

# DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA A VERIFICAÇÃO DE PERFIS DE AÇO SUJEITOS À COMPRESSÃO SIMPLES

## DEVELOPMENT OF A COMPUTER PROGRAM FOR THE VERIFICATION OF STEEL MEMBERS UNDER COMPRESSION

João Henrique da Silva Pinto<sup>1</sup>  
Jordlly Reydson de Barros Silva<sup>2</sup>

### RESUMO

Este estudo apresenta uma ferramenta em Python com interface gráfica para a verificação à compressão de perfis metálicos laminados I e HP, e perfis soldados, de acordo com a norma NBR 8800 (2008). São discutidos os principais conceitos teóricos de dimensionamento desses perfis, enfatizando a flambagem por flexão e flambagem local, como fenômenos de instabilidade em estruturas de aço. São apresentados aspectos da implementação da ferramenta em Python e exemplos de aplicação obtidos na literatura para validação do programa. O aplicativo mostrou-se uma solução adequada e eficiente para o problema em questão, sendo aplicável à realidade de projetos em estruturas de aço.

**Palavras-chave:** estruturas de aço; compressão; flambagem; python.

### ABSTRACT

This work presents a Python-based tool with a graphical interface that supports the verification of steel welded sections, as well as I and HP rolled steel sections, subjected to compression, in accordance with the NBR 8800 (2008) standard. The theoretical concepts of the design, including buckling analysis, which is the main instability in steel structures, are discussed. Implementation aspects of the Python tool are also presented, and examples of its application obtained from the literature are used in the program validation. The application has demonstrated to be suitable and efficient for the problem in question, being applicable for use design offices.

**Keywords:** steel elements; compression; buckling; python.

---

<sup>1</sup> Bacharelado em Engenharia Civil pela Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2023.

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Recife, 2022.

## INTRODUÇÃO

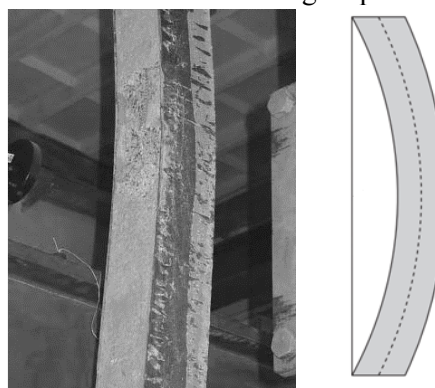
As soluções em aço são amplamente utilizadas na construção civil, podendo ser aplicadas em diferentes etapas do processo, como em estruturas e fundações. Além disso, suas propriedades mecânicas permitem a execução de grandes obras, com alta resistência e eficiência. Com o desenvolvimento da ciência das construções e da metalurgia, as estruturas metálicas adquiriram formas funcionais e arrojadas, constituindo-se em verdadeiros trunfos da tecnologia. No Brasil, podemos citar a Ponte Rio-Niterói, com vãos laterais de 200 m e vão central de 300 m, recorde mundial em viga reta, na época (Pfeil e Pfeil, 2008). A utilização do aço tende a trazer vantagem quanto à redução do tempo de construção. Contudo, apresenta alguns pontos negativos, como a sua baixa resistência ao fogo e à corrosão.

As estruturas metálicas podem ser compostas por vários tipos de elementos, como barras de treliças, vigas e pilares. Alguns desses elementos estão sujeitos a uma força de compressão axial, que age no sentido do eixo longitudinal e tende a comprimi-los na direção do seu comprimento. Em decorrência desse esforço, podem surgir deslocamentos laterais, conhecidos como flambagem, Figura 1. Esse é um fenômeno que pode afetar significativamente a capacidade resistente de tais elementos.

O impacto que a tecnologia vem causando na engenharia é bastante significativo e positivo, melhorando e otimizando processos, gerando mais qualidade ao produto. Existem alguns softwares para o projeto de estruturas de aço, contemplando também o dimensionamento, ou apenas o detalhamento, de barras à compressão, como o Advance Steel, SAP2000, Tekla Structures e Cype Metálicas 3D. Esses programas oferecem uma ampla variedade de ferramentas para modelagem

3D, documentação e gerenciamento de projetos, incluindo ferramentas para criar elementos estruturais, conectores, listas de materiais e seguindo, além de outras diretrizes, a norma brasileira de projeto de estruturas aço e mistas de aço e concreto para edifícios, NBR 8800 (2008). Além disso, oferecem integração com outros softwares de projeto, incluindo AutoCAD (Autodesk, 2021), Revit e Navisworks.

Figura 1 – Perfil I com flambagem por flexão



Fonte: Fakury et al., 2016

Neste trabalho será apresentado o desenvolvimento de uma ferramenta para o dimensionamento a compressão de perfis I de aço, segundo a norma NBR 8800 (2008). A ferramenta foi desenvolvida na linguagem de programação Python, contém uma interface gráfica, e é apresentada como um programa executável, ou seja, não requer a instalação de uma plataforma de programação em computadores de terceiros. Serão discutidos os fundamentos teóricos, a implementação, exemplos de aplicação e as conclusões obtidas.

## DIMENSIONAMENTO DE PEÇAS DE AÇO À COMPRESSÃO SIMPLES

Essa seção apresenta os principais fundamentos teóricos relacionados ao dimensionamento de perfis metálicos a compressão simples. São discutidos aspectos como a carga crítica de flambagem e a flambagem local, entre outros pontos.

### Flambagem por torção e flexo-torção

Normalmente as estruturas metálicas usuais tendem a não sofrer com problemas severos de flambagem por torção. Contudo, estruturas leves compostas por chapas finas podem apresentar esse fenômeno, Pfeil e Pfeil (2008). Entretanto, a flambagem por torção e flexo-torção está fora do escopo deste estudo.

### Flambagem por flexão

Peças estruturais estão sujeitas a vários tipos de esforços, como tração, compressão, flexão, cisalhamento ou torção. Alguns desses elementos (Vigas, Colunas e treliças) quando submetidos a uma carga de compressão e, se estiverem comprometidos e possuírem proporções esbeltas, essa carga pode ser suficientemente grande para induzir sua deflexão lateral (Hibbeler, 2010). Esse fenômeno é considerado uma instabilidade lateral, que pode ocorrer mesmo que o perfil não tenha atingido sua tensão de escoamento (flambagem elástica). Além disso, o colapso tende a ocorrer no eixo de menor inércia (eixo mais fraco) da sua seção transversal.

Em casos reais, as peças de aço tendem a não ser perfeitamente retilíneas, mesmo sem carregamento (imperfeições geométricas iniciais). Além disso, as cargas usualmente não são perfeitamente localizadas no centro de gravidade da seção transversal. Outro ponto relevante é que, durante o processo de fabricação, podem ocorrer falhas por resfriamento não uniforme, via soldagem da peça ou laminação, resultando em tensões

residuais. Segundo Alpsten e Tall (1970), as tensões residuais afetam significativamente a resistência à compressão, e são importantes para o dimensionamento, pois apresentam um dos principais motivos para a não-linearidade do diagrama de tensão-deformação na região inelástica. Além disso, outra característica mencionada, que vale ressaltar, é que a distribuição das tensões residuais varia de acordo com a espessura da peça, ou seja, as tensões residuais em componentes mais espessos tendem a serem maiores.

Os fatores descritos acima (imperfeições geométricas, excentricidade e tensões residuais) fazem com que o processo de flambagem por flexão ocorra desde o início do carregamento, contribuindo para o aumento dos deslocamentos laterais.

Este fenômeno pode ser estudado no escopo de toda a barra, quando a peça inteira sofre esse deslocamento lateral, ou localmente, quando apenas uma parte (chapa) do perfil tem esse comportamento (flambagem local).

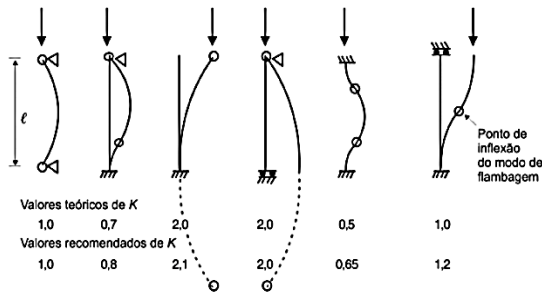
Leonhard Euler, matemático e físico suíço, dedicou-se em seus estudos à análise da estabilidade elástica de barras com força axial centrada e extremidades rotuladas (Souza, Alex. 1998). A coluna em questão é uma coluna ideal, caracterizada por ser perfeitamente reta antes de ser submetida à carga. Além disso, ela é feita de um material homogêneo e a carga é aplicada diretamente no centroide de sua seção transversal (Hibbeler, 2010). Assim, é uma situação ideal, com deslocamentos iniciais iguais a zero, até a carga atingir seu valor crítico  $N_{cr}$ , dado pela equação Eq. (1).

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (1)$$

onde:

$I$  é o momento de inércia da seção da barra em torno do eixo de flambagem em estudo.

Figura 2 – Comprimentos de flambagem



Fonte: Pfeil e Pfeil, 2008

$E$  é o módulo de elasticidade do material.

$L_e$  é o comprimento de flambagem da peça: distância entre os dois pontos de momento nulo da haste comprimida (pontos de inflexão), onde  $L_e = KL$ .

$L$  é o comprimento da barra.

$K$  é um coeficiente que depende do tipo de condição de contorno da estrutura, Figura 2.

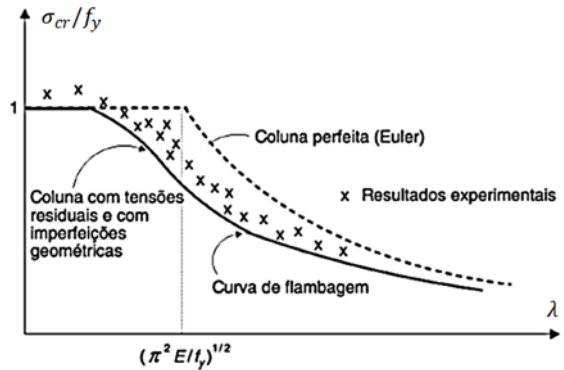
O valor teórico de  $K$  depende do problema analisado, que pode ser com extremidades rotuladas, engastadas ou livres. Como em situações reais dificilmente se tem o engastamento perfeito, a ABNT NBR 8800:2008 adota alguns valores recomendados. Essa imperfeição no engaste possibilita uma pequena rotação e isso eleva o valor do coeficiente  $K$  em relação ao teórico (FAKURI et al., 2016).

A Figura 2 apresenta alguns modelos de condições de contorno usuais, assim como, os valores teóricos e recomendados de  $K$  para cada situação.

Definindo o raio de giração da seção transversal em relação ao eixo em estudo  $i$  como a raiz quadrada da razão entre o momento de inércia  $I$  e a área da seção transversal  $A$ , e, o índice esbeltez  $\lambda$  como um parâmetro representativo da proporção geométrica do elemento, ou seja, a razão

entre  $L_e$  e  $i$ , pode-se obter a partir da equação Eq. (1) a tensão crítica  $\sigma_{cr}$ , Eq. (2).

Figura 3 – Curva tensão crítica - esbeltez



Fonte: Pfeil e Pfeil, 2008

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (2)$$

A Figura 3 representa a curva da tensão crítica  $\sigma_{cr}$ , dividida pela tensão de escoamento do material  $f_y$ , em função do índice de esbeltez  $\lambda$ . Pode-se notar que, para baixas esbeltezes, o valor da tensão crítica assume o valor do escoamento do aço, entretanto à medida que o elemento fica mais esbelto a tendência é ocorrer a flambagem. Assim, a tensão limite fica restrita a essa última. Como pode-se ver, um pilar com elevada esbeltez flamba com baixas tensões de compressão, podendo-se elevar sua capacidade resistente aumentando o raio de giração da seção ou o módulo de elasticidade do material (Timoshenko e Gere, 1984). Nessa figura, também são ilustrados os resultados obtidos em ensaios da literatura. A curva de flambagem com linha contínua ilustra a resposta para colunas imperfeitas (considerando tensões residuais e imperfeições geométricas).

Segundo Pfeil e Pfeil (2008), inúmeros trabalhos de pesquisa sobre resistência à

compressão de colunas foram realizados na América do Norte e na Europa a partir de 1970 resultaram no conceito de múltiplas curvas de flambagem de modo a abranger toda a gama de perfis, tipos de aço e processos de fabricação utilizados na indústria da construção. Com isso, foram propostas diversas curvas de flambagem, considerando os resultados experimentais obtidos. A norma brasileira ABNT NBR 8800 (2008) adota uma única curv

a de flambagem, considerando um fator de redução associado à resistência à compressão  $\chi$ , discutida anteriormente.

Figura 4 – Flambagem local perfil I



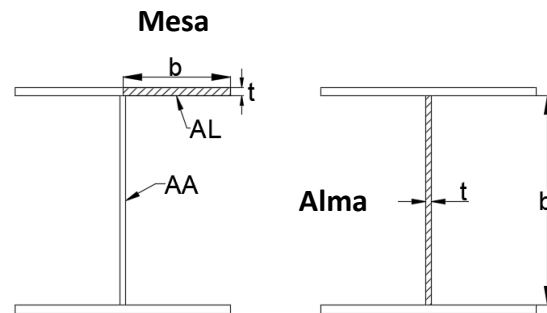
Fonte: <https://www.quora.com/What-is-local-buckling-in-steel-beams>

### Flambagem local

De acordo com a norma NBR 8800, flambagem local é o modo de falha de um elemento estrutural submetido a uma força de compressão, no qual a seção transversal do elemento apresenta deformações locais antes de falhar por instabilidade global, Figura 4. Esse fenômeno é influenciado pela relação entre a espessura e a largura das chapas que formam a seção transversal, além da presença de aberturas ou cortes na seção.

O fenômeno da flambagem local pode ocorrer nos elementos que formam um perfil metálico (como mesa e alma). Ela está relacionada diretamente com a esbeltez das chapas componentes do perfil submetidos à compressão, representada pela relação entre a largura  $b$  e a espessura  $t$  da chapa em questão  $\left(\frac{b}{t}\right)$ , Figura 5.

Figura 5 – Dimensões das chapas



Fonte: elaborado pelo próprio autor

Caso esse valor não ultrapasse o valor limite correspondente  $\left(\frac{b}{t}\right)_{lim}$ , a chapa tende a não sofrer flambagem local e essa verificação pode ser dispensada, pois o escoamento da chapa ocorrerá antes da flambagem. Isso é representado na norma por um fator de redução  $Q$  igual a 1. Esse fator leva em conta a flambagem local, reduzindo a carga de compressão resistente do elemento. Ao aplicá-lo na fórmula de dimensionamento da capacidade de carga, obtém-se uma carga reduzida que considera a flambagem local, assegurando uma margem de segurança adequada contra falha estrutural. É importante frisar que essa verificação deve ser feita para todas as chapas que compõem o perfil, por exemplo, mesa e alma. Discutiremos de forma mais detalhada esse fator de redução  $Q$  mais à frente.

## Dimensionamento via NBR 8800 (2008)

Nessa seção será apresentado o procedimento de verificação de barras à compressão segundo a norma ABNT NBR 8800 (2008). A capacidade de resistência à força axial de compressão de uma barra  $N_{c,Rd}$ , ligada aos estados-limites últimos de instabilidade por flexão e flambagem local, é determinada através da seguinte expressão, Eq. (3):

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (3)$$

onde:

$\gamma_{a1}$  é o coeficiente parcial de segurança.

$A_g$  é a área bruta da seção transversal.

$Q$  é o fator de redução devido à flambagem local.

$\chi$  é o fator de redução associado à resistência à compressão, que pode ser avaliado conforme as equações Eq. (4) e (5), com base no índice de esbeltez reduzido  $\lambda_0$ , Eq. (6).

$$\lambda_0 \leq 1,5: \chi = 0,658 \lambda_0^2 \quad (4)$$

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

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_{cr}}} \quad (6)$$

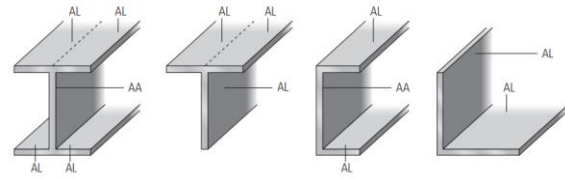
Para aços MR250 (ASTM A36) e AR350 (ASTM A572 Gr 50), a esbeltez reduzida resulta, respectivamente, nas Eq. (7) e Eq. (8):

$$\lambda_0 = 0,0113 \left( \frac{KL}{i} \right) \quad (7)$$

$$\lambda_0 = 0,0133 \left( \frac{KL}{i} \right) \quad (8)$$

Para verificar a flambagem local o valor limite de  $\left( \frac{b}{t} \right)_{lim}$  dos principais casos apresentado neste trabalho está exposto na Tabela F.1 da NBR 8800 (2008).

Figura 6 – Chapas AA e chapas AL



Fonte: Fakury et al., 2016

Essa tabela apresenta diferentes grupos de elementos de acordo com o seu tipo. Os elementos AA (apoiado-apoiado) estão divididos nos grupos 1 e 2, enquanto os elementos AL (apoiado-livre) estão nos grupos de 3 a 6, Figura 6. Para esta análise, vamos focar nos grupos 2 (almas de perfis I laminados), 4 (mesas de perfis I laminados) e 5 (perfis soldados), que são relevantes para a verificação do software.

Para analisar esse fenômeno na alma (grupo 2), a Tabela F.1 expõe o valor limite de  $1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$  e para a verificação da mesa o valor limite de  $0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ . Ainda segundo Pfeil e Pfeil (2008), esses valores limites dos grupos 2 e 4 podem ser, respectivamente, 42,1 (alma) e 15,8 (mesas), para o tipo do aço MR250 (ASTM A36). Além disso, para o aço AR350 (ASTM A572 Gr 50) temos os seguintes valores limites, 35,6 e 13,4.

Quando tratamos de perfis I soldados, o valor limite de  $\left( \frac{b}{t} \right)_{lim}$  se mantém para a alma (Grupo 2). Porém, para a mesa, utilizamos o limite  $0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$  (Grupo 5), onde:  $0,35 \leq k_c = \frac{4}{\sqrt{(h/t_w)}} \leq 0,76$

Caso a relação  $\left( \frac{b}{t} \right)$  ultrapasse o valor limite  $\left( \frac{b}{t} \right)_{lim}$ , a flambagem local deve ser

considerada no cálculo da resistência do perfil, através do fator de redução  $Q$ , obtido pelo produto dos redutores  $Q_s$  e  $Q_a$ , Eq. (9).

$$Q = Q_s Q_a \quad (9)$$

Esses fatores de redução  $Q_s$  e  $Q_a$  levam em conta a flambagem local, respectivamente, dos elementos apoiado-livre (AL) e apoiado-apoiado (AA), Figura 6. O cálculo desses parâmetros será apresentado na sequência.

Para se obter os valores de  $Q_s$  devemos consultar o Anexo F.2 e a Tabela F.1 da norma e verificar qual grupo se classifica o elemento analisado. Como o escopo deste trabalho majoritariamente são perfis I laminados, iremos apresentar a formulação correspondente para o grupo desse tipo de seção (Grupo 4). Contudo, devido à necessidade de verificar a flambagem local de uma seção soldada também apresentaremos a formulação do  $Q_s$  para esse caso (Grupo 5). Para maiores detalhes de outras seções, consultar a norma correspondente.

Mesas de perfis I laminados (Grupo 4):

Para:  $0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ , tem-se:

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (10)$$

Para:  $\frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ , tem-se:

$$Q_s = \frac{0,69E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (11)$$

Mesas de perfis I soldados (Grupo 5):

Para:  $0,64 \sqrt{\frac{E}{f_y/k_c}} < \frac{b}{t} \leq 1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y/k_c}}$ , tem-se:

$$Q_s = 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}} \quad (12)$$

Para:  $\frac{b}{t} > 1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y/k_c}}$ , tem-se:

$$Q_s = \frac{0,90Ek_c}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (13)$$

onde,  $b$  e  $t$  são a largura e a espessura da mesa, Figura 5. Deve-se adotar sempre o menor valor de  $Q_s$ , caso existam dois ou mais elementos AL.

O fator de redução  $Q_a$  para elementos comprimidos AA se dá pela seguinte relação:

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (14)$$

onde  $A_g$  é a área bruta e  $A_{ef}$  é a área efetiva da seção transversal, sendo:

$$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef})t \quad (15)$$

A variável  $b_{ef}$  é a largura efetiva do elemento comprimido AA (nesse trabalho, a altura da alma do perfil) e é obtida através da equação Eq. (16). Essa expressão foi adaptada a partir da NBR 8800 (2008), especificando-a para o caso em estudo.

$$b_{ef} = 1,92t \sqrt{\frac{E}{\chi f_y}} \left[ 1 - \frac{0,34}{b/t} \sqrt{\frac{E}{\chi f_y}} \right] \leq b \quad (16)$$

## DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA

Este capítulo tem como objetivo expor o desenvolvimento e as funcionalidades do programa desenvolvido (STR Análises), e mostrar o painel com a sua interface.

### Programação em Python

O software foi desenvolvido em Python, uma linguagem de programação amplamente utilizada na análise de dados, simulação de comportamento estruturais e modelagem.

Para o desenvolvimento do software, foram utilizadas bibliotecas como NumPy e uma de interface gráfica (PySimpleGUI). O Numpy é um projeto de código aberto que permite a

computação numérica via Python (Harris; Millman; Walt et al., 2020). O PySimpleGUI é uma biblioteca de fácil uso, intuitiva e bastante versátil para a implementação de interfaces gráficas. Também foram criados arquivos auxiliares, como o CATALOGO.py e o NBR\_8800\_2008.py. O primeiro consiste em um banco de dados com propriedades dos perfis analisados, e, o NBR\_8800\_2008.py é um módulo com funções de dimensionamento de perfis à compressão, conforme a referida norma. Para o CATALOGO.py foram utilizados da Tabela A4.9, Perfis W (tipo H) e perfis HP no capítulo Anexos de Pfeil e Pfeil (2008). No módulo NBR\_8800\_2008.py, podem-se ver as três funções: Flambagem global (Figura 7), Cálculo do coeficiente  $Q_s$  (Figura 8) e Cálculo do coeficiente  $Q_a$  (Figura 9), sendo suas formulações discutidas à frente.

Como pode-se observar, essas funções estão de acordo com o apresentado anteriormente.

## Interface do programa

A interface inicial do programa é exibida na Figura 9, apresentando as abas "Peças comprimidas" e "Vigas de alma cheia". Até então, a segunda aba não foi desenvolvida e, portanto, não será abordada nesse trabalho, ficando para uma futura atualização.

A aba inicial é composta por três seções. O painel intitulado "Geometria do perfil" exibe as informações geométricas dos perfis metálicos do tipo W. Enquanto isso, o painel "Dados de entrada" permite a inserção de informações que serão posteriormente usadas para realizar a verificação de flambagem dos perfis. O item "Defina o perfil" é uma opção predefinida baseada nos perfis inseridos em "CATALOGO.py". Logo abaixo dos dados de entrada, são descritas a versão e as referências para o desenvolvimento deste software.

Ainda na Figura 9, há uma parte denominada "Relatório de cálculo", que exibe uma

memória de cálculo com informações do perfil escolhido e os resultados da verificação da capacidade resistente.

Figura 7 – Função verificação flambagem global

```

### Função verificação flambagem global:
def Flambagem(TipoAco, E, K, L, r, A,  $\gamma_{a1}$ , Q):

    ### Tensão de escoamento do aço (MPa):
    if TipoAco == 'MR250':
        fy = 250.0
    else:
        fy = 345.0

    ### Índice de esbeltez reduzido:
     $\lambda_0$  = (K*L/r)*np.sqrt(Q*fy/(np.pi**2*E))

    ### Fator  $\chi$  :
    if  $\lambda_0$  <= 1.5:
         $\chi$  = 0.658**( $\lambda_0$ **2)
    else:
         $\chi$  = 0.877/( $\lambda_0$ **2)

    ### Esforço resistente:
    Ndr =  $\chi$ *A*Q*fy/ $\gamma_{a1}$ 

    return Ndr,  $\lambda_0$ ,  $\chi$ 

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Figura 8 – Função do cálculo do  $Q_s$  (Perfil laminado)

```

### Função do cálculo do  $Q_s$ :
def GetQs(TipoAco,  $\lambda_{mesa}$ ,  $\lambda_{alma}$ , E):

    Kc = (4/(np.sqrt( $\lambda_{alma}$ )))

    if Kc <= 0.35:
        Kc = 0.35

    if Kc >= 0.76:
        Kc = 0.76

    ### Condicional caso o aço seja o MR250:
    if TipoAco == 'MR250':
        fy = 250

    ### Condicional caso o aço seja o AR350:
    else:
        fy = 345

    ### Limites para o caso de perfis soldados
    ### conforme o Grupo 5 da Tabela F.1 da NBR 8800:2008
     $\lambda_{limite1}$  = 0.64*(np.sqrt(E*Kc/fy))
     $\lambda_{limite2}$  = 1.17*(np.sqrt(E*Kc/fy))

    ### Flambagem da mesa -
    ### condicional de verificação se há flambagem Local:
    if  $\lambda_{mesa}$  >  $\lambda_{limite1}$ :
        if  $\lambda_{mesa}$  <=  $\lambda_{limite2}$ :
             $Q_s$  = 1.415 - 0.65* $\lambda_{mesa}$ *(np.sqrt(fy/(E*Kc)))
        else:
             $Q_s$  = ((0.90*E*Kc)/(fy*( $\lambda_{mesa}$ **2)))
    else:
         $Q_s$  = 1

    return  $Q_s$ 

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Para formatar e imprimir esses dados em formato de tabela, utilizou-se a biblioteca “tabulate” (Liffiton, M., & Kocisky, T. (2020), que é uma ferramenta disponível em Python para apresentação visual de dados tabulares.

Figura 9 – Função do cálculo do  $Q_a$

```

### Função do cálculo do  $Q_a$ :
def GetQa(TipoAco,  $\lambda$ alma, tw, E, hw, tf, bf, A):

    ### Condicional caso o aço seja o MR250:
    if TipoAco == 'MR250':
        fy = 250
         $\lambda$ limite3 = 42.1
    ### Condicional caso o aço seja o AR350:
    else:
        fy = 345
         $\lambda$ limite3 = 35.6

    ### Flambagem da alma:
    if  $\lambda$ alma >  $\lambda$ limite3:

        # Item F3.2 da NBR 8800:2008:
        # pode-se adotar  $\sigma = fy$ , de forma conservadora.
         $\sigma = fy$ 

        # Coeficiente determinado pela norma
        # para esse tipo de perfil.
        ca = 0.34

        # Largura efetiva dos elementos AA:
        bef = 1.92*tw*(np.sqrt(E/ $\sigma$ ))*(1-(ca/ $\lambda$ alma))*(np.sqrt(E/ $\sigma$ ))
        bef = min(bef, hw-2*tf) # Aproximação de 'h' como 'hw-2tf'.

        # Área efetiva da seção transversal:
        Aef = (bef*tw)+2*(bf*tf)

        # A variável A sendo a área bruta:
        Qa = Aef/A
    else:
        Qa = 1
    return Qa

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor

## EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO

Nesta seção, serão abordados exemplos de utilização do software. O primeiro exemplo será um perfil W150x37.1 discutido em Pfeil e Pfeil (2008), e o segundo será um perfil soldado presente em Fakury et al. (2016), no qual faremos uma comparação dos resultados, considerando a flambagem local.

### Exemplo Perfil W150x37.1

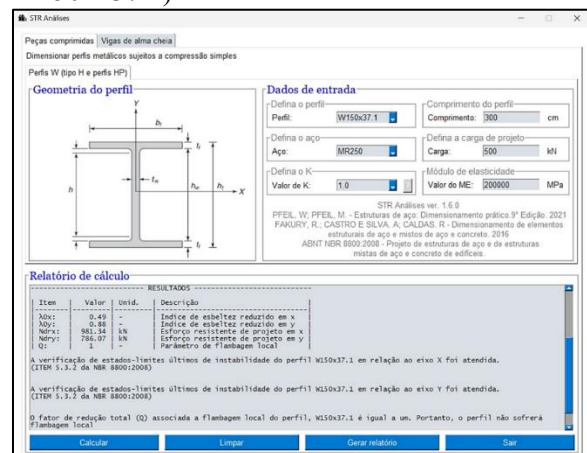
Na Figura 10, é mostrado o painel “Dados de entrada” devidamente preenchido com os dados de entrada desse exemplo. Ao clicar em “Calcular”, o resultado é exibido. Caso

algum item não esteja preenchido, aparecerá um aviso “Preencha todos os campos dos dados de entrada” e o programa não processará o dimensionamento.

Como se pode ver na Figura 10, o esforço resistente de projeto em relação ao eixo X resultou em 981.34 kN, enquanto em relação ao eixo Y o valor correspondente foi de 786.07 kN. Isso confirma os valores máximos de resistência à compressão desse perfil nessas configurações. Esse resultado está de acordo com o observado na literatura.

Além disso, o parâmetro de flambagem local  $Q$  foi igual a um, o que confirma que esse perfil não sofrerá com esse fenômeno, e as verificações correspondentes não foram realizadas.

Figura 10 – Interface STR Análises (Exemplo W150 x 37.1)



Fonte: elaborado pelo próprio autor

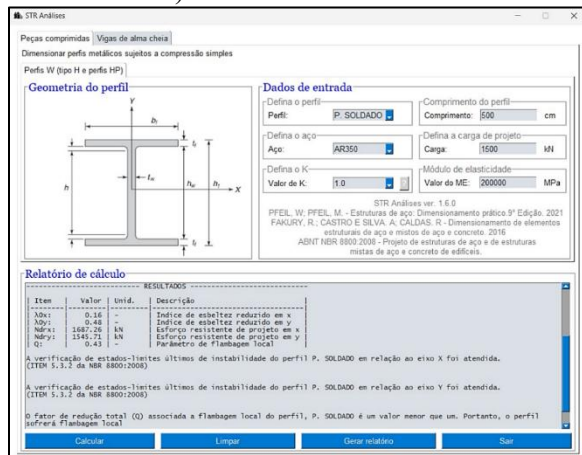
### Exemplo Perfil Soldado

Durante a análise, observou-se que todos os perfis laminados estudados atendiam aos requisitos para não apresentar flambagem local. Para verificar se essa funcionalidade do programa ( $Q_s$  e  $Q_a$ ) foi implementada corretamente, foi adicionado um novo perfil denominado “P. SOLDADO” ao módulo CATALOGO.py, obtido em Fakury et al. (2016). As equações do  $Q_s$  e  $Q_a$  foram

modificadas no programa, para esse novo perfil soldado.

Na Figura 11, pode-se observar todos os dados de entrada desse exemplo preenchidos, conforme a bibliografia. Segundo o problema apresentado na literatura, o comprimento de flambagem de X era 1000 cm e o de Y 500 cm. Assim, foi necessário realizar duas análises. Para a primeira situação (flambagem em Y) o esforço resistente de projeto em relação ao eixo X resultou em 1687,26 kN, enquanto em relação ao eixo Y o valor correspondente foi de 1545,71 kN.

Figura 11 – Interface STR Análises (Exemplo Perfil Soldado)

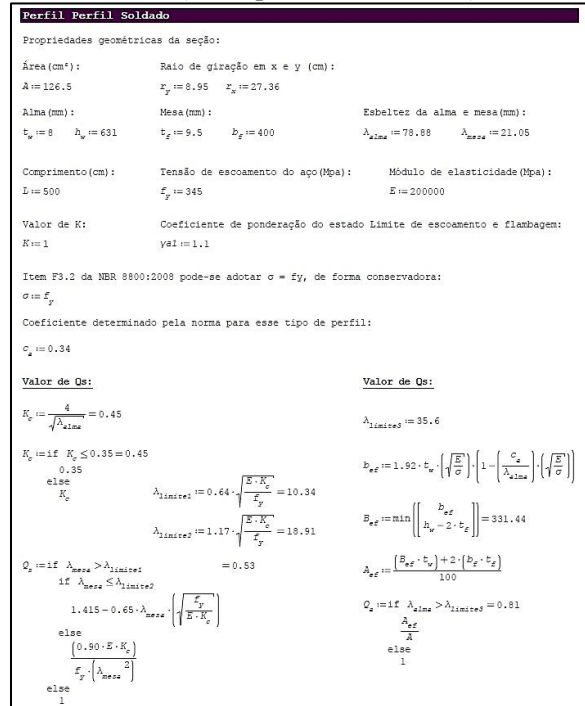


Fonte: elaborado pelo próprio autor

Para a outra situação (flambagem em X) o esforço resistente de projeto em relação ao eixo X resultou em 1634,94 kN, enquanto em relação ao eixo Y o valor correspondente foi de 1151,57 kN, conforme as Figuras 12 e 13.

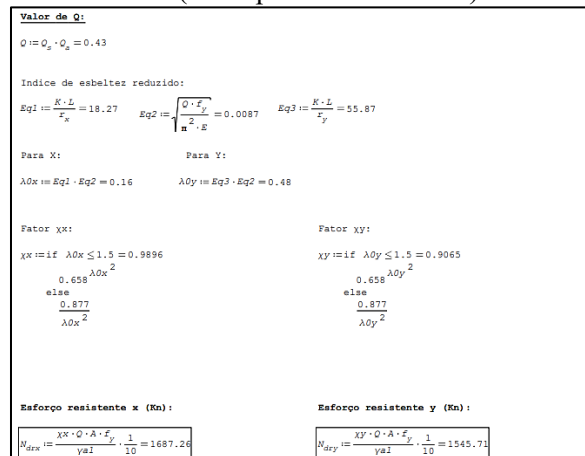
Foi escrita uma memória de cálculo no SMATH Studio (Ivashov, 2023), utilizando a formulação discutida, Figura 13, com o objetivo de verificar com mais detalhes o cálculo considerando a flambagem local. Tanto essa memória, como o STRAnálises, obtiveram resultados próximos ao da literatura.

Figura 12 – Verificação de flambagem via SMATH Studio (Exemplo Perfil Soldado)



Fonte: elaborado pelo próprio autor

Figura 13 – Verificação de flambagem via SMATH Studio (Exemplo Perfil Soldado)



Fonte: elaborado pelo próprio autor

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Neste estudo, foi desenvolvida uma ferramenta com interface gráfica desenvolvida em Python para o cálculo do dimensionamento à compressão de perfis metálicos laminados I e HP, bem como perfis soldados, de acordo com a norma NBR 8800 (2008).

### Conclusões

Com base no apresentado, pode-se elencar algumas conclusões:

- O software STRAnalises é capaz de atender aos requisitos para verificação de flambagem a flexão e flambagem local de perfis de aço W (tipo I e HP). Além disso, é capaz de calcular o valor máximo do esforço resistente nas duas direções do eixo do perfil, o que aumenta sua utilidade para a análise de perfis submetidos à compressão;
- A ferramenta apresenta uma interface gráfica intuitiva e é de fácil manuseio, fornecendo informações úteis ao projetista, sobre os resultados referentes ao tipo de perfil analisado;
- PysimpleGUI, uma biblioteca utilizada para gerar a interface gráfica, possui uma sintaxe intuitiva, documentação abrangente e de fácil utilização. Bastante utilizada para aplicações em Python que requer interfaces gráficas.
- Dessa forma, pode-se afirmar que esse software possui um potencial para auxiliar os usuários em suas atividades de projeto estrutural.

### Sugestões para futuros trabalhos

Algumas ideias levantadas ao longo do desenvolvimento, que não puderam ser implementadas na ferramenta, são citadas abaixo. Assim, para o aperfeiçoamento do

software, pode-se fazer as seguintes sugestões para futuros trabalhos:

- Módulo de otimização de seleção de perfil: de acordo com a solicitação informada, verificar um grupo de perfis e fornecer ao usuário qual o de menor peso que atende a essa solicitação. Essa funcionalidade do software contribuiria para a obtenção de uma solução mais econômica, ainda atendendo os critérios normativos;
- Geração automática de relatório em PDF: aqui o usuário poderá gerar um relatório com todos os perfis analisados;
- Analisar outros tipos de perfis laminados: Implementar a verificação em outros tipos de perfis laminados, como perfil I, perfil U e Cantoneiras (extensão do módulo CATALOGO.py);
- Verificação de vigas: Implementar no código a análise de vigas de aço.

## REFERÊNCIAS

ALPSTEN, G. A.; TALL, L. **Residual stresses in heavy rolled shape**. Bethlehem: Lehigh University, Fritz Engineering Laboratory, 1970. (Fritz Laboratory Reports, 337.10). Disponível em: <https://preserve.lehigh.edu/lehigh-scholarship/faculty-and-staff-publications/fritz-lab-reports/residual-stresses-heavy-rolled>. Acesso em: 12 mar. 2023.

AUTODESK. **AutoCAD**: software de projeto e desenho em que milhões confiam. Versão 2022. San Rafael, CA: Autodesk, 2021. 1 programa de computador. Disponível em: <https://www.autodesk.com/br/products/autocad/overview>. Acesso em: 22 mar. 2023.

SOUZA, Alex Sander Clemente de. **Contribuição ao estudo das estruturas metálicas espaciais**. 1993. 162 f. Dissertação (Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-26022018-134729/publico/Dissert\\_Souza\\_AlexSC.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-26022018-134729/publico/Dissert_Souza_AlexSC.pdf). Acesso em: 16 mar. 2023.

FAKURY, Ricardo Hallal; SILVA, Ana Lydia Reis de Castro e; CALDAS, Rodrigo Barreto. **Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

HARRIS, Charles R. et al. Array programming with NumPy. **Nature**, v. 585, n. 7825, p. 357–362, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>. Disponível em: <https://rdcu.be/eRimk>. Acesso em: 20 mar. 2023.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. Tradução: Arlete Simille Marques; revisão técnica: Sebastião Simões da Cunha Júnior. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

IVASHOV, A. **SMath Studio**. Versão 2023. [S.l.]: [s.n.], 2023. 1 programa de computador. Disponível em: <https://en.smath.com/view/SMathStudio/suimary>. Acesso em: 09 abr. 2023.

ASTANIN, S. **Tabulate**. Versão 0.9.0. [S.l.]: [s.n.], 2022. Disponível em: <https://pypi.org/project/tabulate/>. Acesso em: 18 abr. 2023.

PYSIMPLEGUI: two importante updates about PySimpleGui, 2023. Disponível em: <https://www.pysimplegui.org/en/latest/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

TIMOSHENKO, Stephen P.; GERE, James E. **Mecânica dos sólidos**: v. II. Tradução e coordenação técnica de José Rodrigues de Carvalho. Rio de Janeiro: LTC, 1984.

## AGRADECIMENTOS

Início agradecendo a Deus por ter me dado forças e por ter me ajudado em momentos difíceis a manter o foco até a conclusão desse curso.

À minha amada mãe, que sempre esteve ao meu lado, incentivando e apoiando em tudo. Sem o seu amor e dedicação, nada disso seria possível.

Ao meu pai, mesmo não estando mais entre nós, dedico este trabalho em sua memória. Ele sempre foi um grande exemplo de coragem e perseverança para mim.

Às minhas queridas irmãs, que sempre me ajudaram e me inspiraram a continuar. Elas fazem parte da minha base.

À minha amada esposa, que foi minha grande companheira durante boa parte desse percurso. Ela sempre me deu um suporte e lutou ao meu lado.

Ao meu filho, por ser minha fonte de inspiração e força inimagináveis. Meu amor por ele é um motivo constante para buscar ser uma pessoa melhor.

Ao meu professor orientador, que com sua paciência, conhecimento e dedicação me orientou e ensinou a realizar este trabalho. Suas orientações foram essenciais para a realização deste trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os meus colegas de turma, que compartilharam comigo momentos inesquecíveis e que se tornaram amigos durante todo o curso. A ajuda e o apoio de vocês foram primordiais para eu chegar até aqui.

Obrigado!