



2025

ELABORAÇÃO DE PLANILHA AUTOMATIZADA PARA DIMENSIONAMENTO DE PILARES DE AÇO SUBMETIDOS A COMPRESSÃO SIMPLES

Fabiano Christal de Arruda ^a; Christiane Areias Trindade ^b

^a Aluno de Graduação em Engenharia Civil, fabiano_arruda@ufms.br

^b Professor Orientador, Doutora, christiane.trindade@ufms.br

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

RESUMO

A construção civil brasileira tem cada vez mais adotado o sistema de estruturas de aço que exige agilidade e precisão no dimensionamento por parte dos calculistas estruturais. Os pilares, que são parte crucial do conjunto estrutural, sofrem com os fenômenos de instabilidade, cuja verificação é repetitiva, tornando-a suscetível a erros. Tendo em vista o cenário atual, este trabalho teve como objetivo a construção de uma planilha automatizada, na plataforma Microsoft Excel, para a verificação e dimensionamento de pilares de aço submetidos à compressão simples, de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2024). A metodologia que consistiu em três etapas: levantamento bibliográfico do procedimento de cálculo; construção da ferramenta, que foi baseada na organização dos dados e usabilidade; e validação. O software foi implementado com um banco de dados de perfis laminados e uma interface intuitiva, criada para evitar erros de entrada. Para a verificação da ferramenta foram utilizados quatro exemplos de aplicação: três da literatura clássica, que foram recalculados conforme a norma vigente, e um elaborado pelo autor para verificação de perfis esbeltos. Os resultados apresentaram alta concordância, demonstrando a precisão do algoritmo implementado. O software desenvolvido atende às demandas de agilidade e confiabilidade, se mostrando uma ferramenta didática e prática para o uso técnico e acadêmico em projetos de estruturas de aço.

Palavras-chave: Estruturas de Aço. Dimensionamento de Pilares. Compressão Simples. ABNT NBR 8800:2024. Automação em Excel.

ABSTRACT

The Brazilian civil construction industry has increasingly adopted steel structure systems, requiring agility and precision in design from structural engineers. Columns, crucial elements of the structural assembly, are subject to instability phenomena whose verification is repetitive, making it susceptible to errors. Given the current scenario, this work aimed to build an automated spreadsheet on the Microsoft Excel platform for the verification and design of steel columns subjected to simple compression, in accordance with NBR 8800 (ABNT, 2024). The methodology consisted of three stages: a bibliographic survey of calculation procedures; the construction of the tool, based on data organization and usability; and validation. The software was implemented with a database of rolled profiles and an intuitive interface designed to prevent input errors. For the tool verification, four application examples were used: three from classical literature, recalculated according to the current standard, and one developed by the author for the verification of slender profiles. The results showed high concordance, demonstrating the precision of the implemented algorithm. The developed software meets the demands for agility and reliability, proving to be a didactic and practical tool for technical and academic use in steel structure projects.

Keywords: Steel Structures. Column Design. Simple Compression. ABNT NBR 8800:2024. Excel Automation.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente no Brasil, pode-se notar um significativo aumento do uso das estruturas de aço, dada sua alta resistência mecânica, agilidade na construção e precisão dimensional. Os pilares são elementos cruciais na estabilidade e segurança do sistema estrutural.

O correto dimensionamento desses elementos é, no entanto, uma tarefa complexa. Pfeil (2021), um dos autores clássicos da área, estabelece que a capacidade portante de um pilar de aço, raramente é definida pelo simples escoamento do material. Sendo na grande maioria dos casos, a instabilidade (flambagem), o fator predominante, que pode se manifestar tanto localmente (nas placas que compõem a seção) quanto globalmente (na barra como um todo).

A norma técnica brasileira NBR 8800 (ABNT, 2024), estabelece a metodologia de cálculo e os critérios de segurança para a verificação dos fenômenos. Em sua versão mais recente, a norma direciona o cálculo da Área Efetiva (A_{ef}) para considerar a redução de área devida à flambagem local e a determinação do fator de redução (χ) atrelado à flambagem global.

Essa metodologia fornecida pela norma, apesar de precisa e de acordo com as práticas internacionais, se mostra densa. Uma vez que sua aplicação manual é um processo trabalhoso e suscetível a erros, principalmente na iteratividade excessiva, quando se busca a otimização da estrutura. Ainda que existam softwares renomados, que realizam as análises, eles geralmente trabalham de forma opaca, escondendo os resultados intermediários, dificultando assim a compreensão dos fenômenos, e trazem consigo um alto custo financeiro, podem ser uma barreira para acadêmicos e pequenos escritórios.

Diante deste cenário, o presente trabalho visa a construção de uma planilha automatizada na plataforma Microsoft Excel. A aplicação visa três pilares: precisão, ao implementar a metodologia de cálculo da NBR 8800 (ABNT, 2024); agilidade, ao automatizar a sequência de cálculo; didática, ao fornecer uma interface clara e memorial de cálculo transparente.

Dessa forma, pretende-se fornecer uma ferramenta de apoio técnico e acadêmico, otimizando o tempo de dimensionamento de pilares submetidos a compressão simples, assim como facilita a compreensão da aplicação da norma técnica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Instabilidade em pilares de aço

Quando se trata do dimensionamento de elementos de aço a compressão simples, a falha pode ocorrer devido a dois fenômenos, escoamento do material ou instabilidade global (flambagem).

Pilares “curtos” e robustos tendem a falhar por escoamento, atingindo a tensão máxima de resistência do aço (f_y). Já pilares “esbeltos” (longos e finos), sofrem falhas estruturais por flambagem, sendo esse o fator predominante no dimensionamento do elemento.

Conforme ressalta Pfeil (2021), a flambagem ocorre quando o elemento comprimido sofre uma curvatura lateral, devido a perda da sua estabilidade, ocasionando uma falha com uma carga muito inferior à que causaria o escoamento.

A NBR 8800 (ABNT, 2024), assim como Pfeil (2021), classificam a flambagem em dois casos distintos que devem ser analisados de formas diferentes:

- a. Flambagem Global: é a instabilidade da barra como um todo. Se analisado como um elemento linear, o pilar, curva-se sobre o eixo com menor raio de giração (de menor rigidez). A resistência a este evento é atrelada diretamente ao comprimento da barra, bem como à sua vinculação nos apoios e a geometria da sua seção transversal.
- b. Flambagem Local: é a instabilidade das placas do pilar, como as mesas e a alma. Por se tratar de elementos finos, elas podem “amassar” ou “enrugar” antes que ocorra a flambagem global ou que o limite de escoamento seja atingido, comprometendo a capacidade portante da peça.

A correta análise desses dois fenômenos é a base para o adequado dimensionamento de qualquer pilar de aço, sendo a metodologia de cálculo apresentada a seguir.

2.2. A Metodologia de Cálculo da ABNT NBR 8800: 2024

Apesar dos conceitos de flambagem serem clássicos, assim como os apresentados por Pfeil (2021), a metodologia prática é regida por normas técnicas, que são frequentemente atualizadas e revisadas.

Embora a obra de Pfeil (2021), se baseie na NBR 8800 (ABNT, 2008), que foi vigente por mais de uma década, a engenharia de estruturas de aço sofreu uma atualização recente, gerando assim a nova NBR 8800 (ABNT, 2024).

Esta nova versão, que substitui sua antecessora, moderniza os conceitos de dimensionamento, introduzindo mudanças significativas às práticas brasileiras. Com isso a verificação da flambagem local foi alterada de forma notável, com o cálculo da “Área Efetiva (A_{ef})” substituindo o método do “Fator Q”.

Uma vez que o objetivo do presente trabalho é elaborar um software de acordo com as normas vigentes, será adotado como base de cálculo mestra a NBR 8800 (ABNT, 2024), para referência de todas as fórmulas, sequências, critérios de segurança e dimensionamento implementados na planilha. Sendo os conceitos de Pfeil (2021) utilizados como embasamento teórico do fenômeno, enquanto a NBR 8800 (ABNT, 2024) será a fonte exclusiva da metodologia de cálculo aplicada.

2.3. Sequência de Cálculo para Compressão

Simple (ABNT NBR 8800:2024)

Segundo a NBR 8800 (ABNT, 2024), a verificação de segurança de um pilar de aço submetido à compressão simples consiste em garantir que a força axial resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) seja maior ou igual a força axial solicitante de cálculo ($N_{c,Sd}$).

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

Como ($N_{c,Sd}$) é obtido a partir das combinações de ações (cargas) da NBR 8681 (ABNT, 2025). O dimensionamento tem como desafio a determinação da força resistente ($N_{c,Rd}$), cujo a expressão de cálculo é definida pela NBR 8800 (ABNT, 2024).

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2)$$

Sendo:

χ (**Qui**) é o Fator de Redução associado à instabilidade global.

A_{ef} é a Área Efetiva da seção transversal, que considera a redução devida à flambagem local das placas da seção.

f_y é a resistência ao escoamento do aço.

γ_{a1} : é o coeficiente de ponderação da resistência (adotado como 1,10).

2.3.1. Verificação da Flambagem Global

(Cálculo do Fator χ)

O fator χ reduz a resistência portante da barra, quantificando o fenômeno da flambagem global. Sua sequência lógica de cálculo, descrita na NBR 8800 (ABNT, 2024), é demonstrada a seguir:

1. Cálculo da Carga Crítica Elástica (N_e)

Primeiramente a Carga Crítica Elástica (N_e) é calculada. Determinando o quão esbelta a barra é em relação a seus eixos:

N_{ex} : Carga crítica para flambagem por flexão em torno do eixo x.

N_{ey} : Carga crítica para flambagem por flexão em torno do eixo y.

N_{ez} : Carga crítica para flambagem por torção ou flexo-torção.

$$N_e = \min(N_{ex}, N_{ey}, N_{ez}) \quad (3)$$

As cargas críticas sendo calculadas por:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} \quad (4)$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} \quad (5)$$

$$N_{ez} = \left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + GJ \right) \cdot \frac{1}{r_0^2} \quad (6)$$

Sendo:

E : Módulo de elasticidade do aço (200.000 MPa).

G : Módulo de elasticidade transversal do aço (77.000 MPa).

I_x, I_y : Momentos de inércia da seção.

J : Constante de torção da seção.

C_w : Constante de empenamento da seção.

K_x, K_y, K_z : Coeficientes de flambagem para cada eixo.

L_x, L_y, L_z : Comprimentos destravados para cada eixo.

r_0 : Raio de giração polar, que pode ser descrito pela expressão:

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2} \quad (7)$$

r_x e r_y : São os raios de giração em relação aos eixos centrais.

2. Cálculo do Índice de Esbeltez Reduzido (λ_0)

Este é um parâmetro adimensional crucial que relaciona a resistência plástica da seção com sua carga crítica elástica. Ele utiliza a Área Bruta (A_g):

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g \cdot f_y}{N_e}} \quad (8)$$

3. Cálculo do Fator de Redução (χ)

Finalmente, com o valor de λ_0 em mãos, o fator de redução da instabilidade global (χ) é determinado pelas seguintes equações:

$$\text{para } \lambda_0 \leq 1.5, \quad \chi = 0.658^{(\lambda_0)^2} \quad (9)$$

$$\text{para } \lambda_0 > 1.5, \quad \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (10)$$

Este valor de χ , será sempre menor ou igual a 1,0.

2.3.2. Verificação da Flambagem Local (Cálculo da Área Efetiva A_{ef})

A flambagem local, fenômeno de instabilidade das placas que compõem a seção transversal, é tratada na NBR 8800 (ABNT, 2024) através do cálculo da Área Efetiva (A_{ef}), que descreve a área que continua eficaz após a flambagem.

Conforme a norma indica, para o cálculo de A_{ef} , segue 2 passos:

1. Classificação dos Elementos da Seção

Com base na esbeltez (largura/espessura) de cada elemento, vamos classificá-los. A NBR 8800 (ABNT, 2024), fornece na Tabela 4 as classificações conforme o limite de esbeltez:

λ_p : Limite de plastificação.

Se a esbeltez do elemento (b/t) for menor ou igual a λ_p o elemento é considerado **Compacto**. Já se a sua esbeltez (b/t) for maior que λ_p o elemento é considerado **Esbelto**.

Para os perfis laminados de abas paralelas (como perfis W, I ou H) submetidos à compressão uniforme, os casos relevantes da Tabela 4 da norma estão resumidos na **Tabela 1** abaixo.

Tabela 1 - Limites de Esbeltez para Elementos Comprimidos.

Tipo de Elemento	Descrição	Relação b/t	Limite de Plastificação (λ_p)
AL (Apoiado-Livre)	Mesas de perfis I, W ou H	$\frac{b_f}{2t_f}$	$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
AA (Apoiado-Apoiado)	Almas de perfis I, W ou H	$\frac{h}{t_w}$	$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8800:2024.

Sendo:

E é o módulo de elasticidade do aço (200.000 Mpa)

f_y é a resistência ao escoamento do aço.

2. Cálculo da Área Efetiva (A_{ef})

Este cálculo depende da classificação anterior:

Se todos os elementos da seção forem Compactos, a Área Efetiva é igual a Área Bruta, uma vez que a flambagem não vai ocorrer:

$$A_{ef} = A_g \quad (11)$$

Se algum elemento for Esbelto, a capacidade do elemento vai ser reduzida. Assim neste caso como a flambagem local está intimamente ligada com a flambagem global, ocasiona uma tensão de compressão real menor que f_y . Portanto a norma exige cálculo das larguras efetivas (b_{ef}), conforme as expressões a seguir:

$$\text{para } \frac{b}{t} \leq \frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}}, \quad b_{ef} = b \quad (12)$$

$$\text{para } \frac{b}{t} > \frac{(b/t)_{lim}}{\sqrt{\chi}}, \quad b_{ef} = b \left(1 - c_1 \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}} \quad (13)$$

Onde:

b : é a largura do elemento

b_{ef} : é a largura efetiva do elemento;

σ_{el} : é a tensão de flambagem local, que pode ser calculada pela equação a seguir ou por análise de estabilidade:

$$\sigma_{el} = \left(c_2 \frac{(b/t)_{lim}}{b/t} \right)^2 f_y \quad (14)$$

c_1 e c_2 : são fatores dados na Tabela 2 retirada da norma.

Tabela 2 – Fatores c_1 e c_2 para cálculo de flambagem local.

Elemento	c_1	c_2
AA (exceto paredes de seções tubulares retangulares)	0,18	1,31
AL	0,22	1,49

Fonte: ABNT NBR 8800:2024.

A **Área Efetiva (A_{ef})** final é a soma das áreas dos elementos compactos com as áreas efetivas dos elementos esbeltos.

3. METODOLOGIA

O processo de criação do software foi dividido em três etapas metodológicas principais, seguindo a ordem cronológica do desenvolvimento:

1. A **busca bibliográfica** para o levantamento dos procedimentos de cálculo da NBR 8800 (ABNT, 2024);
2. A **implementação do algoritmo** em planilha, com base no procedimento de cálculo normativo e **desenvolvimento da interface** do usuário;

3. A **validação** do software, comparando seus resultados com exemplos da bibliografia.

As seções a seguir detalham cada uma dessas etapas.

3.1. Busca Bibliográfica

O primeiro passo foi realizar a busca da sequência de cálculo, baseada na norma ABNT NBR 8800:2024, a fim de elucidar em que o algoritmo devia se basear.

Com a mudança da ABNT NBR 8800 em 2024, o processo de cálculo deixou de ser iterativo e se tornou direto, com a substituição do fator Q pelo cálculo da área efetiva. Assim o fluxograma de verificações idealizado para a criação do software foi o seguinte:

3.1.1. Cálculo da Carga Crítica Elástica (N_e):

Análise dos três modos de instabilidade (flexão em X e Y, e flexo-torção em Z), e determinação do valor governante, sendo ele o menor deles.

3.1.2. Cálculo do Fator de Flambagem Global (χ)

Após N_e definido, é calculado o índice de esbelteza reduzido (λ_0) utilizando a Área Bruta (A_g), conforme demonstrado no item 2.3.1. dá fundamentação teórica, em seguida é calculado o fator (χ).

3.1.3. Cálculo da Área Efetiva (A_{ef}):

Com o fator global (χ) já conhecido, o próximo passo é verificar a flambagem local, classificando os elementos da seção (mesa e alma) como **Compacto** ($b/t \leq \lambda_p$) ou **Esbelto** ($b/t > \lambda_p$), com base na Tabela 1. Dependendo da classificação seguimos conforme demonstrado no item 2.3.2.

3.1.4. Verificação Final da Resistência:

Por fim, a força resistente de cálculo ($N_{c,Rd}$) é determinada combinando os resultados das etapas anteriores, este esforço vai ser comparado com o esforço solicitante ($N_{c,Sd}$) através da taxa de uso. Se esta taxa for menor ou igual a 1, o software define o status como APROVADO.

$$T.U. = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (15)$$

Adicionalmente, o software oferece uma recomendação econômica para o usuário. Foi adotado uma faixa da taxa de utilização entre 85% e 100% como um estado de economia. Caso o uso fique abaixo dos 85%, o software entende o dimensionamento como antieconômico e sugere que o usuário adote um perfil mais leve.

3.2. Implementação do Algoritmo

A implementação do software consiste em transformar o roteiro de cálculo descrito no item 3.1. em uma planilha automatizada no Excel. A construção da ferramenta foi baseada na organização dos dados e usabilidade. Assim o desenvolvimento foi estruturado em 3 partes:

1. **Banco de Dados:** A constituição de uma base de dados utilizando as propriedades geométricas e mecânicas dos perfis comerciais (W, H e I), permitindo a consulta automática pelo sistema;
2. **Motor de Cálculo (Backend):** A construção das equações da ABNT NBR 8800:2024 em planilhas, para o cálculo das verificações com base na entrada de dados;
3. **Interface do Usuário (Frontend):** Configuração das telas de interação do usuário e design, utilizando de validação de dados e formatação condicional para prevenção de erros.

3.3. Validação do Software

Para a validação do software, foram escolhidos 3 exemplos da literatura. Adicionalmente um exemplo criado pelo autor, a fim de testar o cálculo da área efetiva (A_{ef}).

É fundamental ressaltar que as fontes utilizadas, como Pfeil (2021) e Pinheiro, baseiam seus cálculos e exemplos na norma NBR 8800 (ABNT, 2024). Portanto, para validar a ferramenta que se baseia na NBR 8800 (ABNT, 2024), os dados de entrada (perfis, comprimentos, vínculos) dos exemplos foram aproveitados, mas a **verificação manual foi refeita passo a passo**, aplicando-se rigorosamente os critérios da norma atual (2024).

3.3.1. Exemplo 1

O primeiro exemplo é adaptado de Pfeil (2021), onde é determinada a resistência de cálculo de uma barra de aço com perfil **W 150 x 37,1** kg/m, com aço **ASTM A36**, e comprimento de 3m, O exemplo analisa dois cenários: o primeiro com contenção lateral no eixo Y, impedindo a flambagem, e o segundo com a contenção retirada, permitindo a comparação das resistências.

3.3.2. Exemplo 2

O segundo exemplo é adaptado de Pinheiro (2005), onde é determinada a resistência a compressão de um perfil **I 152x18,5** kg/m, com aço **MR250**.

3.3.3. Exemplo 3

O terceiro exemplo é adaptado de Pfeil (2021), onde é feita uma comparação entre a resistência de projeto à compressão para o perfil **W 310 × 21,0 kg/m**, com um comprimento de flambagem de 3,00 m, analisando o uso de dois tipos de aço (**AR350** e **MR250**).

3.3.4. Exemplo 4

O quarto exemplo foi proposto pelo autor, onde é determinada a resistência a compressão de um perfil **W 610 x 82,0 kg/m**, com aço **MR250**, com um comprimento de flambagem de 1,00 m.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Implementação da planilha

Com a sequência de cálculo definida, foi iniciada a implementação do algoritmo na plataforma Excel. Foi criado um pequeno banco de dados de perfis laminados (W, H, I), sendo que os perfis H e I, foram retirados do Pfeil (2021) e os perfis W de catálogos de fabricantes. Assim o usuário poderá fazer uma verificação facilitada na busca de otimização.

Com a base de dados inserida, implementada a estrutura de *backend*: uma planilha oculta onde todo o procedimento de cálculo, com as expressões da norma ocorre. Em seguida, foi criada a interface de *frontend*, as planilhas nas quais o usuário interage diretamente, sendo elas a “ENTRADA DE DADOS”, “RESULTADOS” e “RELATORIO DE IMPRESSÃO”.

4.1.1. ENTRADA DE DADOS

A planilha de entrada de dados, é o núcleo da interação do usuário com o software. Nela são depositados os dados do projeto, bem como inseridos os dados da carga, material, perfil e vinculação do pilar.

Os dados de material e perfil podem tanto ser escolhidos pelo usuário, através do banco de dados, quanto ser inseridos diretamente. As **Figuras 1 e 2** mostram as caixas de seleção que permitem ao usuário a escolha do uso do banco de dados.

A escolha do tipo de material e perfil é feita através de listas suspensas, conforme representado na **Figura 3**. Os tipos de vinculação também estão disponíveis para escolha em lista suspensa para cada um dos eixos (X, Y e Z), exposto na **Figura 4**.

Figura 1 – Caixa de seleção que define o uso de dados para o material.

Utilizar banco de dados para o material.

Fonte: Autor

Figura 2 – Caixa de seleção que define o uso de dados para o perfil.

Utilizar banco de dados para o tipo de perfil

Fonte: Autor

Figura 3 – Lista suspensa para escolha do material.

MATERIAL

Tipo de Aço

Resistência ao Escoamento [f_y]

Resistência à Ruptura [f_u]

Módulo de Elasticidade [E]

Módulo de Elasticidade Transversal do Aço [G]

ASTM A572 G50

ASTM A36 (MR250)

ASTM A242 GR1

ASTM A242 GR2

ASTM A572 G50

AR350

AR350 COR

AR 415

Fonte: Autor

Figura 4 – Lista suspensa para casos de vinculação.

FLAMBAGEM

FLAMBAGEM EM TORNO DO EIXO X-X (Eixo Forte)

Comprimento Destravado [L_x]

800 cm

Condição de Vinculo

Caso (a): Rotulada nas Duas Extremidades (Barticulada)

Caso (a): Rotulada nas Duas Extremidades (Barticulada)

Caso (b): Engastada e Rotulada

Caso (c): Engastada e Livre

Caso (d): Rotulada e Guiada

Caso (e): Engastada nas Duas Extremidades (Biemgastada)

Caso (f): Engastada e Guiada

Caso (c): Engastada e Livre

2,1

1680 cm

FLAMBAGEM EM TORNO DO EIXO Y-Y (Eixo Fraco)

Comprimento Destravado [L_y]

800 cm

Condição de Vinculo

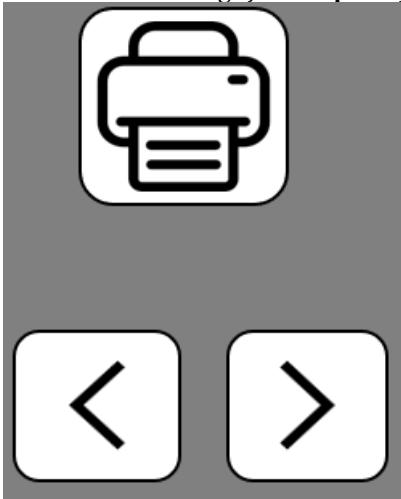
Caso (a): Empenamento Livre

Fonte: Autor

4.1.2. RESULTADOS E RELATÓRIO

A planilha de resultados expõe os resultados finais e resultados intermediários, permitindo que o usuário acompanhe as etapas de cálculos. Já a planilha de relatório exibe um memorial de cálculo automatizado, que pode ser exportado através do botão de impressão exposto na **Figura 5**. Este botão gera um arquivo em formato PDF na mesma pasta em que a planilha está salva. Os botões com símbolos de setas servem para navegação na pasta de trabalho.

Figura 5 – Botões de navegação e exportação.



Fonte: Autor

4.2. Validação

Para a validação da ferramenta, foram selecionados três exemplos. Os exemplos foram paralelamente calculados à mão, seguindo as diretrizes da NBR 8800 (ABNT, 2024), e processados na planilha. As seções a seguir, apresentam os dados e entrada e saída, bem como um comparativo entre os resultados obtidos à mão e utilizando o software.

4.2.1. Exemplo 1 (Pfeil, 2021)

O primeiro exemplo analisa o perfil **W 150x37,1** em aço **ASTM A36 (MR250)** ($f_y = 250\text{ MPa}$), com 3,0 m de comprimento, e vínculos biarticulados ($K = 1,0$). A análise é feita em dois cenários:

Cenário A: Com contenção lateral no eixo Y.

Cenário B: Sem contenção lateral (o pilar pode flambar em qualquer eixo).

A **Figura 6** apresenta a tela de "ENTRADA DE DADOS", com a inserção de dados do material, através da lista suspensa, para o cenário A. A **Figura 7** apresenta a inserção dos dados do perfil e a **Figura 8** os dados de comprimento de flambagem, note que como o eixo Y não vai sofrer flambagem devido a contenção o comprimento L_y informado é igual 0. Nas **Figuras 9, 10 e 11** podemos ver a tela de "RESULTADOS" gerada pela ferramenta.

Figura 6 – Tela de Entrada de Dados do Material (Exemplo 1 - Cenário A)

MATERIAL	
Tipo de Aço	A36 (MR250)
Resistência ao Escoamento [f_y]	250 MPa
Resistência à Ruptura [f_u]	400 MPa
Módulo de Elasticidade [E]	200000 MPa
Módulo de Elasticidade Transversal do Aço [G]	77000 MPa

Fonte: Autor

Figura 7 – Tela de Entrada de Dados do Perfil (Exemplo 1 - Cenário A)

PERFIL	
Tipo de Perfil	PERFIL W
Bitola do Perfil	W 150 x 37,1 (H)

PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS	
Área Bruta [A_g]	47,80 cm ²
Momento de Inércia (Eixo X) [I_x]	2244 cm ⁴
Momento de Inércia (Eixo Y) [I_y]	707 cm ⁴
Raio de Giração (Eixo X) [r_x]	6,85 cm
Raio de Giração (Eixo Y) [r_y]	3,84 cm
Altura Total [h_t]	162,0 mm
Altura Livre da Alma [h_w]	119,0 mm
Largura da Mesa [b_f]	154,0 mm
Espessura da Alma [t_w]	8,1 mm
Espessura da Mesa [t_f]	11,6 mm
Constante de Torção [J]	20,58 cm ⁴
Constante de Empenamento [C_w]	39930,00 cm ⁶

Fonte: Autor

Figura 8 – Tela de Entrada de Dados do Comprimento de Flambagem (Exemplo 1 - Cenário A)

FLAMBAGEM	
FLAMBAGEM EM TORNO DO EIXO X-X (Eixo Forte)	
Comprimento Destravado [L_x]	300 cm
Condição de Vínculo	Caso (a): Rotulada nas Duas Extremidades (Barticulada)
Coefficiente de Flambagem [K_x]	1
Comprimento de Flambagem [$K_x L_x$]	300 cm
FLAMBAGEM EM TORNO DO EIXO Y-Y (Eixo Fraco)	
Comprimento Destravado [L_y]	0 cm
Condição de Vínculo	Caso (a): Rotulada nas Duas Extremidades (Barticulada)
Coefficiente de Flambagem [K_y]	1
Comprimento de Flambagem [$K_y L_y$]	0 cm
FLAMBAGEM EM TORNO DO EIXO Z-Z	
Comprimento Destravado [L_z]	300 cm
Condição de Vínculo	Caso (a): Empenamento Livre
Coefficiente de Flambagem [K_z]	1
Comprimento de Flambagem [$K_z L_z$]	300 cm

Fonte: Autor

Figura 9 – Tela de Resultados de Flambagem Global do Software (Exemplo 1 - Cenário A)

VERIFICAÇÃO DE FLAMBAGEM GLOBAL (FATOR χ)	
Carga Crítica (Flexão X) [N_{ax}]	4922 kN
Carga Crítica (Flexão Y) [N_{ay}]	
Carga Crítica (Torção Z) [N_{az}]	3990 kN
Carga Crítica Governante [N_g]	3989,78 kN
Índice de Esbeltez Reduzido [λ_0]	0,547
Fator de Redução por Flambagem Global [χ]	0,882

Fonte: Autor

Figura 10 – Tela de Resultados de Flambagem Local do Software (Exemplo 1 - Cenário A)

VERIFICAÇÃO DE FLAMBAGEM LOCAL (ÁREA EFETIVA A_{ef})	
Esbeltez da Mesa $[b_f/2t_f]$	6,64
Limite de esbeltez da Mesa $[\lambda_p]$	15,84
Status da Mesa	COMPACTO
Esbeltez da Alma $[h_w/t_w]$	14,7
Limite de esbeltez da Alma $[\lambda_p]$	42,1
Status da Alma	COMPACTO
Status da Seção	Todos os elementos são Compactos.
Largura da Mesa Efetiva $[b_{f,ef}]$	154,0 mm
Altura da Alma Efetiva $[h_{w,ef}]$	119,0 mm
Área Efetiva $[A_{ef}]$	47,8 cm ²

Fonte: Autor

Figura 11 – Tela de Resultados Finais do Software (Exemplo 1 - Cenário A)

CÁLCULO DA RESISTÊNCIA FINAL	
Fator de Redução por Flambagem Global $[\chi]$	0,882
Área Efetiva $[A_{ef}]$	47,8 cm ²
Resistência ao Escoamento $[f_y]$	25 kN/cm ²
Coefficiente de Ponderação $[\gamma_{a1}]$	1,1
Força Resistente de Cálculo $[N_{d,Rd}]$	958,37 kN

Fonte: Autor

Tabela 3 – Comparação de Resultados: Exemplo 1 (Perfil W 150x37,1)

Parâmetro	Verificação Manual (NBR 2024)	Resultado do Software	%Erro
Cenário A (Eixo Y - Contido)			
N_e (Gov)	3989,78kN (Eixo Z)	3989,78kN (Eixo Z)	0,000%
Fator Global (χ)	0,882	0,882	0,020%
Área Efetiva (A_{ef})	47,80 cm ²	47,80 cm ²	0,000%
Resistência ($N_{c,Rd}$)	958,17 kN	958,37 kN	0,020%
Cenário B (Eixo Y - Livre)			
N_e (Gov)	1550,62 kN (Eixo Y)	1550,62 kN (Eixo Y)	0,000%
Fator Global (χ)	0,724	0,724	0,041%
Área Efetiva (A_{ef})	47,80 cm ²	47,80 cm ²	0,000%
Resistência ($N_{c,Rd}$)	786,53 kN	786,85 kN	0,040%

Fonte: Autor

O software forneceu resultados de acordo com os recalculados manualmente, demonstrados no apêndice A, utilizando a NBR 8800 (ABNT, 2024), como pode ser observado na Tabela 3, apresentando somente uma pequena diferença numérica, que pode ser atribuída as aproximações feitas, já que a planilha trabalha sem fazer aproximações.

É importante notar que devida a contenção no eixo Y do cenário A, o modo de falha sofreu uma mudança,

e o Eixo Z governou o dimensionamento, enquanto sem a contenção, o Eixo Y assume a falha crítica. Essa mudança de situação, reafirma o correto funcionamento do software, quanto ao do cálculo da Carga Crítica Elástica (N_e) segundo a NBR 8800 (ABNT, 2024).

4.2.2. Exemplo 2 (PINHEIRO, 2005)

O segundo exemplo verifica um pilar feito com o perfil I 152 x 18,5, submetido a uma força de compressão de 80 kN, em aço ASTM A36 ($f_y = 250 MPa$), com 3,0 m de comprimento e vínculos biarticulados ($K = 1,0$).

A Figura 12 apresenta a tela de "ENTRADA DE DADOS", com a inserção de dados das ações as quais o pilar está submetido. A Figura 13 os dados do Perfil, através da lista suspensa. A Figura 14 os dados de comprimento de flambagem. Nas Figuras 15, 16, 17 e 18 podemos ver a tela de “RESULTADOS” gerada pela ferramenta.

Figura 12 – Tela de Entrada de Dados das Ações (Exemplo 2)

AÇÕES	
Força Axial de Compressão (Permanente) $[N_{ok}]$	80 kN
Força Axial de Compressão (Variável) $[N_{qk}]$	0 kN
Coef. de Ponderação $[\gamma_d]$	1
Coef. de Ponderação $[\gamma_q]$	1,5
Força Solicitante de Cálculo $[N_{d,Ed}]$	80 kN

Fonte: Autor

Figura 13 – Tela de Entrada de Dados do Perfil (Exemplo 2)

PERFIL	
Tipo de Perfil	PERFIL I
Bitola do Perfil	I 152 X 18,5
PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS	
Área Bruta $[A_g]$	23,60 cm ²
Momento de Inércia (Eixo X) $[I_x]$	919 cm ⁴
Momento de Inércia (Eixo Y) $[I_y]$	76 cm ⁴
Raio de Giração (Eixo X) $[r_x]$	6,24 cm
Raio de Giração (Eixo Y) $[r_y]$	1,79 cm
Altura Total $[h_t]$	152,4 mm
Altura Livre da Alma $[h_w]$	134,2 mm
Largura da Mesa $[b_f]$	84,6 mm
Espessura da Alma $[t_w]$	5,8 mm
Espessura da Mesa $[t_f]$	9,1 mm
Constante de Torção $[J]$	5,14 cm ⁴
Constante de Empenamento $[C_w]$	3886,23 cm ⁶

Fonte: Autor

Figura 14 – Tela de Entrada de Dados do Comprimento de Flambagem (Exemplo 2)

FLAMBAGEM

FLAMBAGEM EM TORNO DO EIXO X-X (Eixo Forte)

Comprimento Destravado [L_x]

300 cm

Condição de Vínculo

Caso (a): Rotulada nas Duas Extremidades (Biarticulada)

Coefficiente de Flambagem [K_x]

1

Comprimento de Flambagem [K_xL_x]

300 cm

FLAMBAGEM EM TORNO DO EIXO Y-Y (Eixo Fraco)

Comprimento Destravado [L_y]

300 cm

Condição de Vínculo

Caso (a): Rotulada nas Duas Extremidades (Biarticulada)

Coefficiente de Flambagem [K_y]

1

Comprimento de Flambagem [K_yL_y]

300 cm

FLAMBAGEM EM TORNO DO EIXO Z-Z

Comprimento Destravado [L_z]

300 cm

Condição de Vínculo

Caso (a): Empenamento Livre

Coefficiente de Flambagem [K_z]

1

Comprimento de Flambagem [K_zL_z]

300 cm

Fonte: Autor

Figura 15 – Tela de Resultados de Flambagem Global do Software (Exemplo 2)

VERIFICAÇÃO DE FLAMBAGEM GLOBAL (FATOR χ)

Carga Crítica (Flexão X) [N_{ax}]

2016 kN

Carga Crítica (Flexão Y) [N_{ay}]

166,03 kN

Carga Crítica (Torção Z) [N_{az}]

1142 kN

Carga Crítica Governante [N_a]

166,03 kN

Índice de Esbeltez Reduzido [λ_0]

1,885

Fator de Redução por Flambagem Global [χ]

0,247

Fonte: Autor

Figura 16 – Tela de Resultados de Flambagem Local do Software (Exemplo 2)

VERIFICAÇÃO DE FLAMBAGEM LOCAL (ÁREA EFETIVA A_{ef})

Esbeltez da Mesa [b_f/2t_f]

4,65

Limite de esbeltez da Mesa [λ_p]

15,84

Status da Mesa

COMPACTO

Esbeltez da Alma [h_w/t_w]

23,0

Limite de esbeltez da Alma [λ_p]

42,1

Status da Alma

COMPACTO

Status da Seção

Todos os elementos são Compactos.

Largura da Mesa Efetiva [b_{tef}]

84,6 mm

Altura da Alma Efetiva [h_{wef}]

134,2 mm

Área Efetiva [A_{ef}]

23,6 cm²

Fonte: Autor

Figura 17 – Tela de Resultados Finais do Software (Exemplo 2)

CÁLCULO DA RESISTÊNCIA FINAL

Fator de Redução por Flambagem Global [χ]

0,247

Área Efetiva [A_{ef}]

23,60 cm²

Resistência ao Escoamento [f_y]

25 kN/cm²

Coefficiente de Ponderação [γ_{a1}]

1,1

Força Resistente de Cálculo [N_{d,Rd}]

132,37 kN

OBSERVAÇÕES

Perfil superdimensionado. Considere um perfil mais leve.

Fonte: Autor

Figura 18 – Tela de Resumo de Resultados do Software (Exemplo 2)

RESUMO

Força Solicitante de Cálculo [N_{d,Sd}]

80,00 kN

Força Resistente de Cálculo [N_{d,Rd}]

132,37 kN

Taxa de Utilização

60,44%

Status

APROVADO

Fonte: Autor

Tabela 4 – Comparação de Resultados: Exemplo 2 (Perfil I 152x18,5)

Parâmetro	Verificação Manual (NBR 2024)	Resultado do Software	%Erro
N _e (Gov)	166,03 kN (Eixo Y)	166,03 kN (Eixo Y)	-0,001%
Fator Global (χ)	0,247	0,247	-0,001%
Área Efetiva (A _{ef})	23,6 cm ²	23,6 cm ²	0,000%
Resistência (N _{c,Rd})	132,48 kN	132,37 kN	0,000%
Solicitação (N _{c,Rd})	80,00 kN	80,00 kN	N/A
Taxa de Utilização	60,39%	60,44%	-0,006%

Fonte: Autor

O software novamente forneceu resultados de acordo com os recalculados manualmente, demonstrados no apêndice A, utilizando a NBR 8800 (ABNT, 2024), como pode ser observado na Tabela 4.

Vale ressaltar que a planilha aprovou a verificação, mas no campo de observações, exposto na Figura 17, sugeriu um perfil mais leve. Isso ocorre porque o software implementa um critério de eficiência econômica, definindo que taxas de utilização abaixo de 85% indicam um perfil superdimensionado. Demonstrando o auxílio fornecido pelo software na otimização do dimensionamento.

4.2.3. Exemplo 3 (Pfeil 2021)

O terceiro exemplo compara o impacto do material em relação a um pilar esbelto. O pilar usa um perfil W310 x 21, com 3,0 m de comprimento e vínculos biarticulados (K = 1,0). A verificação é feita em dois cenários:

Cenário A: Com aço MR 250 (f_y = 250 MPa).

Cenário B: Com aço AR 350 (f_y = 350 MPa).

A Figura 19 apresenta a tela de "ENTRADA DE DADOS", com a inserção de dados do material manualmente, para o cenário B. A Figura 20 apresenta a inserção dos dados do perfil. Nas Figuras 21, 22 e 23 podemos ver a tela de "RESULTADOS" gerada pela ferramenta.

Figura 19 – Tela de Entrada de Dados do Material (Exemplo 3)

MATERIAL	
Tipo de Aço	AR350
Resistência ao Escoamento [f_y]	350 MPa
Resistência à Ruptura [f_u]	450 MPa
Módulo de Elasticidade [E]	200000 MPa
Módulo de Elasticidade Transversal do Aço [G]	77000 MPa

Fonte: Autor

Figura 20 – Tela de Entrada de Dados do Perfil (Exemplo 3)

PERFIL	
Tipo de Perfil	PERFIL W
Bitola do Perfil	W 310 x 21,0

PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS	
Área Bruta [A_g]	27,20 cm ²
Momento de Inércia (Eixo X) [I_x]	3776 cm ⁴
Momento de Inércia (Eixo Y) [I_y]	98 cm ⁴
Raio de Giração (Eixo X) [r_x]	11,77 cm
Raio de Giração (Eixo Y) [r_y]	1,90 cm
Altura Total [h_t]	303,0 mm
Altura Livre da Alma [h_w]	272,0 mm
Largura da Mesa [b_f]	101,0 mm
Espessura da Alma [t_w]	5,1 mm
Espessura da Mesa [t_f]	5,7 mm
Constante de Torção [J]	3,27 cm ⁴
Constante de Empenamento [C_w]	21628,00 cm ⁶

Fonte: Autor

Figura 21 – Tela de Resultados de Flambagem Global do Software (Exemplo 3)

VERIFICAÇÃO DE FLAMBAGEM GLOBAL (FATOR χ)	
Carga Crítica (Flexão X) [N_{cx}]	8282 kN
Carga Crítica (Flexão Y) [N_{cy}]	214,94 kN
Carga Crítica (Torção Z) [N_{cz}]	511 kN
Carga Crítica Governante [N_c]	214,94 kN
Índice de Esbeltez Reduzido [λ_0]	2,105
Fator de Redução por Flambagem Global [χ]	0,198

Fonte: Autor

Figura 22 – Tela de Resultados de Flambagem Local do Software (Exemplo 3)

VERIFICAÇÃO DE FLAMBAGEM LOCAL (ÁREA EFETIVA A_{ef})	
Esbeltez da Mesa [$b_f/2t_f$]	8,86
Limite de esbeltez da Mesa [λ_p]	13,39
Status da Mesa	COMPACTO
Esbeltez da Alma [h_w/t_w]	53,3
Limite de esbeltez da Alma [λ_p]	35,6
Status da Alma	ESBELTO
Status da Seção	Todos os elementos são Compactos.
Largura da Mesa Efetiva [$b_{f,ef}$]	101,0 mm
Altura da Alma Efetiva [$h_{w,ef}$]	272,0 mm
Área Efetiva [A_{ef}]	27,20 cm ²

Fonte: Autor

Figura 23 – Tela de Resultados Finais do Software (Exemplo 3)

CÁLCULO DA RESISTÊNCIA FINAL	
Fator de Redução por Flambagem Global [χ]	0,198
Área Efetiva [A_{ef}]	27,20 cm ²
Resistência ao Escoamento [f_y]	35 kN/cm ²
Coefficiente de Ponderação [γ_{st}]	1,1
Força Resistente de Cálculo [$N_{d,Rd}$]	171,36 kN

Fonte: Autor

Tabela 5 – Comparação de Resultados: Exemplo 3 (Perfil W 310x21)

Parâmetro	Verificação Manual (NBR 2024)	Resultado do Software	%Erro
Cenário A (Aço MR250)			
N_e (Gov)	214,94 kN (Eixo Y)	214,94 kN (Eixo Y)	-0,001%
Fator Global (χ)	0,277	0,277	0,002%
Área Efetiva (A_{ef})	27,20 cm ²	27,20 cm ²	0,000%
Resistência ($N_{c,Rd}$)	171,36 kN	171,36 kN	0,002%
Cenário B (Aço AR350)			
N_e (Gov)	214,94 kN (Eixo Y)	214,94 kN (Eixo Y)	-0,001%
Fator Global (χ)	0,198	0,198	0,002%
Área Efetiva (A_{ef})	27,20 cm ²	27,20 cm ²	0,000%
Resistência ($N_{c,Rd}$)	171,36 kN	171,36 kN	0,002%

Fonte: Autor

Como pode ser observado na **Tabela 5**, a planilha novamente forneceu resultados de acordo com os recalculados manualmente, demonstrados no apêndice A.

A **Tabela 5** não somente valida os cálculos do software, mas também expõe que por se tratar de um pilar esbelto ($\lambda_0 > 1,5$ em ambos os casos), a resistência do material praticamente não interfere na resistência à compressão da peça.

Isso ocorre porque o fator dominante aqui é a falha por instabilidade global (neste caso no Eixo Y). Assim como a resistência do pilar é ditada pela geometria e não pela resistência do aço, o aço MR250 se mostra mais econômico.

4.2.4. Exemplo 4

O quarto exemplo dimensiona um pilar feito com o perfil **W 610 x 82**, em aço **ASTM A36** ($f_y = 250 \text{ MPa}$), com 1,0 m de comprimento e vínculos biarticulados ($K = 1,0$).

A **Figura 24** apresenta a tela de "ENTRADA DE DADOS", com a inserção de dados do perfil, através

da lista suspensa. A **Figura 25** os dados de comprimento de flambagem. Nas **Figuras 26, 27 e 28** podemos ver a tela de “RESULTADOS” gerada pela ferramenta.

Figura 24 – Tela de Entrada de Dados do Perfil (Exemplo 4)

PERFIL

Tipo de Perfil

PERFIL W

Bitola do Perfil

W 610 x 82,0

PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

Área Bruta [A_b]

105,10 cm²

Momento de Inércia (Eixo X) [I_x]

56628 cm⁴

Momento de Inércia (Eixo Y) [I_y]

1210 cm⁴

Raio de Giração (Eixo X) [r_x]

23,21 cm

Raio de Giração (Eixo Y) [r_y]

3,39 cm

Altura Total [h_t]

599,0 mm

Altura Livre da Alma [h_w]

541,0 mm

Largura da Mesa [b_f]

178,0 mm

Espessura da Alma [t_w]

10,0 mm

Espessura da Mesa [t_f]

12,8 mm

Constante de Torção [J]

51,82 cm⁴

Constante de Empenamento [C_w]

1033595,00 cm⁶

Fonte: Autor

Figura 25 – Tela de Entrada de Dados do Comprimento de Flambagem (Exemplo 4)

FLAMBAGEM

FLAMBAGEM EM TORNO DO EIXO X-X (Eixo Forte)

Comprimento Destravado [L_x]

100 cm

Condição de Vínculo

Caso (a): Rotulada nas Duas Extremidades (Biarticulada)

Coefficiente de Flambagem [K_x]

1

Comprimento de Flambagem [K_xL_x]

100 cm

FLAMBAGEM EM TORNO DO EIXO Y-Y (Eixo Fraco)

Comprimento Destravado [L_y]

100 cm

Condição de Vínculo

Caso (a): Rotulada nas Duas Extremidades (Biarticulada)

Coefficiente de Flambagem [K_y]

1

Comprimento de Flambagem [K_yL_y]

100 cm

FLAMBAGEM EM TORNO DO EIXO Z-Z

Comprimento Destravado [L_z]

100 cm

Condição de Vínculo

Caso (a): Empenamento Livre

Coefficiente de Flambagem [K_z]

1

Comprimento de Flambagem [K_zL_z]

100 cm

Fonte: Autor

Figura 26 – Tela de Resultados de Flambagem Global do Software (Exemplo 4)

VERIFICAÇÃO DE FLAMBAGEM GLOBAL (FATOR χ)

Carga Crítica (Flexão X) [N_{ax}]

1117792 kN

Carga Crítica (Flexão Y) [N_{ay}]

23884,44 kN

Carga Crítica (Torção Z) [N_{az}]

37807 kN

Carga Crítica Governante [N_e]

23884,44 kN

Índice de Esbeltez Reduzido [λ₀]

0,332

Fator de Redução por Flambagem Global [χ]

0,955

Fonte: Autor

Figura 27 – Tela de Resultados de Flambagem Local do Software (Exemplo 4)

VERIFICAÇÃO DE FLAMBAGEM LOCAL (ÁREA EFETIVA A_{ef})

Esbeltez da Mesa [b_f/2t_f]

6,95

Limite de esbeltez da Mesa [λ_p]

15,84

Status da Mesa

COMPACTO

Esbeltez da Alma [h_w/t_w]

54,1

Limite de esbeltez da Alma [λ_p]

42,1

Status da Alma

ESBELTO

Status da Seção

Alma Esbelta.

Largura da Mesa Efetiva [b_{ef}]

178,0 mm

Altura da Alma Efetiva [h_{w,ef}]

458,7 mm

Área Efetiva [A_{ef}]

96,87 cm²

Fonte: Autor

Figura 28 – Tela de Resultados Finais do Software (Exemplo 4)

CÁLCULO DA RESISTÊNCIA FINAL

Fator de Redução por Flambagem Global [χ]

0,955

Área Efetiva [A_{ef}]

96,87 cm²

Resistência ao Escoamento [f_y]

25 kN/cm²

Coefficiente de Ponderação [γ_{a1}]

1,1

Força Resistente de Cálculo [N_{d,Rd}]

2102,63 kN

Fonte: Autor

O software novamente forneceu resultados de acordo com os recalculados manualmente, demonstrados no apêndice A, utilizando a NBR 8800 (ABNT, 2024), como pode ser observado na **Tabela 6**.

Tabela 6 – Comparação de Resultados: Exemplo 4 (Perfil W 610x82)

Parâmetro	Verificação Manual (NBR 2024)	Resultado do Software	%Erro
N _e (Gov)	23884 kN (Eixo Y)	23884 kN (Eixo Y)	0,000%
Fator Global (χ)	0,955	0,955	0,000%
Mesa	Compacto	Compacto	OK
Alma	Esbelto	Esbelto	OK
Área Efetiva (A _{ef})	96,87 cm ²	96,87 cm ²	0,005%
Resistência (N _{c,Rd})	2102,52 kN	2102,63 kN	0,005%

Fonte: Autor

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo a implantação de uma planilha automatizada, na plataforma Microsoft Excel, para o dimensionamento e verificação de pilares de aço submetidos a compressão simples, com base na norma NBR 8800 (ABNT, 2024).

Pode-se afirmar que o objetivo geral foi alcançado com sucesso. A ferramenta desenvolvida se mostrou capaz de automatizar toda a complexa sequência de cálculo da nova norma.

O Capítulo 4 demonstrou a fundamental etapa de validação. Comparando os resultados do software com os obtidos da adaptação dos exemplos da literatura, foi possível perceber a precisão da ferramenta ao demonstrar resultados quase idênticos (erro próximo de 0,0%), comprovando a implementação correta do algoritmo.

O software atendeu as motivações iniciais, demonstrando ser uma ferramenta ágil, resolvendo os cálculos instantaneamente; didática por ter interface clara e transparente; e por funcionar em uma plataforma muito difundida, pode ser considerado acessível.

Contudo, é importante ressaltar as limitações apresentadas no trabalho. A ferramenta é restrita ao dimensionamento de pilares à compressão simples em perfis de aço laminado. A flexo-compressão, combinação mais comum em projetos de edifícios, não foi implementada, tampouco o dimensionamento das ligações (placas de base).

Recomenda-se, como sugestão para trabalhos futuros, a ampliação do software com a inclusão de um módulo de verificação à flexo-compressão. Assim como pode ser incorporado o dimensionamento de vigas à flexão e a verificação das ligações parafusadas e soldadas, tornando-se um software de dimensionamento ainda mais completo para o apoio técnico e acadêmico.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Ações e segurança nas estruturas**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas** Rio de Janeiro, 2025.

GERDAU. **PERFIS ESTRUTURAIS W GERDAU - Informações técnicas e bitolas**. Gerdau. Disponível em:

<https://mais.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais/perfis-estruturais-w>

PINHEIRO, Antônio Carlos Bragança da Fonseca. **Estruturas metálicas**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2005.

PFEIL, Walter. **Estruturas de aço**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO MANUAL DOS EXEMPLOS DE VALIDAÇÃO

Este apêndice contém o memorial de cálculo dos quatro exemplos utilizados no processo de validação da ferramenta. As verificações foram realizadas conforme os critérios da ABNT NBR 8800:2024.

A.1. Exemplo 1 (Adaptado de Pfeil, 2021)

A.1.1. Dados de Entrada:

Material: Aço ASTM A36

- $f_y = 250 \text{ MPa} = 25 \text{ kN/cm}^2$
- $E = 200.000 \text{ MPa} = 20.000 \text{ kN/cm}^2$
- $G = 77.000 \text{ MPa} = 7.700 \text{ kN/cm}^2$

Perfil: W150x37,1 (Laminado)

- $A_g = 47,80 \text{ cm}^2$; $I_x = 2244 \text{ cm}^4$; $I_y = 707 \text{ cm}^4$;
- $J = 20,58 \text{ cm}^4$; $C_w = 39930 \text{ cm}^6$; $r_x = 6,85 \text{ cm}$; $r_y = 3,84 \text{ cm}$;
- $h_w = 119,0 \text{ mm}$; $b_f = 154,0 \text{ mm}$; $t_w = 8,1 \text{ mm}$; $t_f = 11,6 \text{ mm}$;

Raio de Giração Polar:

$$(i_0^2 = r_x^2 + r_y^2) = (6,85)^2 + (3,84)^2 = 61,6681 \text{ cm}^2$$

Comprimento e Vínculos:

$$L = 300 \text{ cm}; K_x = K_y = K_z = 1,0 \text{ (Biarticulado);}$$

A.1.2. Cálculo - Cenário A (Com contenção no eixo Y)

Neste cenário, $L_y = 0$, portanto N_{ey} é infinito e não governa.

A.1.2.1. Cálculo do Fator Global (χ)

Cálculo das Cargas Críticas (N_e):

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 2244}{(1 \cdot 300)^2} = 4921,64 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \infty \text{ (contido)}$$

$$N_{ez} = \left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + GJ \right) \cdot \frac{1}{r_0^2} = \left(\frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 39930}{(1 \cdot 300)^2} + 7700 \cdot 20,58 \right) \cdot \frac{1}{61,6681} = 3989,78 \text{ kN}$$

$$N_e = \min(4921,64, \infty, 3989,78) = 3989,78 \text{ kN}$$

Cálculo de λ_0 e χ :

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g \cdot f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{47,80 \cdot 25}{3989,78}} = 0,5473$$

Como $\lambda_0 \leq 1,5$:

$$\chi = 0,658(\lambda_0)^2 = 0,658(0,5473)^2 = 0,882$$

A.1.2.2. Cálculo da Área Efetiva (A_{ef})

Limite λ_p (Aço A36, $f_y=250$):

$$\lambda_p \text{ (Mesa AL)} = 0,56 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,56 * \sqrt{\frac{20000}{25}} = 15,84$$

$$\lambda_p \text{ (Alma AA)} = 1,49 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,49 * \sqrt{\frac{20000}{25}} = 42,14$$

Classificação:

$$\text{Mesa: } \frac{b_f}{2t_f} = \frac{15,4}{(2 * 1,16)} = 6,64 \leq \frac{15,84}{\sqrt{0,882}} = 16,87 \rightarrow \text{Compacto}$$

$$\text{Alma: } \frac{h_w}{t_w} = \frac{11,9}{0,81} = 14,69 \leq \frac{42,14}{\sqrt{0,882}} = 44,87 \rightarrow \text{Compacto}$$

Área Efetiva: Como todos os elementos são compactos:

$$A_{ef} = A_g = 47,80 \text{ cm}^2$$

A.1.2.3. Resistência Final ($N_{c,Rd}$)

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,882 \cdot 47,8 \cdot 25}{1,1} = 958,17 \text{ kN}$$

A.1.3. Cálculo - Cenário B (Sem contenção no eixo Y)

Agora, $L_y = 300 \text{ cm}$ e N_{ey} entra na verificação.

A.1.3.1. Cálculo do Fator Global (χ)

Cálculo das Cargas Críticas (N_e):

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 2244}{(1 \cdot 300)^2} = 4921,64 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 707}{(1 \cdot 300)^2} = 1550,62 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + GJ \right) \cdot \frac{1}{r_0^2} = \left(\frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 47,8}{(1 \cdot 300)^2} + 7700 \cdot 20,58 \right) \cdot \frac{1}{61,67} = 3989,78 \text{ kN}$$

$$N_e = \min(4921,64; 1550,62; 3989,78) = 1550,62 \text{ kN}$$

Cálculo de λ_0 e χ :

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g \cdot f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{47,8 \cdot 25}{1550,62}} = 0,878$$

Como $\lambda_0 \leq 1,5$:

$$\chi = 0,658^{(\lambda_0)^2} = 0,658^{(0,878)^2} = 0,724$$

A.1.3.2. Cálculo da Área Efetiva (A_{ef})

Limite λ_p (Aço A36, $f_y=250$):

$$\lambda_p (\text{Mesa AL}) = 0,56 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,56 * \sqrt{\frac{20000}{25}} = 15,84$$

$$\lambda_p (\text{Alma AA}) = 1,49 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,49 * \sqrt{\frac{20000}{25}} = 42,14$$

Classificação:

$$\text{Mesa: } \frac{b_f}{2t_f} = \frac{15,4}{(2 * 1,16)} = 6,64 \leq \frac{15,84}{\sqrt{0,724}} = 18,61 \rightarrow \text{Compacto}$$

$$\text{Alma: } \frac{h_w}{t_w} = \frac{11,9}{0,81} = 14,69 \leq \frac{42,14}{\sqrt{0,724}} = 49,52 \rightarrow \text{Compacto}$$

Área Efetiva: Como todos os elementos são compactos:

$$A_{ef} = A_g = 47,80 \text{ cm}^2$$

A.1.3.3. Resistência Final ($N_{c,Rd}$)

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,724 \cdot 47,8 \cdot 25}{1,1} = 786,53 \text{ kN}$$

A.2. Exemplo 2 (Adaptado de Pinheiro, 2005)**A.2.1. Dados de Entrada:**

Material: Aço ASTM A36

- $f_y = 250 \text{ MPa} = 25 \text{ kN/cm}^2$
- $E = 200.000 \text{ MPa} = 20.000 \text{ kN/cm}^2$
- $G = 77.000 \text{ MPa} = 7.700 \text{ kN/cm}^2$

Perfil: I 152,4x18,5 (Laminado)

- $A_g = 23,60 \text{ cm}^2$; $I_x = 919 \text{ cm}^4$; $I_y = 75,7 \text{ cm}^4$;
- $J = 5,14 \text{ cm}^4$; $C_w = 3886,22 \text{ cm}^6$; $r_x = 6,24 \text{ cm}$; $r_y = 1,79 \text{ cm}$;
- $h_w = 134,0 \text{ mm}$; $b_f = 84,6 \text{ mm}$; $t_w = 5,84 \text{ mm}$; $t_f = 9,2 \text{ mm}$;

Raio de Giração Polar:

$$(i_0^2 = r_x^2 + r_y^2) = (6,24)^2 + (1,79)^2 = 42,14 \text{ cm}^2$$

Comprimento e Vínculos:

$$L = 300 \text{ cm}; K_x = K_y = K_z = 1,0 \text{ (Biarticulado)};$$

A.2.2. Cálculo:**A.2.2.1. Cálculo do Fator Global (χ)**Cálculo das Cargas Críticas (N_e):

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 919}{(1 \cdot 300)^2} = 2015,59 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 75,7}{(1 \cdot 300)^2} = 166,03 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + GJ \right) \cdot \frac{1}{r_0^2} = \left(\frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 3886,22}{(1 \cdot 300)^2} + 7700 \cdot 5,14 \right) \cdot \frac{1}{42,14} = 1141,47 \text{ kN}$$

$$N_e = \min(2015,59; 166,03; 1141,47) = 166,03 \text{ kN}$$

Cálculo de λ_0 e χ :

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g \cdot f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{23,6 \cdot 25}{166,03}} = 1,885$$

Como $\lambda_0 > 1,5$:

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} = \frac{0,877}{1,885^2} = 0,247$$

A.2.2.2. Cálculo da Área Efetiva (A_{ef})Limite λ_p (Aço A36, $f_y=250$):

$$\lambda_p \text{ (Mesa AL)} = 0,56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,56 \cdot \sqrt{\frac{20000}{25}} = 15,84$$

$$\lambda_p \text{ (Alma AA)} = 1,49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,49 \cdot \sqrt{\frac{20000}{25}} = 42,14$$

Classificação:

$$\text{Mesa: } \frac{b_f}{2t_f} = \frac{8,6}{(2 \cdot 0,92)} = 4,67 \leq \frac{15,84}{\sqrt{0,247}} = 31,87 \rightarrow \text{Compacto}$$

$$\text{Alma: } \frac{h_w}{t_w} = \frac{13,4}{0,584} = 22,95 \leq \frac{42,14}{\sqrt{0,247}} = 84,79 \rightarrow \text{Compacto}$$

Área Efetiva: Como todos os elementos são compactos:

$$A_{ef} = A_g = 23,6 \text{ cm}^2$$

A.2.2.3. Resistência Final ($N_{c,Rd}$)

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,247 \cdot 23,6 \cdot 25}{1,1} = 132,48 \text{ kN}$$

Como $N_{c,Sd} = 80 \text{ kN}$, o perfil I 152x18,5 atende a solicitação com Taxa de utilização igual a 60,39%.

A.3. Exemplo 3 (Adaptado de Pfeil, 2021)

A.3.1. Dados de Entrada:

Materiais:

Aço ASTM A36 (MR250)

- $f_y = 250 \text{ MPa} = 25 \text{ kN/cm}^2$
- $E = 200.000 \text{ MPa} = 20.000 \text{ kN/cm}^2$
- $G = 77.000 \text{ MPa} = 7.700 \text{ kN/cm}^2$

Aço AR350

- $f_y = 350 \text{ MPa} = 35 \text{ kN/cm}^2$
- $E = 200.000 \text{ MPa} = 20.000 \text{ kN/cm}^2$
- $G = 77.000 \text{ MPa} = 7.700 \text{ kN/cm}^2$

Perfil: W 310x21 (Laminado)

- $A_g = 27,20 \text{ cm}^2$; $I_x = 3776 \text{ cm}^4$; $I_y = 98 \text{ cm}^4$;
- $J = 3,27 \text{ cm}^4$; $C_w = 21628 \text{ cm}^6$; $r_x = 11,77 \text{ cm}$; $r_y = 1,9 \text{ cm}$;
- $h_w = 303,0 \text{ mm}$; $b_f = 101 \text{ mm}$; $t_w = 5,1 \text{ mm}$; $t_f = 5,7 \text{ mm}$;

Raio de Giração Polar:

$$(i_0^2 = r_x^2 + r_y^2) = (11,77)^2 + (1,9)^2 = 142,14 \text{ cm}^2$$

Comprimento e Vínculos:

$$L = 300 \text{ cm}; K_x = K_y = K_z = 1,0 \text{ (Biarticulado)}$$

A.3.2. Cálculo (Aço MR250)

A.3.2.1. Cálculo do Fator Global (χ)

Cálculo das Cargas Críticas (N_e):

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 3776}{(1 \cdot 300)^2} = 8281,69 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 98}{(1 \cdot 300)^2} = 214,94 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + GJ \right) \cdot \frac{1}{r_0^2} = \left(\frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 21628}{(1 \cdot 300)^2} + 7700 \cdot 3,27 \right) \cdot \frac{1}{142,14} = 510,87 \text{ kN}$$

$$N_e = \min(8281,61; 214,94; 510,87) = 214,94 \text{ kN}$$

Cálculo de λ_0 e χ :

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g \cdot f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{27,20 \cdot 25}{214,94}} = 1,7787$$

Como $\lambda_0 > 1,5$:

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} = \frac{0,877}{1,7787^2} = 0,277$$

A.3.2.2. Cálculo da Área Efetiva (A_{ef})

Limite λ_p (Aço MR250, $f_y=250$):

$$\lambda_p \text{ (Mesa AL)} = 0,56 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,56 * \sqrt{\frac{20000}{25}} = 15,84$$

$$\lambda_p \text{ (Alma AA)} = 1,49 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,49 * \sqrt{\frac{20000}{25}} = 42,14$$

Classificação:

$$\text{Mesa: } \frac{b_f}{2t_f} = \frac{10,1}{(2 * 0,57)} = 8,86 \leq \frac{15,84}{\sqrt{0,2772}} = 30,08 \rightarrow \text{Compacto}$$

$$\text{Alma: } \frac{h_w}{t_w} = \frac{30,3}{0,51} = 59,41 \leq \frac{42,14}{\sqrt{0,2772}} = 80,04 \rightarrow \text{Compacto}$$

Área Efetiva: Como todos os elementos são compactos:

$$A_{ef} = A_g = 27,20 \text{ cm}^2$$

A.3.2.3. Resistência Final ($N_{c,Rd}$)

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,2772 \cdot 27,20 \cdot 25}{1,1} = 171,36 \text{ kN}$$

A.3.3. Cálculo (Aço AR350)

A.3.3.1. Cálculo do Fator Global (χ)

Cálculo das Cargas Críticas (N_e):

$$N_e = \min(8281,61; 214,94; 510,87) = 214,94 \text{ kN}$$

Cálculo de λ_0 e χ :

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g \cdot f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{27,20 \cdot 35}{214,94}} = 2,1046$$

Como $\lambda_0 > 1,5$:

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} = \frac{0,877}{2,1046^2} = 0,1980$$

A.3.3.2. Cálculo da Área Efetiva (A_{ef})

Limite λ_p (Aço AR350, $f_y=350$):

$$\lambda_p \text{ (Mesa AL)} = 0,56 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,56 * \sqrt{\frac{20000}{35}} = 13,39$$

$$\lambda_p \text{ (Alma AA)} = 1,49 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,49 * \sqrt{\frac{20000}{35}} = 35,62$$

Classificação:

$$\text{Mesa: } \frac{b_f}{2t_f} = \frac{10,1}{(2 * 0,57)} = 8,86 \leq \frac{13,39}{\sqrt{0,1980}} = 30,0918 \rightarrow \text{Compacto}$$

$$\text{Alma: } \frac{h_w}{t_w} = \frac{30,3}{0,51} = 59,41 \leq \frac{35,62}{\sqrt{0,1980}} = 80,0500 \rightarrow \text{Compacto}$$

Área Efetiva: Como todos os elementos são compactos:

$$A_{ef} = A_g = 27,20 \text{ cm}^2$$

A.3.3.3. Resistência Final ($N_{c,Rd}$)

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,1980 \cdot 27,20 \cdot 35}{1,1} = 171,36 \text{ kN}$$

A.4. Exemplo 4

A.4.1. Dados de Entrada:

Material: Aço ASTM A36

- $f_y = 250 \text{ MPa} = 25 \text{ kN/cm}^2$
- $E = 200.000 \text{ MPa} = 20.000 \text{ kN/cm}^2$
- $G = 77.000 \text{ MPa} = 7.700 \text{ kN/cm}^2$

Perfil: W 610x82 (Laminado)

- $A_g = 105,10 \text{ cm}^2$; $I_x = 56628 \text{ cm}^4$; $I_y = 1210 \text{ cm}^4$;
- $J = 51,82 \text{ cm}^4$; $C_w = 1033595 \text{ cm}^6$; $r_x = 23,21 \text{ cm}$; $r_y = 3,39 \text{ cm}$;
- $h_w = 541,0 \text{ mm}$; $b_f = 178,0 \text{ mm}$; $t_w = 10,0 \text{ mm}$; $t_f = 12,8 \text{ mm}$;

Raio de Giração Polar:

$$(i_0^2 = r_x^2 + r_y^2) = (23,21)^2 + (3,39)^2 = 550,20 \text{ cm}^2$$

Comprimento e Vínculos:

$$L = 100 \text{ cm}; K_x = K_y = K_z = 1,0 \text{ (Biarticulado)};$$

A.4.2. Cálculo:

A.4.2.1. Cálculo do Fator Global (χ)

Cálculo das Cargas Críticas (N_e):

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 56628}{(1 \cdot 100)^2} = 1117791,92 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 1210}{(1 \cdot 100)^2} = 23884,44 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_z \cdot L_z)^2} + GJ \right) \cdot \frac{1}{r_0^2} = \left(\frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 1033595}{(1 \cdot 100)^2} + 7700 \cdot 51,82 \right) \cdot \frac{1}{550,20} = 37806,91 \text{ kN}$$

$$N_e = \min(1117791,92; 23884,44; 37806,91) = 23884,44 \text{ kN}$$

Cálculo de λ_0 e χ :

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_g \cdot f_y}{N_e}} = \sqrt{\frac{105,1 \cdot 25}{23884,44}} = 0,332$$

Como $\lambda_0 \leq 1,5$:

$$\chi = 0,658^{(\lambda_0)^2} = 0,658^{(0,332)^2} = 0,955$$

A.4.2.2. Cálculo da Área Efetiva (A_{ef})

Limite λ_p (Aço A36, $f_y=250$):

$$\lambda_p \text{ (Mesa AL)} = 0,56 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,56 * \sqrt{\frac{20000}{25}} = 15,84$$

$$\lambda_p \text{ (Alma AA)} = 1,49 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,49 * \sqrt{\frac{20000}{25}} = 42,14$$

Classificação:

$$\text{Mesa: } \frac{b_f}{2t_f} = \frac{17,8}{(2 * 1,28)} = 6,95 \leq \frac{15,84}{\sqrt{0,955}} = 16,21 \rightarrow \text{Compacto}$$

$$\text{Alma: } \frac{h_w}{t_w} = \frac{54,1}{1,0} = 54,1 > \frac{42,14}{\sqrt{0,955}} = 43,12 \rightarrow \text{Esbelto}$$

Área Efetiva: Como a Alma é esbelta, vamos calcular b_{ef} :

Tensão Elastica (σ_{el}):

$$\sigma_{el} = \left(c_2 \frac{(b/t)_{lim}}{b/t} \right)^2 f_y = \left(1,31 * \frac{42,14}{54,1} \right)^2 * 25 = 26,03$$

Altura efetiva ($h_{w,ef}$):

$$h_{w,ef} = h_w \left(1 - c_1 \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{el}}{\chi f_y}} = 54,1 * \left(1 - 0,18 * \sqrt{\frac{26,03}{0,955 * 25}} \right) * \sqrt{\frac{26,03}{0,955 * 25}} = 45,87$$

Área Efetiva (A_{ef}):

Redução da área:

$$(h_w - h_{w,ef}) * t_w = (54,1 - 45,87) * 1 = 8,23 \text{ cm}^2$$

$$A_{ef} = A_g - (h_w - h_{w,ef}) * t_w = 105,10 - 8,23 = 96,87 \text{ cm}^2$$

A.4.2.3. Resistência Final ($N_{c,Rd}$)

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,955 * 96,87 * 25}{1,1} = 2102,52 \text{ kN}$$