

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA
COMPUTACIONAL COM BANCO DE DADOS PARA A
VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE PILARES
METÁLICOS**

YGOR MORAIS GUIMARÃES

Rio Verde, GO

2024

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO
– CAMPUS RIO VERDE**

BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA
COMPUTACIONAL COM BANCO DE DADOS PARA A
VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE PILARES
METÁLICOS**

YGOR MORAIS GUIMARÃES

Trabalho de curso apresentado ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Michell Macedo Alves

Rio Verde, GO

Fevereiro, 2024

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

GG963d Guimarães, Ygor
Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional
com Banco de Dados para a Verificação Mecânica de
Pilares Metálicos / Ygor Guimarães; orientador
Michell Macedo Alves. -- Rio Verde, 2024.
48 p.

TCC (Graduação em Engenharia Civil) -- Instituto
Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2024.

1. dimensionamento. 2. estruturas. 3. rotina
computacional. 4. nbr 8800. I. Macedo Alves,
Michell, orient. II. Título.



TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- Tese Artigo Científico
 Dissertação Capítulo de Livro
 Monografia – Especialização Livro
 TCC - Graduação Trabalho Apresentado em Evento
 Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____

Nome Completo do Autor: Ygor Moraes Guimarães

Matrícula: 2017102200840208

Título do Trabalho: Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional com Banco de Dados para a Verificação Mecânica de Pilares Metálicos

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 09/02/2026

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
gov.br YGOR MORAIS GUIMARAES
Data: 15/02/2024 21:40:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rio Verde, Goiás, 15/02/2024.

Local

Data

Ygor Moraes Guimarães
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Documento assinado digitalmente
gov.br MICHELL MACEDO ALVES
Data: 15/02/2024 19:02:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ciente e de acordo:

Dr. Michell Macedo Alves
Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 4/2024 - CCTEDI-RV/GEPTNM-RV/DE-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Ao(s) 9 dia(s) do mês de fevereiro de 2024, às 17 horas, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: Prof. Dr. Michell Macedo Alves (orientador), Prof. Dr. Heitor Cardoso Bernardes (membro interno) e Prof. Me. Phelippe Mendonça de Paiva (membro externo) para examinar o Trabalho de Curso intitulado "Desenvolvimento de uma ferramenta computacional com banco de dados para a verificação da resistência mecânica de pilares metálicos" do estudante Ygor Morais Guimarães, Matrícula nº 2017102200840208 do Curso de Engenharia Civil do IF Goiano – Campus Rio Verde. A palavra foi concedida ao estudante para a apresentação oral do TC, houve arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela APROVAÇÃO do estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Observação:

() O(a) estudante não compareceu à defesa do TC.

Documento assinado eletronicamente por:

- Heitor Cardoso Bernardes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/02/2024 20:27:58.
- Michell Macedo Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/02/2024 18:44:23.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 15/02/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 572114

Código de Autenticação: 28c36d469a



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me mantido na trilha certa durante todos esses anos de faculdade, com saúde e forças para chegar até o final.

Sou grato à minha família pelo apoio que sempre me deram durante toda a minha vida.

Deixo um agradecimento especial ao meu orientador pelo incentivo e pela dedicação do seu escasso tempo ao meu trabalho de curso.

Também quero agradecer ao IF Goiano- Campus Rio Verde e a todos os professores do meu curso, pela elevada qualidade do ensino oferecido.

Também agradeço a todos os meus amigos, em especial ao Thiago Rodrigues, Gustavo Vieira, Luis Henrique Damásio, Bárbara Marques, Marcelo Damásio, Victor Jhonatan, Henrique Carvalho, João Vitor Morais, Amanda Groto, Geovane Rocha, Caroline Silva e Arthur Henrique, que sempre me ajudaram e apoiaram, desde o início dessa jornada. Por fim, a minha companheira Mayra Lobato, por toda confiança e apoio moral nesta trajetória.

Obrigado a todos!

RESUMO

GUIMARÃES, Y. M. **Desenvolvimento de uma ferramenta computacional com banco de dados para a verificação da resistência mecânica de pilares metálicos.** 2024. 48p Monografia (Curso de Bacharelado em Engenharia Civil). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2024.

Em comparação ao concreto armado, as estruturas metálicas apresentam diversas vantagens, desde o seu custo aquisitivo e rapidez de execução, sendo amplamente utilizadas em países desenvolvidos, principalmente na implantação de projetos que exigem elevados padrões técnicos e de velocidade de execução. Este trabalho tem por objetivo implementar computacionalmente um software contendo banco de dados para o dimensionamento de pilares metálicos de aço, segundo a NBR 8800: 2008, com o intuito de realizar uma verificação do melhor perfil no quesito monetário e leveza. A metodologia utilizada seguiu a NBR 8800:2008, onde para o dimensionamento implementou-se as verificações das estruturas metálicas seguido de elaboração de algoritmos computacionais. Posteriormente, implementou-se os códigos computacionais em linguagem *Python*, com a utilização da *IDE Vs Code* e efetuou-se a vinculação dos códigos computacionais para a execução da ferramenta computacional pelo usuário. Em relação a otimização da ferramenta computacional com a criação do banco de dados, contendo as características geométricas dos perfis, obteve-se ótimos resultados em seu manuseio, com os parâmetros exigidos do mercado, sem a necessidade de verificação externa. Demonstrando assim, maior confiabilidade nos resultados obtidos durante o dimensionamento, minimizando os erros provenientes de uma base de perfis não atualizada ou verificada no mercado. O programa computacional disponibiliza, a partir de seu banco de dados interno de perfis metálicos, a solução com a menor massa linear, tendo como destaque um perfil mais eficiente para a estrutura e ao seu valor monetário.

Palavras-chave: dimensionamento; NBR 8800:2008; perfis metálicos; rotina computacional.

ABSTRACT

GUIMARÃES, Y. M. **Desenvolvimento de uma ferramenta computacional com banco de dados para a verificação da resistência mecânica de pilares metálicos.** 2024. 48p Monografia (Curso de Bacharelado em Engenharia Civil). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2024.

Compared to reinforced concrete, steel structures have several advantages, from their acquisition cost and speed of execution, being widely used in developed countries, especially in the implementation of projects that require high technical standards and speed of execution. The objective of this work is to implement a software containing a database for the design of steel steel columns, according to NBR 8800: 2008, to verify the best profile in terms of money and lightness. The methodology used followed NBR 8800:2008, where for the design the verification of the steel structures was implemented, followed by the elaboration of computational algorithms. Subsequently, the computational codes were implemented in *Python* language, with the use of *the IDE Vs Code* and the linking of the computational codes for the execution of the computational tool by the user was carried out. Regarding the optimization of the computational tool with the creation of the database, containing the geometric characteristics of the profiles, excellent results were obtained in its handling, with the parameters required by the market, without the need for external verification. Thus, demonstrating greater reliability in the results obtained during the design, minimizing the errors arising from a profile base that is not updated or verified in the market. The computer program provides, from its internal database of metal profiles, the solution with the lowest linear mass, highlighting a more efficient profile for the structure and its monetary value.

Keyword: Sizing; NBR 8800:2008; metal profiles; computational routine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Definição da espessura e largura das partes componentes dos perfis metálicos	17
Figura 2. IDE do VS CODE.....	24
Figura 3. Tela inicial do Programa Computacional	26
Figura 4. Seleção do Tipo de Perfil	27
Figura 5. Parâmetros do Enrijecedor	28
Figura 6. Coeficiente Ca	29
Figura 7. Parâmetros de Flambagem	30
Figura 8. Definição dos Valores das Solicitações	31
Figura 9. Resultados	32
Figura 10. Seleção de Perfil	45
Figura 11. Parâmetros do Enrijecedor do Exemplo	46
Figura 12. Variável Ca e Furos na Chapa	47
Figura 13. Parâmetros de Flambagem do Exemplo	47
Figura 14. Solicitações do Exemplo	48
Figura 15. Resultado Exemplo	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Parâmetros referentes ao momento fletor resistente	21
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

$K_z L_z$ = coeficiente de flambagem por torção

γ_{a1} = coeficiente de ponderação relacionado a escoamento, flambagem e instabilidade

γ_{a2} = coeficiente de ponderação relacionado à ruptura

σ_{cr} = tensão normal crítica

M_{Rd} = momento fletor resistente de cálculo

M_{Sd} = momento fletor solicitante de cálculo

$N_{c,Rd}$ = força axial de compressão resistente de cálculo

$N_{c,Sd}$ = força axial de compressão solicitante de cálculo

$N_{t,Rd}$ = força axial de tração resistente de cálculo

$N_{t,Sd}$ = força axial de tração solicitante de cálculo

V_{Rd} = força cortante resistente de cálculo

V_{Sd} = força cortante solicitante de cálculo

f_u = resistência à ruptura do aço

f_y = resistência ao escoamento do aço

a = distância entre enrijecedores transversais adjacentes

A_{ef} = área efetiva da seção transversal

A_g = área bruta da seção transversal

A_w = área efetiva de cisalhamento

b = largura dos elementos comprimidos AL

b_{ef} = largura efetiva dos elementos comprimidos AA

b_f = largura da mesa

C_a = coeficiente igual a 0,38 para mesas e almas de seções tubulares retangulares ou quadradas, e 0,34 para os demais casos

C_b = fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme

C_t = coeficiente de redução da área líquida

C_w = constante de empenamento da seção transversal

d = altura externa da seção

d' = diâmetro da barra

D = diâmetro externo da seção tubular circular

E = módulo de elasticidade do aço

G = módulo de elasticidade

transversal do aço

h = altura da alma

I = momento de inércia de seção transversal em relação a um dos eixos principais de inércia

I_y = momento de inércia em relação ao eixo y

J = constante de torção da seção transversal

KL = comprimento de flambagem por flexão em relação a um dos eixos principais de inércia

f = comprimento efetivo da ligação

L_b = distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado)

L_v = distância entre as seções de forças cortantes máxima e nula

M_A = valor do momento fletor solicitante de cálculo situado a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda

M_B = valor do momento fletor solicitante de cálculo situado na seção central do comprimento destravado

M_C = valor do momento fletor solicitante de cálculo situado a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade esquerda

M_{cr} = momento fletor de flambagem elástica

M_{max} = valor máximo do momento fletor solicitante de cálculo no comprimento destravado

M_{pl} = momento fletor de plastificação

N_e = força axial de flambagem elástica

Q = fator de redução total associado à flambagem local

Q_a = fator de redução que leva em conta flambagem local dos elementos AA

Q_s = fator de redução que leva em conta flambagem local dos elementos

r_0 = raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento

r_x = raio de giração em relação ao eixo central x

r_y = raio de giração em relação ao eixo central y

t_f = espessura da mesa

t_w = espessura da alma

V_{pl} = força cortante correspondente a plastificação da alma por cisalhamento

W = módulo resistente elástico

W_c = módulo resistente elástico do lado comprimido da seção

Z = módulo de resistência plástico

i_l = parâmetro de esbeltez da seção transversal

X = fator de redução associado à resistência à compressão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo geral	16
1.2 Objetivos específicos	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 VERIFICAÇÃO DA ESBELTEZ DA COLUNA	17
2.2 VERIFICAÇÃO A COMPRESSÃO	18
2.2.1 Dimensionamento	19
2.3 VERIFICAÇÃO À FLEXÃO EM X	21
2.4 VERIFICAÇÃO DO CISALHAMENTO	22
2.4.1 Seções I, H, U e T fletidas em relação ao eixo perpendicular à alma e seções tubulares retangulares e caixão	22
2.5 VERIFICAÇÃO DOS ESFORÇOS COMBINADOS	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4 CONCLUSÃO	33
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
APÊNDICES.....	35
APÊNDICE A.....	35

1 INTRODUÇÃO

Perante a ascensão populacional e os avanços tecnológicos na área construtiva, a construção civil vem procurando alternativas para seu desenvolvimento. Ainda é majoritariamente atualmente a construção em concreto, caracterizada pela baixa produtividade e especialmente pelo grande desperdício, o mercado tem sinalizado que essa situação deve ser alterada e que o uso de novos procedimentos é a melhor forma de aprovar a racionalização dos métodos (ALBUQUERQUE; PINHEIRO, 2002).

O aço tem sido empregado na construção como forma de aumentar a produtividade, com pouco desperdícios, mais rapidez de execução, menos mão de obra, o que indiretamente reduz o custo/benefício. Com isso o aço ganha cada vez mais espaço não só em construções de galpões, como também em construções residenciais (RODRIGUES, 2006).

De acordo com o Centro Brasileiro de Estruturas Siderúrgicas (CBCA), em 2015, o uso de estruturas metálicas representou cerca de 15% do setor de construção do país, e a previsão é chegar a 20% das edificações nos próximos cinco anos. Cada vez mais pessoas acreditam que devido à necessidade de grandes edifícios, a indústria está em busca de métodos mais vantajosos.

A produção de estruturas em aço de instalações civis e industriais permite um processo produtivo mais eficiente e razoável, com grande variabilidade na forma, profissionais trabalhadores, duplicação de tarefas e controle de qualidade, além de desobstruir o canteiro de obras, resultando em edificações simplificadas, rápidas e limpas. Com menor tempo de execução, maior durabilidade, qualidade e valor de resistência, garantidos pelo processo de fabricação, as estruturas metálicas vem conquistando o mercado nacional (BELLEI; PINHO, 2008).

Segundo Novelli (2015), o uso e desenvolvimento de ferramentas computacionais no dimensionamento de estruturas metálicas, faz-se com que, as análises e cálculos elaborados segundo a NBR 8800:2008, sejam mais confiáveis. Fato este, que facilita na execução das obras.

O trabalho tratará de elaboração de um programa computacional, que executa as verificações a serem feitas para o dimensionamento de pilares de aço a partir das características geométricas e solicitações de projetos indicados inseridos em um banco de dados, tal qual utilizou-se a linguagem de programação Python.

Segundo Mckinney (2018), nos últimos anos com o suporte melhorado de Python para as bibliotecas como *pandas* e *scikit-learn*, tornou a linguagem uma opção popular para as

tarefas de análise de dados. Aliado à sua robustez computacional, é uma excelente opção para a construção de aplicação e análise de dados.

Dessa forma, o trabalho se justifica por tornar-se necessário a sistematização dos processos para análise dos elementos estruturais, o que torna viável elaboração de um programa computacional que verifica a partir de parâmetros fornecidos, o dimensionamento de uma estrutura metálica a diversos tipos de esforço.

É de se ressaltar ainda que, esse programa tem o intuito de otimizar o tempo de execução de obras, haja vista que o tempo é um fator relevante no custo final. Essa otimização será feita através da implementação de um banco de dados no programa computacional.

Uma das premissas é que a estrutura de aço apresenta grandes vantagens em comparação com concreto armado semelhante, sob os mesmos requisitos, mais leve, menor tamanho e maior confiabilidade.

Diante dos fatos apresentados deve-se destacar, que os programas existentes para dimensionar elementos de estruturas metálicas possuem um custo aquisitivo muito alto. E tem-se como premissa disponibilizar um programa computacional com um custo mais baixo e mais acessível.

1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo implementar computacionalmente um software contendo banco de dados para o dimensionamento de pilares metálicos de aço, segundo a NBR 8800:2008, com o intuito de realizar uma verificação do melhor perfil no quesito monetário e peso.

1.2 Objetivos específicos

- ✓ Analisar as literaturas acerca da NBR 8800:2008, através de uma pesquisa bibliográfica a respeito dos procedimentos para dimensionamento dos elementos estruturais de pilares metálicos.
- ✓ Otimizar o dimensionamento de pilares mecânicos de aço, através de uma ferramenta computacional em linguagem Python, a fim de verificar qual o perfil mais econômico monetariamente e leve.
- ✓ Avaliar a vinculação dos códigos computacionais implementados ao sistema de banco de dados que possuirá uma base de perfis a serem escolhidos pelo programa principal.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 VERIFICAÇÃO DA ESBELTEZ DA COLUNA

A NBR 8800 (ABNT, 2008, p. 36) define esbeltez como sendo a relação entre largura e espessura (b/t) da seção transversal do perfil. O quadro 1 apresenta a parte das seções dos perfis metálicas que devem ser consideradas como largura e como espessura para o cálculo da esbeltez.

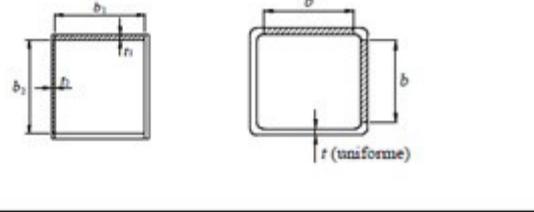
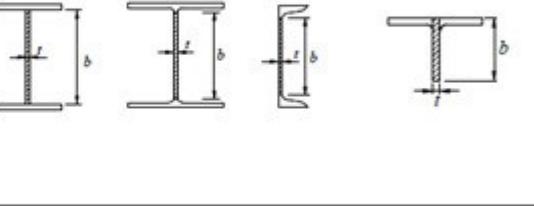
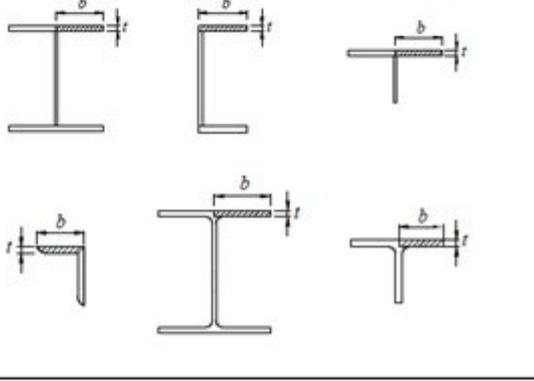
Elemento	Largura, b, e espessura, t
Seção fechada	
Alma	
Mesa	

Figura 1. Definição da espessura e largura das partes componentes dos perfis metálicos
(adaptado de ABNT, 2008)

Conforme o item 5.3.4 da ABNT, NBR8800:2008, a limitação do índice de esbeltez das barras comprimidas, tomado como a maior relação entre o comprimento destravado do perfil L e o raio de giração correspondente r , não deve ser superior a 200.

2.2 VERIFICAÇÃO A COMPRESSÃO

Esta subseção apresenta os critérios de dimensionamento de barras prismáticas submetidas à compressão simples, levando em conta os efeitos de flambagem.

Pfeil e Pfeil (2009, p. 119) mostram as principais diferenças entre os esforços de compressão e os de tração:

Ao contrário do esforço de tração, que tende a retificar as peças reduzindo o efeito de curvaturas iniciais existentes, o esforço de compressão tende a acentuar esse efeito. Os deslocamentos laterais produzidos compõem o processo conhecido por **flambagem por flexão** que, em geral, reduz a capacidade de carga da peça em relação ao caso da peça tracionada [...].

2.2.1 Dimensionamento

Conforme a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 43), no dimensionamento de barras prismáticas submetidas à força axial de compressão, deve ser atendida a condição:

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

Onde:

$N_{c,Sd}$ = força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$ = força axial de compressão resistente de cálculo.

A força axial resistente de cálculo é dada pela equação 2. É importante ressaltar que os efeitos associados aos estados-limites últimos de instabilidade por flexão, por torção ou flexo-torção e de flambagem local já estão considerados nessa equação:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (\text{EQUAÇÃO 2})$$

Onde:

χ = fator de redução associado à resistência à compressão;

Q = fator de redução total associado à flambagem local;

A_g = área bruta da seção transversal da barra;

f_y = resistência ao escoamento do aço.

γ_{a1} = coeficiente de ponderação relacionado a escoamento, flambagem e instabilidade.

2.3 VERIFICAÇÃO À FLEXÃO EM X

Pfeil e Pfeil (2009, p. 153, grifo do autor) demonstram a importância do dimensionamento à flexão:

No projeto no estado limite último de vigas sujeitas à flexão simples calcula-se, para as seções críticas, o momento e o esforço cortante resistentes de projeto para compará-los aos respectivos esforços solicitantes de projeto [...].

A resistência à flexão das vigas pode ser afetada pela flambagem local e pela flambagem lateral. A **flambagem local** é a perda de estabilidade das chapas comprimidas componentes do perfil, a qual reduz o momento resistente da seção.

Na **flambagem lateral** a viga perde seu equilíbrio no plano principal de flexão (em geral vertical) e passa a apresentar deslocamentos laterais e rotações de torção [...].

Os tipos de seções transversais mais adequados para o trabalho à flexão são aqueles com maior inércia no plano da flexão, isto é, com as áreas mais afastadas do eixo neutro. O ideal, portanto, é concentrar as áreas em duas chapas, uma superior e uma inferior, ligando-as por uma chapa fina. Concluímos assim que as vigas em forma de I são as mais funcionais [...].

Do trecho anterior nota-se que a determinação do momento resistente de cálculo dependerá dos efeitos de flambagem local e de flambagem lateral, e chega-se à mesma conclusão apontada pela NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 47) e apresentada na equação 3:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad \text{(EQUAÇÃO 3)}$$

Onde:

M_{Sd} = momento fletor solicitante de cálculo;

M_{Rd} = momento fletor resistente de cálculo.

O momento fletor resistente de cálculo deve ser determinado para o caso de flambagem lateral com torção (FLT), de flambagem local da mesa (FLM) e de flambagem local da alma (FLA), sendo seu valor o menor encontrado nesses casos. Além disso, o

momento fletor resistente de cálculo depende da esbeltez do perfil, devendo ser calculado diferentemente em função de seu valor (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 47).

Nos itens seguintes, serão apresentadas as equações para a determinação do momento fletor resistente de cálculo. Cabe ressaltar que os valores das variáveis λ_p , λ_r , e M_{cr} serão indicados posteriormente no quadro 1.

O quadro 1 define os valores do momento fletor de plastificação, do momento fletor correspondente ao início do escoamento, da esbeltez da seção e dos parâmetros de esbeltez correspondentes à plastificação e ao início do escoamento. Tais quais, são as notas referentes ao quadro e usadas no dimensionamento apresentadas em seguida.

Tipo de seção e eixo de flexão	Estados-limites aplicáveis	M_r	M_{cr}	λ	λ_p	λ_r
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitas a momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 1	$\frac{L_b}{r_y}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 1
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	$\frac{b}{t}$ Ver Nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com apenas um eixo de simetria situado no plano médio da alma, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia (ver Nota 9)	FLT	$(f_y - \sigma_r)W_c$ $\leq f_y W_t$ Ver Nota 5	Ver Nota 2	$\frac{L_b}{r_{yc}}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 2
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W_c$ Ver Nota 5	Ver Nota 6	$\frac{b}{t}$ Ver Nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo H)	$\frac{h_c}{t_w}$	$\frac{\frac{h_c}{h_y} \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0,54 \frac{M_{pl}}{M_r} - 0,09\right)^2} \leq \lambda_r$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia	FLM Ver Nota 3	$(f_y - \sigma_r)W$	Ver Nota 6	$\frac{b}{t}$ Ver Nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver Nota 6
	FLA Ver Nota 3	$f_y W_{ef}$ Ver Nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver Nota 4	$\frac{h}{t_w}$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$f_y W$	$\frac{2,00 C_b E}{\lambda} \sqrt{J A}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pl}} \sqrt{J A}$	$\frac{2,00 E}{M_r} \sqrt{J A}$
Seções-caixão e tubulares retangulares, duplamente simétricas, fletidas em relação a um dos eixos de simetria que seja paralelo a dois lados	FLT Ver Nota 7	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver Nota 5	$\frac{2,00 C_b E}{\lambda} \sqrt{J A}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pl}} \sqrt{J A}$	$\frac{2,00 E}{M_r} \sqrt{J A}$
	FLM	$f_y W_{ef}$ Ver Nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver Nota 4	$\frac{b}{t}$ Ver Nota 8	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	FLA	$f_y W$	-	$\frac{h}{t_w}$	Ver Nota 10	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Quadro 1: parâmetros referentes ao momento fletor resistente (ABNT, 2008, p. 134).

2.4 VERIFICAÇÃO DO CISALHAMENTO

A Aço Minas Gerais S/A (1989, p. 71) afirma que “O cisalhamento ocorre quando há um desligamento das porções adjacentes do material de uma barra [...] [e] é resistido essencialmente pela área vertical da seção transversal da viga [...]”. Para o dimensionamento desse esforço, utilizando a NBR 8800, deve ser atendida a equação 4 (ABNT, 2008, p. 47):

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (\text{EQUAÇÃO 4})$$

Onde:

V_{Sd} = força cortante solicitante de cálculo;

V_{Rd} = força cortante resistente de cálculo.

O cálculo da força cortante resistente de cálculo segundo a NBR 8800: 2008 distingue-se entre perfis de seção tubular circular e os demais. Desta maneira, as próximas seções apresentam as equações, que abrangem o dimensionamento de cada um desses casos, respectivamente.

2.4.1 Seções I, H, U e T fletidas em relação ao eixo perpendicular à alma e seções tubulares, retangulares e caixão

A determinação da força cortante de cálculo para seção qualquer, exceto a tubular circular, é dada por (ABNT, 2008, p. 50-51):

$$V_{Rd} = \frac{V_{p\ell}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \quad (\text{EQUAÇÃO 5})$$

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p V_{p\ell}}{\lambda \gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (\text{EQUAÇÃO 6})$$

$$V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{p\ell}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (\text{EQUAÇÃO 7})$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (\text{EQUAÇÃO 8})$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{EQUAÇÃO 9})$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{EQUAÇÃO 10})$$

Onde:

V_{pl} = força cortante correspondente a plastificação da alma por cisalhamento;

γ_{a1} = coeficiente de ponderação relacionado a escoamento, flambagem e instabilidade;

E = módulo de elasticidade do aço;

f_y = resistência ao escoamento do aço;

λ = parâmetro de esbeltez da seção transversal;

λ_p = parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;

λ_r = parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;

h = altura da alma;

t_w = espessura da alma;

2.5 VERIFICAÇÃO DOS ESFORÇOS COMBINADOS

Conforme descrito no item 5.5.1.2 da ABNT NBR 8800:2008, para a atuação simultânea da força axial de tração ou de compressão e de momentos fletores, deve ser obedecida a limitação fornecida pelas seguintes expressões de interação:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2 \quad (\text{EQUAÇÃO 11})$$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{Sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0 \quad (\text{EQUAÇÃO 12})$$

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{Sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0 \quad (\text{EQUAÇÃO 13})$$

3 MATERIAL E MÉTODOS

Primeiramente, implementou-se as verificações das estruturas metálicas, para o dimensionamento, seguindo a NBR 8800:2008. Tal qual, realizou-se uma pesquisa bibliográfica com a utilização do Pfeil, Pfeil, 2009, a apostila de galpões do CBCA 2015 e a apostila Aço Minas, 1989, acerca dos procedimentos para o dimensionamento dos pilares metálicos.

Consequente elaborou-se algoritmos computacionais, capazes de realizar os procedimentos de dimensionamento dos referidos elementos estruturais metálicos. Implementou-se os códigos computacionais em linguagem *Python*, com a utilização da *IDE Vs Code*, adjuntos ao sistema de banco de dados, tal qual, possui uma base de perfis a serem escolhidos pelo programa principal.

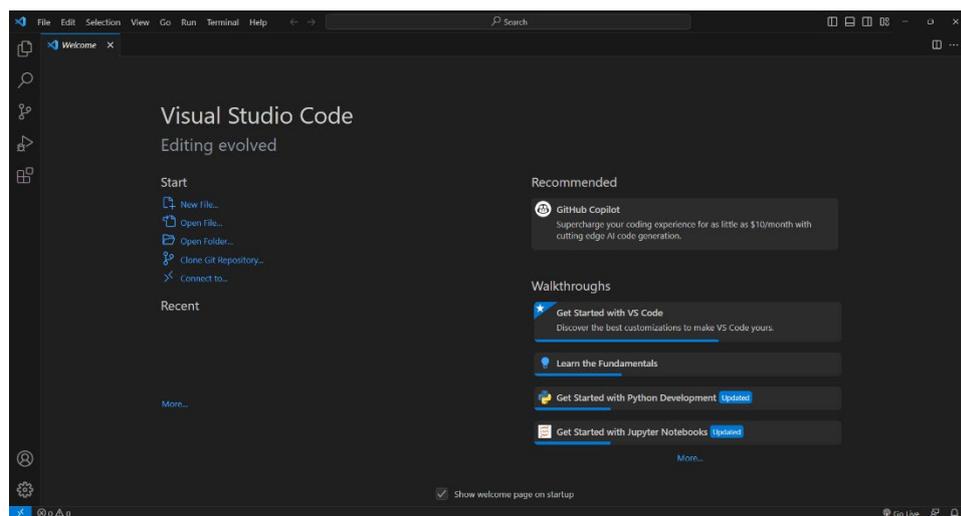


Figura 2. IDE do VS CODE

Fonte: Microsoft

A Implementação dos códigos computacionais em linguagem Python, teve como primeira etapa a programação back-end. Nesta etapa, listou-se todas as variáveis necessárias para o dimensionamento dos elementos estruturais em aço, retirada da NBR 8800:2008. Após listadas as variáveis, programou-se as funções com indentações para percorrer a base de perfis, criada em um banco de dados interno em um arquivo xls.

Após a listagem e a criação das variáveis, criou-se as condições segundo a norma brasileira, para verificar mecanicamente os perfis metálicos.

Na segunda etapa da implementação, teve-se a programação *front-end* (ambiente de interface gráfica), para esta última utilizou-se a ferramenta *PySimpleGUI*. A fim, de proporcionar ao usuário mais conforto visual e familiaridade com os softwares presentes no mercado, haja vista, que a linguagem *Python* é amplamente utilizada atualmente e está presente nos sistemas operacionais usados rotineiramente.

Com o intuito de melhorar a experiência do usuário do software computacional, o sistema de banco de dados interno, é um arquivo *xls*, atualizado com base nos dados da GERDAU e Aço Minas, criado utilizando o *software Excel*. Com banco próprio e possibilidade de atualização desses dados, conforme a demanda do mercado. Ressalta-se, que tal atualização deve ser feita diretamente no arquivo *xls*, para que desta forma os dados sejam lidos e interpretados em tempo real e interpretados pelo software.

Para a utilização do software criou-se um arquivo executável, uma pasta contendo as imagens utilizadas pela biblioteca *PySimpleGUI* e o arquivo *xls* com a base de perfis, faz-se necessário que o usuário tenha as informações prévias do tipo de perfil que deseja utilizar, das solicitações de projeto e características de alma, furos nas peças e detalhamento prévio de projeto.

Por fim, com todas as informações prévias anotadas, o usuário poderá executar a ferramenta computacional. Salienta-se, que para uma boa execução, o arquivo *exe* deverá estar na mesma pasta que a tabela de perfis (banco de dados) e as imagens utilizadas pela ferramenta *PySimpleGUI*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Será apresentada nesta etapa a interface da ferramenta computacional desenvolvida neste projeto.



Figura 3. Tela inicial do Programa Computacional

Fonte: Autor

Na figura 3 apresentada acima, têm-se a tela de ambientação inicial, com as opções de iniciar a verificação ou fechar o software, além das informações do orientado e o orientador.

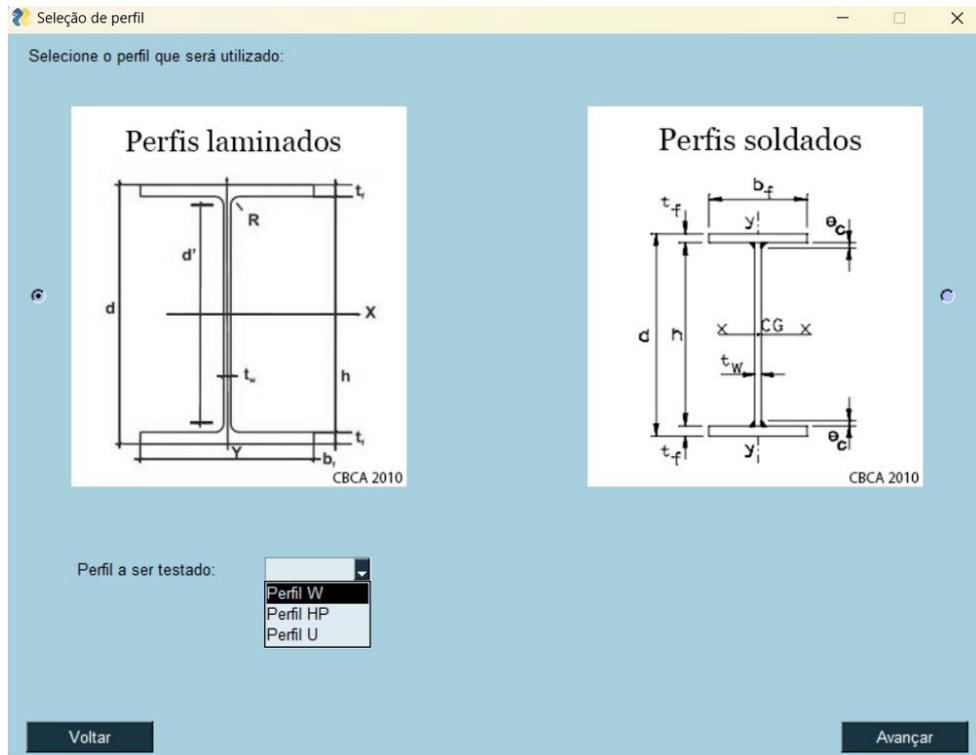
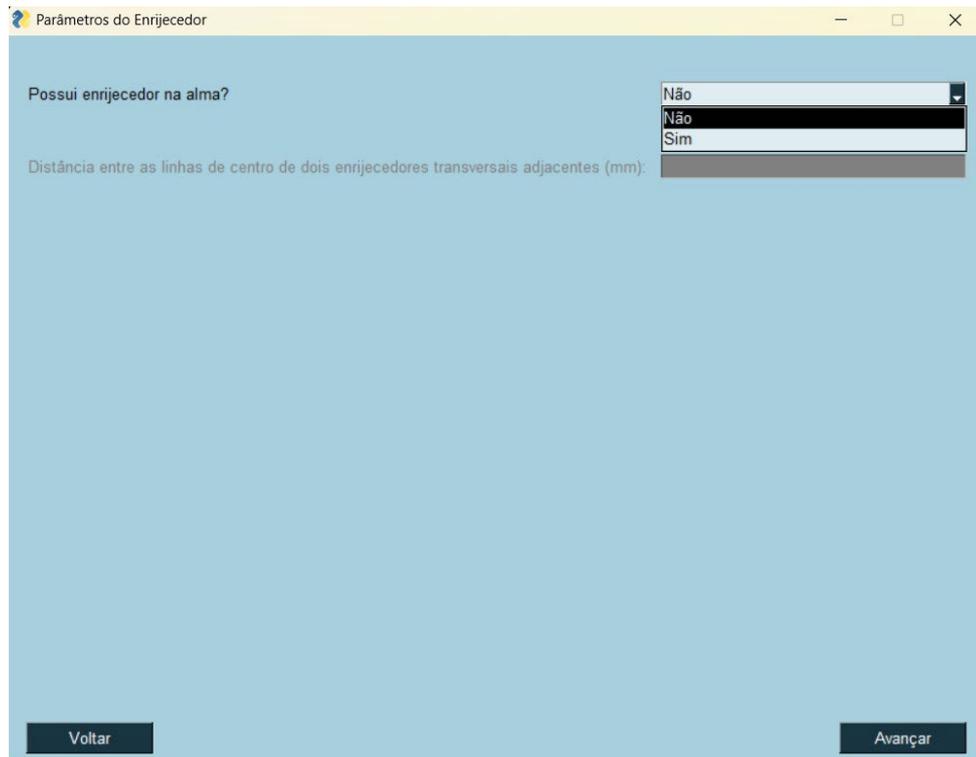


Figura 4. Seleção do Tipo de Perfil
Fonte: Autor

Na figura 4 acima, o usuário deverá selecionar se o perfil que deseja verificar no banco de dados embutido no software, é do tipo laminado ou soldado, e a característica geométrica que deseja testar, do tipo W, HP ou U. Ao clicar em avançar, as informações selecionadas serão salvas temporariamente, caso o usuário queira voltar e editar alguma etapa.



Parâmetros do Enrijecedor

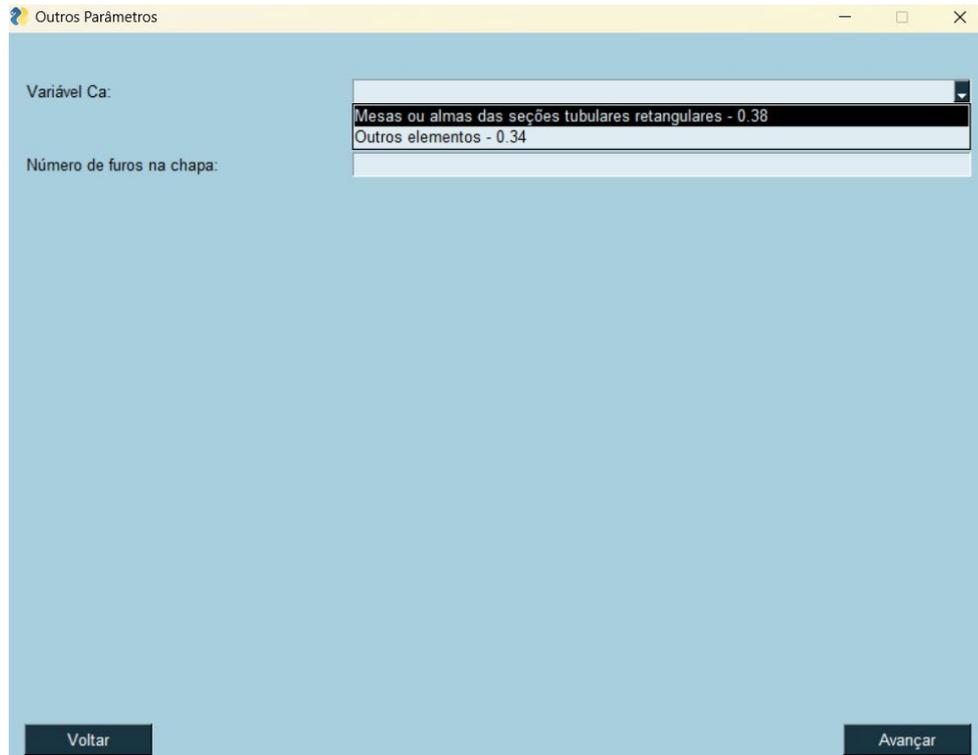
Possui enrijecedor na alma? Não

Distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores transversais adjacentes (mm):

Voltar Avançar

Figura 5. Parâmetros do Enrijecedor
Fonte: Autor

Consequente, deve-se selecionar se o perfil em específico possui algum enrijecedor na alma, caso possua, o usuário deve informar a distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores transversais adjacentes em milímetros. Vale ressaltar, que enrijecedores são utilizados em estruturas metálicas com o intuito de atenuar a instabilidade gerada por alguma solicitação (Figura 5).



Outros Parâmetros

Variável Ca:

Mesas ou almas das seções tubulares retangulares - 0.38
Outros elementos - 0.34

Número de furos na chapa:

Voltar Avançar

Figura 6. Coeficiente C_a
Fonte: Autor

Como mostrado na figura 6, deverá ser preenchido se as mesas ou almas são retangulares, ou apresentam outra forma, para que o Coeficiente C_a seja escolhido. Faz-se necessário que o usuário coloque o número de furos que existe na chapa para que a verificação prossiga.

Parâmetros de Flambagem

Comprimento da peça (mm):

Distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (mm):

Número de vãos levando-se em consideração o travamento em x:

Número de vãos levando-se em consideração o travamento em y:

Número de vãos levando-se em consideração o travamento em z (à torção):

Coeficiente de flambagem de barras comprimidas em x:

Coeficiente de flambagem de barras comprimidas em y:

Coeficiente de flambagem de barras submetidas à torção em z:

-> 1.0 - Quando ambas as extremidades da barra possuírem rotação em torno do eixo longitudinal impedida e empenamento livre.

-> 2.0 - Quando uma das extremidades da barra possuir rotação em torno do eixo longitudinal e empenamentos livres.
Outra barra, rotação e empenamento impedidos.

-> 3.0 - Ver NBR00.

Figura 7. Parâmetros de Flambagem
Fonte: Autor

Posterior ao coeficiente C_a , têm-se a inserção dos parâmetros de Flambagem na qual o perfil será sujeito. Desde o comprimento da peça em milímetros, a distância lateral entre duas seções contidas a flambagem lateral com torção em milímetros, o número de vão levando-se em consideração o travamento em x, y e z (torção), o coeficiente de flambagem de barras comprimidas em x, y e z (deve-se seguir as especificações da NBR 8800, como mostrado na Figura 7 acima).

Definição de valores

Força axial solicitante de compressão (N):

Força cortante solicitante (N):

Momento fletor solicitação de cálculo em X (N.mm):

Momento fletor solicitação de cálculo em Y (N.mm):

Momento fletor máximo solicitante de cálculo, em módulo, no comprimento destravado (N.mm):

Valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda (N.mm):

Valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção central do comprimento destravado (N.mm):

Valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda (N.mm):

Figura 8. Definição dos Valores das Solicitações
Fonte: Autor

Ulterior o usuário deverá preencher os valores das solicitações do seu projeto, desde a força axial solicitante de compressão em Newtons, a força cortante solicitante em Newtons, o momento fletor de solicitação de cálculo em x e y em Newtons x milímetros, o momento fletor máximo solicitante de cálculo em módulo no comprimento destravado em Newtons x milímetros, o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda, em Newtons x milímetros, o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção central do comprimento destravado, em Newtons x milímetros, o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda, em Newtons x milímetros. Como mostrado acima na Figura 8.

Resultados

Perfis reprovados:

- Perfil 1: W 150 x 13,0, Massa = 13 kg/m
- Perfil 2: W 200 x 15,0, Massa = 15,2 kg/m
- Perfil 3: W 250 x 17,9, Massa = 18,1 kg/m
- Perfil 4: W 150 x 18,4, Massa = 18,4 kg/m
- Perfil 5: W 200 x 19,3, Massa = 19,7 kg/m

Clique no perfil acima para acessar o relatório de cálculo

Perfis aprovados:

- Perfil 7: W 150 x 22,5, Massa = 22,5 kg/m
- Perfil 12: W 200 x 26,6, Massa = 26,9 kg/m
- Perfil 15: W 150 x 29,8, Massa = 29,8 kg/m
- Perfil 16: W 200 x 31,3, Massa = 31,7 kg/m

Clique no perfil acima para acessar o relatório de cálculo

Perfil com menor massa aprovado: Perfil 7: W 150 x 22,5 Massa do perfil: **22,5 kg/m**

Perfil 7: W 150 x 22,5, Massa = 22,5 kg/m

Massa = 22,5 kg/m

VERIFICACAO DA ESBELTEZ DA COLUNA SE < 200

Ag = 29
d = 152
bf = 152
tw = 5,8
tf = 6,6
hw = 139
d' = 119
lx = 1229
Wx = 162
Rx = 6,51
Zx = 180
ly = 387
Wy = 51

L ef x (mm):
6127,799999999999
L ef y (mm):
6127,799999999999
L ef z (mm):
8754,0

Esbeltez em X - lambdaX:
94,12903225806451
Esbeltez em Y - lambdaY:
167,88493150684928
Perfil passa quanto a esbeltez ?
Passa

Legenda - variáveis dos perfis:

d -> Altura total da seção transversal	Ag -> Área bruta da seção transversal da barra	ry -> Raio de giração em torno do eixo Y
hw -> Altura da alma. Altura total menos duas vezes a espessura da mesa e duas vezes o raio de curvatura	J -> Momento polar da inércia	Zx -> Módulo de resistência do plástico - Eixo de maior inércia
tw -> Espessura da alma	lx -> Momento de inércia da seção em relação ao eixo X	Zy -> Módulo de resistência do plástico - Eixo de menor inércia
tf -> Espessura da mesa	ly -> Momento de inércia da seção em relação ao eixo Y	Wx -> Módulo de elasticidade elástico em torno de X
bf -> Largura da mesa	rx -> Raio de giração em torno do eixo X	Wy -> Módulo de elasticidade elástico em torno de Y

Fechar

Figura 9. Resultados

Fonte: Autor

Por fim, como mostrado acima na Figura 9, após a inserção dos dados solicitados ao longo do programa computacional, têm-se o resultado, com os perfis aprovados para os parâmetros inseridos e os reprovados. Vale ressaltar, que este para esta tela final apresentada acima, utilizamos um exemplo hipotético para que ficasse ilustrado o método escolhido. Como pode-se perceber, ao lado direito o software apresenta o perfil com a menor massa dentre os aprovados, e a massa deste perfil. Este parâmetro está sob destaque, pois segundo as tabelas de mercado da GERDAU, perfis com menores massas apresentam valores de mercado menores, em relação aos de maior massa. O software sempre apresentará a opção mais eficiente, no que se refere ao seu peso e no quesito monetário.

Ainda sobre os parâmetros apresentados deste layout, o usuário pode clicar sobre qualquer perfil aprovado ou reprovado e ter acesso ao seu memorial de cálculo e as suas variáveis geométricas, cuja legenda na parte inferior auxilia na interpretação dos dados.

4 CONCLUSÃO

Destaca-se como importante a revisão bibliográfica realizada neste projeto, no que se refere a NBR 8800: 2008, pois, foi um fator essencial para o desenvolvimento do algoritmo em linguagem *Python*, para a verificação de flexão, compressão, cisalhamento e corte em pilares em estruturas de aço.

Em relação a otimização da ferramenta computacional com a criação do banco de dados, contendo as características geométricas dos perfis, obteve-se ótimos resultados em seu manuseio, haja vista, que o usuário do software tem a sua disposição uma tabela de perfis metálicos atualizada da GERDAU e Aço Minas, com os parâmetros exigidos do mercado, sem a necessidade de verificação externa. Demonstrando assim, maior confiabilidade nos resultados obtidos durante o dimensionamento, minimizando os erros provenientes de uma base de perfis não atualizada ou verificada no mercado.

Em seguida, o programa computacional disponibiliza, a partir de seu banco de dados interno de perfis metálicos, a solução com a menor massa linear. Sendo assim, segundo as referências apresentadas, destaca-se o perfil mais eficiente, no que diz respeito, ao seu valor monetário, e na execução da obra. Cumpre-se, portanto, o papel de otimização do dimensionamento, reduzindo os custos aquisitivos com a escolha do perfil mais eficiente.

Dessa forma, conclui-se que os objetivos desse trabalho foram atingidos, haja vista, que a ferramenta computacional com o banco de dados, demonstrou as otimizações esperadas, no que se refere ao fator monetário e eficiência. De modo, que a ferramenta computacional estará à disposição do mercado com o seu valor atrativo e de fácil acesso.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇO MINAS GERAIS S/A. Divisão de Desenvolvimento e Promoção de Produtos. **Princípios de projeto de estruturas em aço**. Belo Horizonte: Graphilivro, 1989.

ALBUQUERQUE, A. T.; PINHEIRO, L. M. **Viabilidade econômica de alternativas estruturais de concreto armado para edifícios**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, n. 19, p. 1-19, 2002.

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

BELLEI, I.H; PINHO F.O E PINHO M.O. **Edifícios de múltiplos andares em aço**. 2ª.ed. São Paulo: Ed.PINI, 2008.

CBCA – CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. **A Evolução da Construção em Aço no Brasil**. 2015. Disponível em: < <https://www.cbcaacobrasil.org.br/site/noticias-detalhes.php?cod=7074> > Acesso em: Set. 2023.

SALMON, C. G.; JOHN EDWIN JOHNSON. **Steel Structures**. [s.l.] HarperCollins Publishers, 2010.

MCKINNEY, W. **Python para análise de dados: Tratamento de dados com Pandas, NumPy e IPython**. [s.l.] Novatec Editora, [s.d.]. 2018.

NOVELLI, L. et al. **FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA O DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS TUBULARES TRELIÇADAS**. (N. Dumont, Ed.) XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. **Anais...**Rio de Janeiro: ABMEC, 22 nov. 2015.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

RODRIGUES, F. C. **Steel Framing**: Engenharia. Rio de Janeiro IBS/CBCA, 1ª ed. 2006.

APÊNDICES

APÊNDICE A — Validação da Ferramenta Computacional

Para a validação desta ferramenta computacional verificou-se o perfil W 150 x 22,5 do tipo laminado seguindo a recomendação da NBR 8800: 2008 para o dimensionamento de elementos estruturais de aço, com as seguintes especificações geométricas, solicitações de cálculo e características específicas, exibidas no Exemplo 1:

Segue o Exemplo 1, perfil W 150 x 22,5 do tipo laminado, com sua esbeltez em x de 92,16, e sua esbeltez em y de 164,38, como determinada pela norma deve ser inferior a 200, logo, está dentro das condições mínimas, com enrijecedor na alma e contendo os seguintes parâmetros:

$$E = 200.000 \text{ MPa}$$

$$G = 77.000 \text{ MPa}$$

$$f_y = 250 \text{ MPa}$$

$$C_a = 0.34$$

$$N_{furos} = 0$$

$$\gamma_{a1} = 1.1$$

$$L = 6000 \text{ mm}$$

$$L_b = 6000 \text{ mm}$$

$$n_x = 1.0$$

$$n_y = 2.0$$

$$n_z = 1.$$

$$k_x = 1.$$

$$k_y = 0.5$$

$$k_z = 1.0$$

$$A_g = 2900 \text{ mm}^2$$

$$I_x = 1229 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

$$I_y = 387 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

$$J = 4.8 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

$$r_x = 65.1 \text{ mm}$$

$$r_y = 36.5 \text{ mm}$$

$$x_0 = 0.0 \text{ mm}$$

$$y_0 = 0.0 \text{ mm}$$

$$Z_x = 179600 \text{ mm}^3$$

$$Z_y = 77900 \text{ mm}^4$$

$$W_x = 161700 \text{ mm}^4$$

$$W_y = 50900 \text{ mm}^4$$

$$R_m = 1.0 \text{ mm}^4$$

$$d = 152 \text{ mm}$$

$$h_w = 118.9 \text{ mm}$$

$$t_w = 5.8 \text{ mm}$$

$$t_f = 6.6 \text{ mm}$$

$$b_f = 152 \text{ mm}$$

$$N_{csd} = 125000 \text{ N}$$

$$V_{sd} = 75000 \text{ N}$$

$$M_{sdx} = 411000123 \text{ Nmm}$$

$$M_{sdy} = 0$$

$$M_{maxX} = 411000123 \text{ Nmm}$$

$$M_{aX} = 30.000.000 \text{ Nmm}$$

$$M_{bX} = 350.000.000 \text{ Nmm}$$

$$M_{cX} = 300.000.000 \text{ Nmm}$$

Primeiramente seguindo faz-se a verificação da flexo-compressão segundo o eixo x, para perfis simétricos, logo,

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{EQUAÇÃO 14})$$

$$\frac{118,9}{5,8} \leq 1,49 \sqrt{\frac{200000}{250}} \quad (\text{EQUAÇÃO 14})$$

Logo, como $20,5 \leq 41.143$ satisfaz, portanto, usa-se $Q_a = 1,0$.

Consequente, leva-se em consideração o tipo de perfil. Por se tratar de um perfil laminado, segue-se com a verificação da esbeltez da mesa:

$$\frac{b_f}{t_f} \leq 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{EQUAÇÃO 15})$$

$$\frac{152}{6,6} \leq 0,56 \sqrt{\frac{200000}{250}} \quad (\text{EQUAÇÃO 15})$$

Logo, como $23,030 \leq 15,83$, por isso, $Q_s < 1,0$. Seguindo, deseja-se encontrar o valor de Q_s , então,

$$\frac{b_f}{t_f} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{EQUAÇÃO 16})$$

$$\frac{152}{6,6} \leq 1,03 \sqrt{\frac{200000}{250}} \quad (\text{EQUAÇÃO 16})$$

Portanto, como $23,030 \leq 29,132$ se satisfaz, então,

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (\text{EQUAÇÃO 17})$$

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{76}{6,6} \sqrt{\frac{250}{200000}} \quad (\text{EQUAÇÃO 17})$$

Porquanto, $Q_s = 1,113$, segue o dimensionamento,

$$Q = Q_s \times Q_a \quad (\text{EQUAÇÃO 18})$$

$$Q = 1,113 \times 1,0 = 1,113 \quad (\text{EQUAÇÃO 18})$$

Agora deve-se determinar a carga de flambagem elástica, escolhendo o menor valor em x, y ou z, logo,

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad (\text{EQUAÇÃO 19})$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad (\text{EQUAÇÃO 20})$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_o^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + G I_t \right] \quad (\text{EQUAÇÃO 21})$$

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 1229 \times 10^4}{(1 \times 6000)^2} = 673874,65 \quad (\text{EQUAÇÃO 19})$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 387 \times 10^4}{(0,5 \times 1500)^2} = 13580575,66 \text{ N} \quad (\text{EQUAÇÃO 20})$$

$$N_{ez} = \frac{1}{7,463^2} \left[\frac{\pi^2 \times 200000 \times 20454072300}{(1,0 \times 6000)^2} + 77000 \times 4,75 \right] = 2015910,73 \text{ N} \quad (\text{EQUAÇÃO 21})$$

Logo, a menor força axial de flambagem é $N_{ex} = 673874,65 \text{ N}$, portanto $N_e = N_{ex}$.
Agora, seguindo a NBR 8800: 2008 deve-se calcular o esforço resistente a compressão.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (\text{EQUAÇÃO 22})$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{1,113 \times 2900 \times 250}{673874,65}} = 1,094 \quad (\text{EQUAÇÃO 22})$$

Como λ_0 é menor que 1,5, então,

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (\text{EQUAÇÃO 23})$$

$$\chi = 0,658^{1,094^2} = 0,605 \quad (\text{EQUAÇÃO 23})$$

Então, será realizado o cálculo da carga resistente a compressão:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (\text{EQUAÇÃO 24})$$

$$N_{c,Rd} = \frac{0,605 \times 1,113 \times 2900 \times 250}{1,1} = 444548,020 \text{ N} \quad (\text{EQUAÇÃO 24})$$

Após a determinação da carga resistente a compressão, será realizada a verificação a flexão, portanto:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad (\text{EQUAÇÃO 25})$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{EQUAÇÃO 26})$$

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W}{E \cdot J} \quad (\text{EQUAÇÃO 27})$$

$$C_w = \frac{I_y (d - t_f)^2}{4} \quad (\text{EQUAÇÃO 28})$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (\text{EQUAÇÃO 29})$$

Substituindo os valores apresentados nas respectivas equações, têm-se:

$$\lambda = \frac{6000}{36,5} = 164,380 \quad (\text{EQUAÇÃO 25})$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{200000}{250}} = 49,780 \quad (\text{EQUAÇÃO 26})$$

$$\beta_1 = \frac{(250-75)x161700}{200000x4,8x10^4} = 2,947x10^{-3} \quad (\text{EQUAÇÃO 27})$$

$$C_w = \frac{387x10^4(152-6,6)^2}{4} = 2,045x10^{10} \quad (\text{EQUAÇÃO 28})$$

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{387x10^4x4,8x10^4}}{36,5x4,8x10^4x2,947x10^{-3}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27x2,045x10^{10}x(2,947x10^{-3})^2}{387x10^4}}} = 181,978 \quad (\text{EQUAÇÃO 29})$$

Consequente, deve-se verificar-se, se $\lambda > \lambda_r$, como não satisfaz, logo, verificaremos se $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$, esta última inequação se satisfaz, então prosseguiremos com a verificação da flambagem lateral com torção, da seguinte forma:

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{EQUAÇÃO 30})$$

$$M_{Rd} = \frac{1,215}{1,1} \left[44900000 - (44900000 - 28297500) \frac{164,380 - 49,780}{181,978 - 49,780} \right] \leq \frac{44900000}{1,1} \quad (\text{EQUAÇÃO 30})$$

Resolvendo a equação 17, têm-se, que $M_{Rd} = 33697030,87 \text{ Nmm} \leq 40818181,82$ (verificação está correta). Prossegue-se par a verificação de flambagem local da mesa comprimida. Com as seguintes verificações:

$$\lambda = \frac{b}{t} \quad (\text{EQUAÇÃO 31})$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{EQUAÇÃO 32})$$

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}} \quad (\text{EQUAÇÃO 33})$$

$$\lambda = \frac{76}{6,6} = 11,515 \quad (\text{EQUAÇÃO 31})$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{200000}{250}} = 10,748 \quad (\text{EQUAÇÃO 32})$$

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{200000}{(250-75)}} = 28,059 \quad (\text{EQUAÇÃO 33})$$

Como λ não é maior que λ_r , e λ_p é o menor parâmetro entre os 3 apresentados acima, segue-se com as seguintes verificações:

$$M_{Rd} = \frac{c_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{EQUAÇÃO 34})$$

Então, substituindo os respectivos valores, têm-se:

$$M_{Rd} = \frac{1,215}{1,1} \left[44900000 - (44900000 - 28297500) \frac{11,515 - 10,748}{28,059 - 10,748} \right] \leq \frac{44900000}{1,1} \quad (\text{EQUAÇÃO 34})$$

Logo, $M_{Rd} = 40.818.181,8181$ Nmm, que por sua vez é menor ou igual que $\frac{44900000}{1,1}$, logo a verificação foi satisfeita.

Ulterior será feita a verificação da flambagem local da alma, analisando os mesmos parâmetros acima, portanto:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (\text{EQUAÇÃO 35})$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{EQUAÇÃO 36})$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{EQUAÇÃO 37})$$

Substituindo os valores têm-se que:

$$\lambda = \frac{118,9}{5,8} = 20,5 \quad (\text{EQUAÇÃO 35})$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{200000}{250}} = 106,348 \quad (\text{EQUAÇÃO 36})$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{200000}{250}} = 161,220 \quad (\text{EQUAÇÃO 37})$$

Como λ não é maior que λ_r , e λ_p é maior que λ , então, segue-se com as seguintes verificações:

$$M_{pl} = Z \cdot f_y \quad (\text{EQUAÇÃO 38})$$

Substituindo os valores, têm-se:

$$M_{pl} = 17600 \times 250 = 44900000 \text{ Nmm} \quad (\text{EQUAÇÃO 38})$$

Logo, o momento resistente será:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (\text{EQUAÇÃO 39})$$

$$M_{Rd} = \frac{44900000}{1,1} = 40.818.181,82 \text{ Nmm} \quad (\text{EQUAÇÃO 39})$$

Por fim, nesta etapa da verificação, encontraremos o menor valor de M_{Rd} , logo, como calculado acima: $M_{Rd} = 33.703.804,711 \text{ Nmm}$.

Para o perfil ser aprovado quanto em relação a flexão em X, segundo a NBR 8800:2008, o momento fletor de solicitação em X, deve ser menor do que o momento fletor resistente, logo, como $M_{Rd} = 33.703.804,711 \text{ Nmm}$ e $M_{sdX} = 411.000.123 \text{ Nmm}$, então o perfil W 150 x 22,5 foi reprovado na verificação da flexão em X.

Dando prosseguimento, o perfil W 150 x 22,5 será verificado quanto ao cisalhamento, ressalta-se que neste exemplo o perfil em análise, possui enrijecedor na alma, então, segundo a NBR 8800:2008, serão calculados os seguintes parâmetros e verificações:

$$\frac{a}{h} \quad (\text{EQUAÇÃO 40})$$

Substituindo os valores, têm-se:

$$\frac{1500}{118,9} = 12,615 \quad (\text{EQUAÇÃO 40})$$

Como a relação $\frac{a}{h} > 3$, então adota-se segundo a NBR 8800: 2008, $k_v = 5$.

Conseqüente, será calculado o esforço resistente de cálculo ao cisalhamento (V_{Rd}), então:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (\text{EQUAÇÃO 41})$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v x E}{f_y}} \quad (\text{EQUAÇÃO 42})$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v x E}{f_y}} \quad (\text{EQUAÇÃO 43})$$

$$\lambda = \frac{118,9}{5,8} = 20,5 \quad (\text{EQUAÇÃO 41})$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v x E}{f_y}} = 69,570 \quad (\text{EQUAÇÃO 42})$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v x E}{f_y}} = 86,646 \quad (\text{EQUAÇÃO 43})$$

Sequente, verifica-se que $\lambda \leq \lambda_p$, logo segue o cálculo de V_{Rd} , da seguinte forma:

$$V_{Rd} = \frac{V_p \ell}{\gamma_{a1}} \quad (\text{EQUAÇÃO 44})$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 x 152 x 5,8 x 250}{1,1} = 120218,181 \text{ N} \quad (\text{EQUAÇÃO 44})$$

Segundo a NBR 8800: 2008, se $V_{Rd} \geq V_{Sd}$, então o perfil suporta o cisalhamento, nessas condições, como $V_{Sd}=75000 N$, a condição se satisfaz e o perfil W 150 x 22,5 passa na verificação quanto ao cisalhamento.

A última verificação a ser feita é para os esforços combinados, que segue as seguintes verificações:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2 \quad (\text{EQUAÇÃO 45})$$

$$\frac{125000}{444548,020} \geq 0,2 \text{ (condição foi satisfeita)} \quad (\text{EQUAÇÃO 45})$$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{Sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \quad (\text{EQUAÇÃO 46})$$

$$\frac{125000}{444548,020} + \frac{8}{9} \left(\frac{411000123}{33703804,711} + 0 \right) = 11,120 \quad (\text{EQUAÇÃO 46})$$

Segundo a NBR 8800: 2008, Caso o resultado da equação 34 for menor ou igual a 1, o perfil suporta os esforços combinados. Como o resultado foi 11,120, o perfil W 150 x 22,5, foi reprovado quanto a verificação dos esforços combinados.

Por fim, o perfil W 150 x 22,5 foi reprovado na solicitação geral, pois não foi aprovado na verificação do momento fletor em X e nem na verificação dos esforços combinados.

Ulterior a mesma verificação será feita utilizando o software, visando conseguir resultados próximos ao do exemplo seguindo a apostila de galpões CBCA 2010 e a NBR 8800: 2008.

1ª Inserção de dados, perfil laminado e do tipo W:

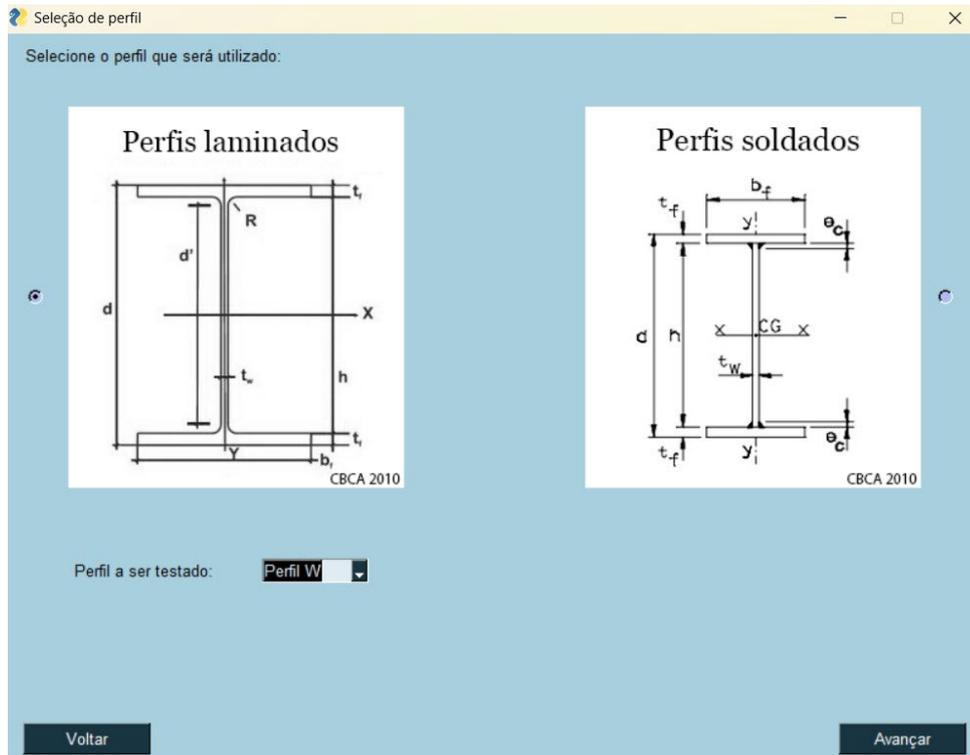


Figura 10. Seleção de Perfil
Fonte: Autor

2ª Inserção de dados, características do enrijecedor:

The image shows a software window titled "Parâmetros do Enrijecedor" with a light blue background. At the top, there is a yellow header bar with the title and standard window control icons (minimize, maximize, close). The main area contains two input fields: a dropdown menu for "Possui enrijecedor na alma?" with "Sim" selected, and a text input field for "Distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores transversais adjacentes (mm):" containing the value "1500.0". At the bottom, there are two dark blue buttons: "Voltar" on the left and "Avançar" on the right.

Figura 11. Parâmetros do Enrijecedor do Exemplo

Fonte: Autor.

3ª Inserção de dados, variável C_a e número de furos na chapa:

Outros Parâmetros

Variável Ca: Outros elementos - 0.34

Número de furos na chapa: 4

Voltar Avançar

Figura 12. Variável Ca e Furos na Chapa
Fonte: Autor

4ª Inserção de dados, variáveis L, Lb, nx, ny, nz, kx, ky e kz.

Parâmetros de Flambagem

Comprimento da peça (mm): 6000

Distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (mm): 6000

Número de vãos levando-se em consideração o travamento em x: 1

Número de vãos levando-se em consideração o travamento em y: 2

Número de vãos levando-se em consideração o travamento em z (à torção): 1

Coeficiente de flambagem de barras comprimidas em x: 1.0 - articulado-articulado ou engaste-deslize

Coeficiente de flambagem de barras comprimidas em y: 0.5 - engaste-engaste

Coeficiente de flambagem de barras submetidas à torção em z: 1.0

-> 1.0 - Quando ambas as extremidades da barra possuírem rotação em torno do eixo longitudinal impedida e empenamento livre.
-> 2.0 - Quando uma das extremidades da barra possuir rotação em torno do eixo longitudinal e empenamentos livres.
Outra barra, rotação e empenamento impedidos.
-> 3.0 - Ver NBR00.

Voltar Avançar

Figura 13. Parâmetros de Flambagem do Exemplo
Fonte: Autor

5ª Inserção de dados, variáveis Nsd, Vsd, Msdx, Msdy, Mmax, Max, Mbx e Mcx.

Figura 14. Solicitações do Exemplo

Fonte: Autor

Por fim, o resultado:

Figura 15. Resultado Exemplo

Fonte: autor

No resultado do software, mostrado no apêndice A, pode-se observar que o perfil W 150 x 22,5 foi reprovado, assim como no exemplo calculado manualmente. O resumo do memorial de cálculo, mostra que ele não foi aprovado nas verificações de momento fletor em X e nas verificações dos esforços combinados, corroborando com o resultado obtido na verificação feita manualmente.

Ressalta-se que o software faz uma verificação mais otimizada, haja vista que ele verificou vários perfis do tipo W, e apresentou a melhor opção monetária e mais leve, que é o perfil W 150 x 37,1, que passou em todas as verificações propostas na NBR 8800: 2008.

Com esses resultados, têm-se um programa computacional funcional e otimizado.