e da mesa Q_s, conforme a equação:

$$Q = Q_a \cdot Q_s \tag{6.6}$$

onde:

- Q_a é o fator de redução devido à esbeltez da alma;
- Q_s é o fator de redução devido à esbeltez da mesa.

Os valores de Q_a e Q_s são determinados separadamente para avaliar a instabilidade local da alma e da mesa, quando estes elementos têm uma esbeltez superior ao limite estabelecido na tabela F.1 da NBR:8800 (2024).

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \tag{6.7}$$

onde:

- Q_a é o fator de redução devido à esbeltez da alma.
- A_{ef} é a área efetiva da seção transversal, em cm^2;
- A_g é a área bruta da seção transversal, em cm^2.

A área efetiva A_{ef} é obtida a partir da seguinte relação:

$$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef}) \cdot t \tag{6.8}$$

onde:

- b é a largura do elemento comprimido AA, em cm;
- b_{ef} é a largura efetiva do elemento comprimido AA, em cm;
- t é a espessura do elemento comprimido AA, em cm.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

A largura efetiva dos elementos comprimidos AA é determinada por:

$$b_{ef} = 1,92 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \left[1 - \frac{c_a}{b/t} \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \right] \leq b \tag{6.9}$$

onde:

- E é o módulo de elasticidade do aço, em kN/cm^2;
- σ é a tensão atuante no elemento, em MPa;
- c_a é um coeficiente, sendo igual a 0,38 para mesas ou almas de seções tubulares retangulares e 0,34 para os demais elementos.

A tensão σ no elemento analisado é obtida conservadoramente por :

$$\sigma = f_y \tag{6.10}$$

O fator de redução da resistência da mesa Q_s depende da classificação da mesa do perfil na Tabela F.1 da NBR 8800:2024.

O coeficiente de flambagem (λ_0) é determinado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} \tag{6.11}$$

onde:

- λ_0 é o coeficiente de flambagem adimensional;
- Q é o fator de redução devido à esbeltez do elemento, adimensional;
- A_g é a área bruta da seção transversal, em cm^2;
- f_y é a resistência ao escoamento do aço, em MPa;
- N_e é o esforço crítico de flambagem, em kN.

O esforço crítico de flambagem N_e é obtido como o menor entre os valores:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L)^2}, \quad N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L)^2}, \quad N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L)^2} + GJ \right] \tag{6.12}$$

onde:

- N_{ex} é o esforço crítico de flambagem no eixo X, em kN;

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

- N_{ey} é o esforço crítico de flambagem no eixo Y, em kN;
- E é o módulo de elasticidade do aço, em kN/m^2;
- I_x, I_y são os momentos de inércia nas direções principais, em m^4;
- K_x, K_y, K_z são os fatores de comprimento efetivo.
- L é o comprimento do elemento, em m.
- C_w- Constante de empenamento da seção transversal em m^6;
- G - Módulo de elasticidade transversal (cisalhamento) do aço em kn/m^2;
- J - Constante de torção da seção transversal em m^4;
- r$_0$ - Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento em m.

Segundo a NBR:8800 (2024) para perfis monossimétricos, que é o caso de perfis dupla cantoneira de abas iguais, é feito adicionalmente a verificação de flambagem elástica por flexo-torção:

$$N_{eyz} = \frac{N_{ey} + N_{ez}}{2 * (1 - \left(\frac{y_o}{r_o}\right)^2)} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ey}N_{ez}\left[1 - \left(\frac{y_o}{r_o}\right)^2\right]}{(N_{ey} + N_{ez})^2}} \right] \tag{6.13}$$

onde:

- N_{eyz} - Carga crítica elástica considerando flexo-torção, em kN;
- N_{ey} - Carga crítica elástica para flambagem no eixo y, em kN;
- N_{ez} - Carga crítica elástica para flambagem no eixo z, em kN;
- y_o - Coordenada do centro de cisalhamento no eixo y, em relação ao centroide da seção, em m;
- r_o - Raio de giração polar da seção transversal, em m.

O fator de resistência χ é determinado pela seguinte relação:

$$\chi = \begin{cases} 0.658^{\lambda_0^2}, & \text{se } \lambda_0 \leq 1.5 \\ \frac{0.877}{\lambda_0^2}, & \text{se } \lambda_0 > 1.5 \end{cases} \tag{6.14}$$

onde:

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

- χ é o fator de resistência adimensional.

A resistência à compressão do perfil (N_{crd}) é então calculada como:

$$N_{crd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \tag{6.15}$$

onde:

- N_{crd} é a resistência à compressão final do perfil, em kN.

Se a seguinte condição for satisfeita:

$$N_{c,Rd} \geq N_{c,sd} \tag{6.16}$$

O perfil atende aos critérios normativos para elementos submetidos à compressão ; se a condição não for satisfeita, um alerta de erro é emitido ao usuário, similar à figura 9, e posteriormente uma janela de feedback é exibida ao usuário, semelhante à figura 10.

6.5 Verificação do limite de esbeltez

A esbeltez de um elemento estrutural é definida pela relação entre o comprimento de flambagem e o raio de giração da seção transversal, dada pela equação:

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r} \tag{6.17}$$

onde:

- $\lambda =$ índice de esbeltez,
- $K =$ fator de comprimento efetivo da barra (depende das condições de apoio),
- $L =$ comprimento real da barra (m),
- $r =$ raio de giração da seção (m), definido como:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \tag{6.18}$$

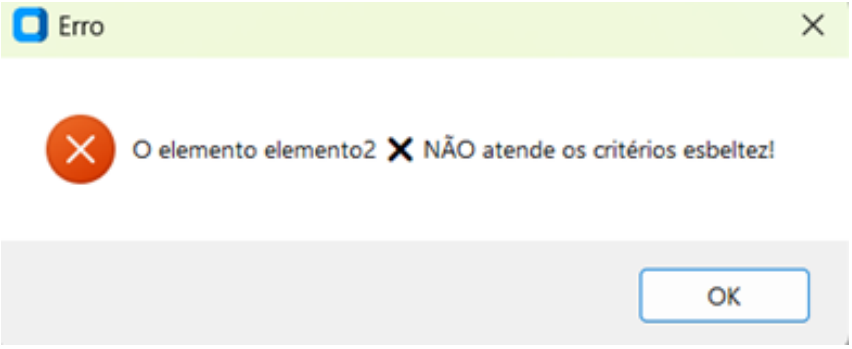
Sendo I o momento de inércia da seção transversal e A a área da seção.

A norma NBR 8800:2024 define o limite de esbeltez para elementos tracionados como 300 e 200 para elementos comprimidos, a verificação deste parâmetro é feita dentro da mesma

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

função verificar, caso o elemento viole o limite de esbeltez, uma mensagem de alerta é mostrada ao usuário.

Figura 11 – Menssagem de erro quando o elemento não atende ao critério de esbeltez



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

7 Resultados e Discussões

Apresenta-se nesta seção o processo de validação dos resultados do Aço tool é discussões referentes aos resultados.

O processo de validação foi conduzido em duas etapas : A primeira etapa consistiu na validação interna durante o desenvolvimento, onde o software foi testado em todos os cenários possíveis, modificando as propriedades dos perfis diretamente nos arquivos CSV utilizados pelo programa. A segunda etapa envolveu a comparação dos resultados gerados pelo *software* com os obtidos por meio do *software* de análise estrutural Autodesk Robot Structural Analysis e de cálculos manuais extraídos de uma apostila de exercícios estruturais.

7.1 Validação Interna Durante o Desenvolvimento

A primeira etapa de validação foi realizada simultaneamente ao desenvolvimento do *software*, garantindo que eventuais erros de programação fossem corrigidos à medida que surgissem. Para isso, foi selecionado um perfil metálico do tipo H, cuja geometria e propriedades foram modificadas diretamente no arquivo CSV que contém suas informações. Dessa forma, foi possível testar o comportamento do programa em diferentes cenários.

Os testes realizados incluíram:

- Esforço axial de tração: análise do perfil submetido exclusivamente à tração.
- Esforço axial de compressão: verificação dos limites de resistência à compressão.
- Perfis laminados e soldados.
- Alma esbelta e não esbelta.
- Abas finas e não finas.

Para identificar e corrigir erros no código, foi implementado um bloco de tratamento de exceções que capturava qualquer falha durante a execução dos cálculos, informando ao usuário a origem do problema.

```
      except Exception as e:
print(f"Erro ao calcular os resultados: e")
messagebox.showerror("Erro", "Houve um erro ao calcular os resultados.")
```

Após a primeira etapa, na qual foi verificado que as formulações implementadas no *software* garantem saída de resultados , foi realizada uma fase de ajustes voltada para a conversão

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

de unidades. Essa etapa foi essencial para garantir que todas as saídas do programa estivessem coerentes, evitando discrepâncias nos valores calculados. Foram feitas revisões detalhadas nos fatores de conversão entre diferentes sistemas de unidades, assegurando que grandezas como força, comprimento, momento de inércia e tensão estivessem expressas corretamente.

7.2 Comparação de resultados

Na segunda etapa da validação, os resultados obtidos pelo *software* desenvolvido foram comparados com valores gerados pelo *software* comercial Autodesk Robot Structural Analysis e com exemplos presentes na apostila de Machado (2010)

7.2.1 Comparação com o *software* Robot Structural Analysis

Para validar a precisão dos cálculos do programa, foi selecionado um perfil disponível no catálogo do Robot Structural Analysis. As propriedades geométricas desse perfil foram extraídas e inseridas manualmente no arquivo CSV "PERFIS H". Em seguida, os cálculos de resistência à compressão foram realizados em ambas as plataformas e os resultados comparados.

Figura 12 – Parâmetros geométricos e verificações do elemento

MATERIAL:
ASTM A36 Fy = 250.00 MPa Fu = 400.00 MPa E = 200000.00 MPa

PARÂMETROS DA SEÇÃO: W150x37,1

d=16.2 cm	Ay=35.73 cm2	Az=13.12 cm2	Ax=47.80 cm2
bf=15.4 cm	Iy=2244.00 cm4	Iz=707.00 cm4	J=18.48 cm4
tw=0.8 cm	Sy=277.04 cm3	Sz=91.82 cm3	
tf=1.2 cm	Zy=313.34 cm3	Zz=140.36 cm3	

PARÂMETROS DE MEMBRO:

Lcy = 3.00 m	Lcz = 3.00 m
Ky = 1.00	Kz = 1.00
Xy = 0.90	Xz = 0.72

FORÇAS INTERNAS:
Nc,Sd = 1.41 kN

RESISTÊNCIAS DO PROJETO
Nc,Rd = 786.85 kN

FATORES DE SEGURANÇA
ga2 = 1.35 ga1 = 1.10

ELEMENTOS DE SEÇÃO:
Mesa = Não fino Alma = Não fino

FÓRMULAS DE VERIFICAÇÃO:
Nc,Sd/Nc,Rd = 0.00 < 1.00 (5.3.1) Verificado
Lcy/ry = 43.78 < (Lc/r),max = 200.00 Lcz/rz = 78.01 < (Lc/r),max = 200.00 ESTÁVEL

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Figura 13 – Output do software

Memorial de Cálculo

Data: 19/02/2025 14:24:58

Elemento 1: elemento1

Propriedades Geométricas

Massa Linear: 143.8 kg/m
ID: robot
Área Bruta: 47.8 cm²
Altura: 162 cm
Espessura da Alma (tw): 8.0 cm
Altura da Alma (almah): 138.0 cm
Espessura da Mesa (tf): 12.0 cm
Largura da Mesa (bf): 154 cm
Momento de Inércia Ix: 2244 cm^4
Módulo de Resistência Wx: 277.04 cm³
Raio de Giração Rx: 7.16 cm
Módulo Plástico Zx: 313.34 cm³
Momento de Inércia Iy: 707 cm^4
Módulo de Resistência Wy: 91.82 cm³
Raio de Giração Ry: 3.84 cm
Módulo Plástico Zy: 140.36 cm³

Verificação de Esforços

Esforço Axial: -10.0 kN

Verificação de Esbeltez

Índice de Esbeltez: 41.899441340782126
Fórmula: $\lambda = L / r$
Limite de Esbeltez: 200

Verificação à Compressão

Ncrd = χ * Q * A * fy / γ
Fator de redução associado à resistência a compressão χ: 0.7242933033063438
Fator de redução Qa: 1
Fator de redução Qs: 1
Fator total de redução Q: 1
Comprimento de flambagem: 3.0 m
Ncrd: 786.8459067737097 kN
Ncsd: 10.0 kN
■ **Atende à NBR 8800**

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Como visto na imagem 12 e 15, a verificação indicou que o valor da resistência à compressão do perfil calculado pelo Robot Structural Analysis foi idêntico ao obtido pelo *software*e desenvolvido, com uma diferença apenas na aproximação decimal, validando a implementação das equações normativas e dos fatores de redução adotados. Confirmando a precisão do *software*e na avaliação de perfis metálicos submetidos à compressão axial.

Existe uma pequena diferença no cálculo de índice de esbeltez, no entanto, isto se deve ao fato de que os raios de giração foram inseridos no arquivo CVS desconsiderando o raio de concordância do perfil, isto porque este valor não é fornecido pelo *software*e.

Adicionalmente, foi modelado no Robot Structural o perfil W 460X68 do catálogo para

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

comparação de resultados.

Figura 14 – Output do software

MATERIAL:
ASTM A36 Fy = 250.00 MPa Fu = 400.00 MPa E = 200000.00 MPa

PARÂMETROS DA SEÇÃO: 460 x 68

d=45.9 cm	Ay=47.43 cm2	Az=41.75 cm2	Ax=86.38 cm2
bf=15.4 cm	Iy=29268.17 cm4	Iz=940.10 cm4	J=45.74 cm4
tw=0.9 cm	Sy=1275.86 cm3	Sz=122.09 cm3	
tf=1.5 cm	Zy=1468.31 cm3	Zz=191.47 cm3	

PARÂMETROS DE MEMBRO:

Lcy = 3.00 m	Lcz = 3.00 m
Ky = 1.00	Kz = 1.00
Xy = 0.99	Xz = 0.65

FORÇAS INTERNAS:
Nc,Sd = 1.41 kN

RESISTÊNCIAS DO PROJETO
Nc,Rd = 1266.43 kN

FATORES DE SEGURANÇA
ga2 = 1.35 ga1 = 1.10

ELEMENTOS DE SEÇÃO:
Mesa = Não fino Alma = Esbelto

FÓRMULAS DE VERIFICAÇÃO:
Nc,Sd/Nc,Rd = 0.00 < 1.00 (5.3.1) Verificado
Lcy/ry = 16.30 < (Lc/r),max = 200.00 Lcz/rz = 90.94 < (Lc/r),max = 200.00 ESTÁVEL

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Figura 15 – Output do software

Memorial de Cálculo

Data: 23/02/2025 22:04:15

Elemento 1: elemento1

Propriedades Geométricas

Massa Linear: 68.0 kg/m
ID: W 460 x 68,0
Área Bruta: 87.6 cm²
Altura: 459 cm
Espessura da Alma (tw): 9.1 cm
Altura da Alma (almah): 428.2 cm
Espessura da Mesa (tf): 15.4 cm
Largura da Mesa (bf): 154 cm
Momento de Inércia Ix: 29851 cm^4
Módulo de Resistência Wx: 1300.7 cm³
Raio de Giração Rx: 18.46 cm
Módulo Plástico Zx: 1.0 cm³
Momento de Inércia Iy: 941 cm^4
Módulo de Resistência Wy: 122.2 cm³
Raio de Giração Ry: 3.28 cm
Módulo Plástico Zy: 1.0 cm³

Verificação de Esforços

Esforço Axial: -10.0 kN

Verificação de Esbeltez

Índice de Esbeltez: 91.46341463414635
Fórmula: $\lambda = L / r$
Limite de Esbeltez: 200

Verificação à Compressão

$Ncrd = \chi * Q * A * fy / \gamma$
Fator de redução associado à resistência a compressão χ: 0.6518240666562183
Fator de redução Qa: 0.9636273242558835
Fator de redução Qs: 1
Fator total de redução Q: 0.9636273242558835
Comprimento de flambagem: 3.0 m
Ncrd: 1250.5208217365175 kN
Ncsd: 10.0 kN
Verificação da resistência a compressão: 0.007996668129134904
■ **Atende à NBR 8800**

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

É possível observar que a resistência axial à compressão obtida pelo Robot Structural Analysis apresenta um valor muito próximo ao calculado pelo *software*e desenvolvido, com uma diferença de apenas 1,29%. Essa discrepância deve-se, principalmente, às aproximações realizadas na entrada de dados pelo Robot Structural Analysis, além do fato de que o *software*e desenvolvido foi programado para calcular a tensão atuante no elemento conforme indicado na Equação 6.10.

Esse resultado evidencia a importância de um *software* educacional que permita a

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

análise detalhada de cada parâmetro individualmente, possibilitando a compreensão das divergências nos resultados.

7.2.2 Comparação com Bibliografía

7.2.2.1 Verificação à compressão

A segunda fase da validação foi realizada por meio da comparação dos resultados obtidos pelo *software* com aqueles apresentados na apostila de Machado (2010), que traz exemplos resolvidos de perfis metálicos submetidos a esforços de tração e compressão. O foco principal dessa etapa foi a verificação de perfis compostos do tipo 2L (duas cantoneiras de abas iguais), um caso inicialmente não contemplado na programação original do *software*.

Durante os testes, verificou-se que o programa não havia sido projetado para realizar cálculos diretamente sobre esse tipo de perfil. No entanto, devido à sua estrutura modular, a funcionalidade foi rapidamente incorporada sem a necessidade de reformulação completa do código. Os usuários podem inserir manualmente os parâmetros dos perfis 2L no arquivo CSV "PERFIL 2L"pois não foi disponibilizado um catálogo deste tipo de perfil.

A validação foi conduzida por meio da comparação dos valores de resistência à compressão e à tração entre o *software* desenvolvido e os cálculos apresentados na apostila de Machado.

Figura 16 – Parâmetros geométricos do perfil

Exercício 2.2: Dimensionamento de uma barra comprimida NBR-8800(2008)

1 - Dados de entrada

1.1 - Propriedades geométricas

1.1.1 - Perfil adotado (VER ANEXO H)

Perfil = "2L 64 x 64" ·mm $P = 17.56 \cdot \frac{kg}{m}$

Largura das abas:..... $b_f = 63.5 \cdot mm$

Espessura das abas:..... $t_f = 9.53 \cdot mm$

Espessura da chapa de ligação:..... $d = 6.35 \cdot mm$

Área bruta:..... $A_g = 22.32 \cdot cm^2$

Mom. de Inércia X:..... $I_x = 82 \cdot cm^4$

Coordenada do centróide:..... $y = 1.93 \cdot cm$

Raio de Giração X:..... $r_x = 1.91 \cdot cm$

Raio de Giração Y:..... $r_y = 2.95 \cdot cm$

Raio de Giração Z:..... $r_{min} = 1.22 \cdot cm$

Coord. X Centro de Torção:..... $x_o := 0 \cdot cm$

Coord. Y Centro de Torção:..... $y_o := 1.88 \cdot cm$

Mom. de Inércia Y:..... $I_y := 2 \cdot \left[\frac{I_x}{2} + \frac{A_g}{2} \cdot \left(\frac{d}{2} + y \right)^2 \right]$ $I_y = 194.74 \cdot cm^4$

Mom. de Inércia Torção:..... $I_t := \frac{4 \cdot b_f \cdot t_f^3}{3}$ $I_t = 7.33 \cdot cm^4$

Const. de Empenamento:..... $C_w := 0$ $C_w = 0 \cdot cm^6$

Fonte: (MACHADO, 2010).

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Figura 17 – Verificações do perfil

2.2.1 - Flambagem por flexão em x

$$N_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} \qquad N_{ex} = 258.98 \cdot kN$$

2.2.2 - Flambagem por flexo-torção

- Flambagem por flexão em y

$$N_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} \qquad N_{ey} = 615.05 \cdot kN$$

- Flambagem por torção

$$r_o := \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2 + y_o^2} \qquad r_o = 3.99 \cdot cm$$

$$N_{ez} := \left(\frac{1}{r_o^2}\right) \cdot \left[\left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2}\right] + G \cdot I_t\right] \qquad N_{ez} = 3552.18 \cdot kN$$

$$N_{eyz} := \frac{N_{ey} + N_{ez}}{2 \cdot \left[1 - \left(\frac{y_o}{r_o}\right)^2\right]} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ey} \cdot N_{ez} \cdot \left[1 - \left(\frac{y_o}{r_o}\right)^2\right]}{(N_{ey} + N_{ez})^2}}\right] \qquad N_{eyz} = 589 \cdot kN$$

2.3 Normal resistente de cálculo

2.3.1 - Força axial de flambagem elástica

$$N_e := \min(N_{ex}, N_{ey}, N_{ez}) \qquad N_e = 258.98 \cdot kN$$

Situação = "Flambagem por flexão em X"

2.3.2 - Índice de esbeltes reduzido

$$\lambda_o := \sqrt{Q \cdot \frac{N_{pl}}{N_e}} \qquad \lambda_o = 1.47$$

2.3.3 - Fator de redução χ

$$\chi := \begin{cases} 0.658^{\lambda_o^2} & \text{if } \lambda_o \le 1.5 \\ \frac{0.877}{\lambda_o^2} & \text{if } \lambda_o > 1.5 \end{cases} \qquad \chi = 0.406$$

2.3.4 -Normal resistente de cálculo

$$N_{Rd} := \frac{(\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y)}{\gamma_{a1}} \qquad N_{Rd} = 205.87 \cdot kN$$

2.3.5 - Verificação da resistência a compressão

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} = 0.96 \qquad \text{Verificação} = \text{"OK"}$$

Fonte: (MACHADO, 2010).

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Figura 18 – Output do software

Memorial de Cálculo

Data: 19/02/2025 16:06:39

Elemento 1: elemento1

Propriedades Geométricas

Massa Linear: 17.56 kg/m
ID: 2L
Área Bruta: 22.32 cm²
Altura: 63.5 cm
Espessura da Alma (tw): 6.35 cm
Altura da Alma (almah): 44.44 cm
Espessura da Mesa (tf): 9.53 cm
Largura da Mesa (bf): 63.5 cm
Momento de Inércia Ix: 82 cm^4
Módulo de Resistência Wx: 1 cm³
Raio de Giração Rx: 1.91 cm
Módulo Plástico Zx: 1 cm³
Momento de Inércia Iy: 194.74 cm^4
Módulo de Resistência Wy: 1 cm³
Raio de Giração Ry: 2.95 cm
Módulo Plástico Zy: 1 cm³

Verificação de Esforços

Esforço Axial: -197.75 kN

Verificação de Esbeltez

Índice de Esbeltez: 84.7457627118644
Fórmula: $\lambda = L / r$
Limite de Esbeltez: 200

Verificação à Compressão

$Ncrd = \chi * Q * A * fy / \gamma$
Fator de redução associado à resistência a compressão χ: 0.40583166757641964
Fator de redução Qa: 1
Fator de redução Qs: 1
Fator total de redução Q: 1
Comprimento de flambagem: 2.5 m
Ncrd: 205.8673368251292 kN
Ncsd: 197.75 kN
Verificação da resistência a compressão: 0.9605700595815044
■ **Atende à NBR 8800**

Fonte: Autor (2025).

Os resultados demonstraram coincidência exata entre os valores obtidos, o que reforça a confiabilidade do programa na análise estrutural de perfis metálicos simples e compostos.

7.2.2.2 Verificação a tração

A verificação da normativa a tração foi feita mediante a comparação do exercício 1.4 b da apostila de Machado (2010)

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Figura 19 – Parâmetros geométricos do perfil

Exercício 1.4
Treliça: Dimensionamento de barra tracionada - Perfil L
NBR-8800(2008)

1 - Dados de entrada

1.1 - Propriedades geométricas

1.1.1 - Perfil adotado (VER ANEXO A)

Perfil = "L 102 x 102" ·mm $P = 21.26 \cdot \frac{kg}{m}$

Largura das abas:..... $b_f = 101.6 \cdot mm$

Espessura das abas:..... $t_f = 1.43 \cdot mm$

Espessura da chapa de ligação:..... $d := t_f = 1.43 \cdot mm$

Área bruta:..... $A_g = 26.96 \cdot cm^2$

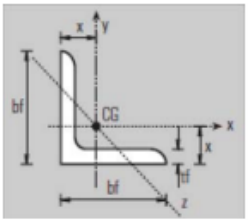
Mom. de Inércia X:..... $I_x = 254 \cdot cm^4$

Coordenada do centróide:..... $y = 3.07 \cdot cm$

Raio de Giração X:..... $r_x = 3.07 \cdot cm$

Raio de Giração Y:..... $r_y = 3.07 \cdot cm$

Raio de Giração Z:..... $r_{min} = 1.98 \cdot cm$



1.1.2 - Ligação parafusada

Diâmetro do parafuso:..... $d_p := 22 \cdot mm$

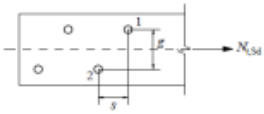
Número de parafusos na seção crítica:..... $NPS := 1$

Nº de Linhas de parafuso transversais a direção do esforço:..... $NLP := 2$

Nº de trechos inclinados na seção crítica:..... $NTI := 0$

Espaçamento longitudinal dos furos: $s := 0 \cdot cm$

Espaçamento transversal dos furos: $g := 0 \cdot cm$



Fonte: (MACHADO, 2010).

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Figura 20 – Verificações do perfil à tração

2 - Verificação do Estado Limite Último (ELU)

2.1 Escoamento da seção bruta

$Nt_{Rd1} := A_g \cdot \frac{f_y}{\gamma_{a1}}$ $\quad Nt_{Rd1} = 612.73 \cdot kN$

2.2 - Ruptura da seção efetiva

2.2.1 - Área líquida (A_n):

$A_n := A_g - NPS \cdot (d_p + 3.5mm)(2t_f) + NTI \cdot \frac{s^2}{4 \cdot g} \cdot (2t_f)$ $\quad A_n = 26.23 \cdot cm^2$

- Coeficiente de redução (C_t):

Excentricidade da ligação (e_c):..... $e_c := y$ $\quad e_c = 30.7 \cdot mm$

Comprimento da ligação (L_c):..... $L_c := 3 \cdot d_p \cdot (NLP - 1)$ $\quad L_c = 66 \cdot mm$

$C_t := 1 - \frac{e_c}{L_c}$ $\quad C_t = 0.53$ $\quad$ ***Obs.: C_t deve está entre 0,6 e 0,9***

$C_t = 0.6$

2.2.2 - Cálculo da área efetiva (A_e):

Fração do esforço na área líquida: $\alpha := 1$

Obs.: **α** é a fração do esforço que chega à área líquida (seção crítica), considerando distribuição igual do esforço de tração em todos os parafusos.

$A_e := C_t \cdot \frac{A_n}{\alpha}$ $\quad A_e = 15.74 \cdot cm^2$

$Nt_{Rd2} := \frac{A_e \cdot f_u}{\gamma_{a2}}$ $\quad Nt_{Rd2} = 466.33 \cdot kN$

2.3 - Resistência de Cálculo à Tração (Nt_{Rd}):

$Nt_{Rd} := \min(Nt_{Rd1}, Nt_{Rd2})$ $\quad Nt_{Rd} = 466.33 \cdot kN$

2.4 - Verificação da resistência a tração

$\frac{Nt_{Sd}}{Nt_{Rd}} = 0.96$ $\quad ELU = "OK"$

Fonte: (MACHADO, 2010).

Figura 21 – Verificações de esbeltez

3 - Verificação do Estados Limites de Serviço (ELS)

Esbeltez máxima: $\lambda_{max} := 300$

3.1 - Índice de esbeltez do conjunto (seção composta)

$\lambda_x := \frac{L_x}{r_x}$ $\quad \lambda_x = 155.84$

$\lambda_y := \frac{L_y}{r_y}$ $\quad \lambda_y = 103.15$

Fonte: (MACHADO, 2010).

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Este exercício permitiu validar os cálculos que envolvem a área líquida, pois este parâmetro é inserido manualmente caso haja algum tipo de furo no elemento.

Figura 22 – Output do software

Memorial de Cálculo

Data: 19/02/2025 17:39:38

Elemento 1: elemento1

Propriedades Geométricas

Massa Linear: 21.42 kg/m
ID: 2L76X76
Área Bruta: 27.22 cm²
Altura: 76.2 cm
Espessura da Alma (tw): 6.35 cm
Altura da Alma (almah): 57.14 cm
Espessura da Mesa (tf): 9.53 cm
Largura da Mesa (bf): 76.2 cm
Momento de Inércia Ix: 150 cm^4
Módulo de Resistência Wx: 1 cm³
Raio de Giração Rx: 2.31 cm
Módulo Plástico Zx: 1 cm³
Momento de Inércia Iy: 194.74 cm^4
Módulo de Resistência Wy: 1 cm³
Raio de Giração Ry: 3.49 cm
Módulo Plástico Zy: 1 cm³

Verificação de Esforços

Esforço Axial: 450.0 kN

Verificação de Esbeltez

Índice de Esbeltez: 103.15186246418338
Fórmula: $\lambda = L / r$
Limite de Esbeltez: 300

Verificação à Tração

N_t,Rd (Bruta): 618.6363636363636 kN
N_t,Rd (Líquida): 466.3703703703704 kN
N_t,Rd (Adotada): 466.3703703703704 kN
Verificação da resistência a tração: 0.9648983481575604
■ **Atende à NBR 8800**

Fonte: Autor (2025).

Como é possível observar na comparação das imagens 20 e 21 com 22 os valores de resistência à tração e índice de esbeltez calculados pelo *software* foram idênticos aos calculados pelo Machado (2010), confirmando a veracidade dos resultados do *software*.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

8 Considerações Finais

O Aço Tool apresentou uma abordagem didática e interativa para auxiliar usuários no aprendizado do dimensionamento de peças metálicas, alinhado aos critérios da NBR 8800:2024. O *software* desenvolvido oferece suporte na análise automática de esforços solicitantes e resistentes, proporcionando uma solução abrangente para a verificação estrutural de perfis metálicos do tipo I, H e 2L. É possível garantir conformidade com as exigências normativas e tornar o processo de verificação mais eficiente para estudantes e profissionais da engenharia civil.

Desenvolveu-se uma interface gráfica que oferece uma experiência intuitiva ao usuário, acompanhada de janelas auxiliares e um guia detalhado. Esses recursos facilitam tanto a compreensão do processo quanto a tomada de decisões ao longo do projeto.

Automatizou-se a verificação de perfis metálicos considerando os critérios da NBR 8800:2024 para resistência à tração e compressão. O software desenvolvido permitiu a análise eficiente dos elementos estruturais, avaliando índices de esbeltez, coeficientes de redução e verificações de flambagem, garantindo conformidade com as exigências normativas

Foi implementada a funcionalidade de exportação dos resultados em um memorial de cálculo estruturado, proporcionando aos usuários um registro detalhado das verificações realizadas. Esse recurso permitiu a sistematização dos cálculos, assegurando a rastreabilidade das análises e facilitando a conferência das informações por profissionais da área.

8.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para garantir a conclusão eficiente do *software* e aprimorar sua funcionalidade, algumas recomendações devem ser consideradas.

8.1.1 Implementação de Validações e Tratamento de Erros

O *software* depende da entrada de dados do usuário e da importação de arquivos CSV para realizar os cálculos estruturais. Recomenda-se agregar verificações automáticas para garantir que os valores inseridos sejam numéricos e estejam dentro de faixas aceitáveis.

8.1.2 Integração de maior número de perfis estruturais

Adicionar uma maior quantidade de catálogos, permitindo ao usuário escolher o tipo de fornecedor e adicionar uma interface de criação de perfis, onde possam ser inseridas propriedades geométricas básicas do perfil e o resto dos parâmetros sejam calculados automaticamente pelo *software*.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

8.1.3 Aprimoramento da Interface Gráfica

A interface gráfica baseada no *CustomTkinter* já proporciona um ambiente interativo para o usuário. Entretanto, melhorias na disposição dos elementos, no layout das janelas e na exibição dos resultados podem tornar o *software* mais intuitivo e acessível.

8.1.4 Geração de Relatórios Personalizados

Permitir que o usuário personalize este relatório, escolhendo quais informações incluir e gerando gráficos complementares, como curvas de esbeltez e mapas de tensões.

8.1.5 Ampliação das verificações estruturais

Recomenda-se a inclusão da verificação à flexão, incluindo tanto a flexão simples quanto a flexão composta, permitindo a análise de elementos estruturais submetidos a momentos fletores e verificações por cortante.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

Referências Bibliográficas

AUGUSTO, P.; PEREIRA, I.; ROCHELE, .; RIBEIRO, A. *Revista Eletrônica Engenharia Viva. (Online). Goiânia, v. 2, n. 2*. 2015. 17-29 p. Citado na página 13.

BASTO, P. E. de A.; JUNIOR, A. C. L. Ensino de bim em curso de graduação em engenharia civil em uma universidade dos eua: estudo de caso. *Ambiente Construído*, FapUNIFESP (SciELO), v. 16, p. 45–61, 12 2016. Citado na página 13.

BONZANINI, F. A. *Estudo comparativo entre o dimensionamento de estrutura metálica feito pela NBR 8800:2008 e pelo Eurocode 3*. Santa Cruz do Sul: Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), 2013. Acesso em: 11 mar. 2025. Disponível em: <https://repositorio.unisc.br/jspui/bitstream/11624/1136/1/Felipe%20Augusto%20Bonzanini.pdf>. Citado na página 16.

CARVALHO, R. C.; FILHO, J. R. F.; JUNIOR, S. F. A utilização de programas computacionais da área de estruturas no ensino de engenharia civil. In: *COBENGE*. [s.n.], 2002. Acesso em: 28/01/2025. Disponível em: <https://www.abenge.org.br/cobenge/legado/arquivos/20/st/t/t101.pdf>. Citado na página 16.

CASTRO, L. A. de. *Análise da segurança no projeto de estruturas: método dos estados limites*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 1997. Acesso em: 11 mar. 2025. Disponível em: <http://web.set.eesc.usp.br/static/media/producao/1997ME_LeilaAparecidadeCastro.pdf>. Citado na página 16.

CASTRO, L. A. de; MALITE, M. *Análise da segurança no projeto de estruturas: método dos estados limites*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2002. Acesso em: 11 mar. 2025. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/026df00a-46d0-4e66-80a5-85038b55f8cc/PROD_001173_SYSNO_1309407.pdf>. Citado na página 16.

CHECCUCCI, E. S. *Ensino-aprendizagem de BIM nos cursos de graduação em Engenharia Civil e o papel da Expressão Gráfica neste contexto*. Tese (Tese (Doutorado em Difusão do Conhecimento)) — Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2014. 235 f. il. Citado na página 13.

CLARK, A. *Pillow (PIL Fork) Documentation*. readthedocs, 2015. Disponível em: <https://buildmedia.readthedocs.org/media/pdf/pillow/latest/pillow.pdf>. Citado na página 21.

DINIS, F. M.; GUIMARÃES, A. S.; CARVALHO, B. R.; MARTINS, J. P. P. *Virtual and augmented reality game-based applications to civil engineering education*. [S.l.]: IEEE, 2017. Este articulo explica como el uso de software educaciones tiene efectos positivos em el aprendizaje de ingenieria civil. ISBN 9781509054671. Citado na página 13.

EASTMAN, C. M.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. 2nd. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-0-470-54137-1. Citado na página 13.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

GUIMARÃES, A.; HACKBARTH, C.; MELO, N. D. A. Uso de softwares no processo de ensino-aprendizagem dos cursos de engenharia civil da educação profissional e tecnológica. *Revista Extensão Cidadania*, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia/Edicoes UESB, v. 10, p. 84–100, 6 2022. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 17.

LAGOS, P. S. Ingeniería de software educativo, teorías y metodologías que la sustentan. *Revista Ingeniería Informática*, n. 6, 2000. Citado na página 13.

LEEUWEN, R. van; FERSTER, C. sectionproperties: A python package for the analysis of arbitrary cross-sections using the finite element method. *Journal of Open Source Software*, The Open Journal, v. 9, p. 6105, 4 2024. Citado na página 21.

LUNDH, F. An introduction to tkinter. *URL: www. pythonware. com/library/tkinter/introduction/index. htm*, 1999. Citado na página 19.

MACHADO, C. A. G. da S. M.; SILVA, A. D. F. G.; CARVALHO, D. F. A utilização de softwares no ensino e aprendizagem dos cursos de engenharia. *Revista de Ensino, Educação e Ciências Humanas*, Editora e Distribuidora Educacional, v. 22, p. 146–151, 6 2021. Citado na página 14.

MACHADO, R. T. *Dimensionamento e verificação de elementos de estrutura de aço*. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, 2010. Citado 7 vezes nas páginas 42, 46, 47, 48, 49, 50 e 51.

MALAGUTTI, M. B.; TORRESCASANA, C. E. N.; PAVAN, R. C. Comparação teórica e experimental da resistência à flexão de perfis metálicos laminados e formados a frio. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 10, n. 2, p. 72–82, 2015. Acessado em: 10 mar. 2025. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/download/30055/18990/157667>. Citado na página 13.

MCGOUGH, D.; AHMED, A.; AUSTIN, S. *Integration of BIM in Higher Education: Case Study of the Adoption of BIM into Coventry University 's Department of Civil Engineering, Architecture and Building*. 2013. 7-7 p. Este estudio de caso llego a la conclusion de que la metodologia BIM impulsiona las habilidades de los estudiantes. Citado na página 13.

MCKINNEY, W. *Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython*. 2. ed. [S.l.]: O'Reilly Media, 2017. Citado na página 20.

MCKINNEY, W. *et al.* Data structures for statistical computing in python. In: AUSTIN, TX. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*. [S.l.], 2010. v. 445, p. 51–56. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

MENDES, T. G.; FRAGA, S. S. *Desenvolvimento de software acadêmico para o estudo da análise estrutural*. 2018. Acesso em: 28/01/2025. Disponível em: <https://professorestrutural.com/_download/Artigo.pdf>. Citado na página 17.

NAZÁRIO, L.; BENTO, F. A importância do uso de softwares de gerenciamento de projetos na formação do aluno de engenharia civil. In: . [S.l.]: CEUR-WS, 2016. v. 1667, p. 312–323. ISSN 16130073. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.

NBR:8800. *NBR 8800:2024 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro: ABNT, 2024. Citado 4 vezes nas páginas 15, 33, 36 e 38.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29

OLIVEIRA, C.; MOURA, S. P.; SOUSA, E. R. d. TIC'S na educação: a utilização das tecnologias da informação e comunicação na aprendizagem do aluno. *Revista Pedagogia em Ação*, Belo Horizonte, v. 7, n. 1, 2015. Citado na página 13.

PASSOS, D. da S.; VENEGA, V. de S.; ROCHA, M. L. Softwares para suporte no ensino de engenharia civil: Um mapeamento sistemático dos seus usos nas instituições brasileiras. *Revista Cereus*, v. 9, p. 2–18, 12 2017. ISSN 21757275. Disponível em: <http://ojs.unirg.edu.br/index.php/1/article/view/1865>. Citado na página 13.

PFEIL, W.; PFEIL, M. *Estruturas de aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. Citado na página 16.

PRESSMAN, R. S. *Engenharia de Software: Uma Abordagem Profissional*. São Paulo: McGraw-Hill Brasil, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.

ROBINSON, A.; BECKER, R. *ReportLab: Open Source PDF Library for Python*. [S.l.], 2025. Versão 3.6.12, acesso em: 11 mar. 2025. Disponível em: <https://www.reportlab.com>. Citado na página 21.

ROSSUM, G. V.; DRAKE, F. L. *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009. ISBN 1441412697. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

SANTOS, N. C. d. *O emprego dos métodos numéricos na análise dos estados limites últimos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2018. Acesso em: 11 mar. 2025. Disponível em: <https://baes.uc.pt/bitstream/10316/84918/1/O%20emprego%20dos%20m%C3%A9todos%20num%C3%A9ricos%20na%20an%C3%A1lise%20dos%20Estados%20Limites%20%C3%9Altimos%20-%20Final.pdf>. Citado na página 16.

SCHIMANSKY, T. *CustomTkinter: A Modern Tkinter Framework*. 2023. Disponível em: <https://github.com/TomSchimansky/CustomTkinter>. Acesso em: 10 mar. 2025. Disponível em: <https://github.com/TomSchimansky/CustomTkinter>. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 29.

SHISHKOV, B. (Ed.). *Trends and Applications in Information Systems and Technologies*. Cham: Springer International Publishing, 2021. ISBN 978-3-030-72654-6. Citado na página 17.

SILVEIRA, R. *Estruturas Metálicas: Apostila de Ensino*. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, 2005. 45-60 p. Citado na página 16.

SIMSEN, A. R.; PITOL, A. F.; KONRAD, O.; SPINELLI, R.; BERTOLDI, R. Programa computacional para verificação de perfil i laminado ou soldado conforme nbr 8800/2008. *Revista de Engenharia Civil IMED*, Complexo de Ensino Superior Meridional S.A., v. 7, p. 1, 2020. ISSN 2358-6508. Citado na página 13.

Van Rossum, G.; DRAKE, F. L. *The Python Language Reference*. [S.l.]: Python Software Foundation, 2022. Citado na página 17.

Versão Final Homologada
25/03/2025 22:29