

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS HAUBERT YOKOMIZO

**DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* PARA DIMENSIONAMENTO DA
ESTRUTURA DE UM GALPÃO E DE ELEMENTOS ISOLADOS EM AÇO**

APUCARANA

2021

MATHEUS HAUBERT YOKOMIZO

**DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* PARA DIMENSIONAMENTO DA
ESTRUTURA DE UM GALPÃO E DE ELEMENTOS ISOLADOS EM AÇO**

**Software Development for the Design of a Shed Structure
and Single Steel Elements**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Rodolfo Krul Tessari

APUCARANA

2021



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



FOLHA DE APROVAÇÃO

Desenvolvimento De *Software* Para Dimensionamento Da Estrutura De Um Galpão E De Elementos Isolados Em Aço

Por

Matheus Haubert Yokomizo

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 31 de março de 2021, às 18 horas, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, linha de pesquisa Estruturas Metálicas, do Curso Superior em Engenharia Civil da UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a banca examinadora considerou o trabalho aprovado.

Rodolfo Krul Tessari – ORIENTADOR

UTFPR – Câmpus Apucarana

Manoel Dênis Costa Ferreira - EXAMINADOR

UTFPR – Câmpus Apucarana

Luiz Antonio Farani de Souza - EXAMINADOR

UTFPR – Câmpus Apucarana

“A FOLHA DE APROVAÇÃO assinada eletronicamente encontra-se em arquivo digital na Coordenação do Curso”.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus por todas bençãos que me concedeu durante toda minha vida e por me dar a força e determinação necessária para superar todos os obstáculos que surgiram ao longo de minha graduação.

Agradeço aos meus pais que me proporcionaram uma educação de qualidade, o que possibilitou minha caminhada até a conclusão dessa etapa muito importante. Especialmente à minha mãe, Dulce Aline Haubert Yokomizo, a quem sou profundamente grato, pois sempre esteve ao meu lado em todas as dificuldades ocorridas, me dando apoio sempre que necessário, principalmente o apoio emocional para continuar seguindo em frente. Também agradeço ao meu irmão, Kenzo Haubert Yokomizo, que me escutou em meus momentos bons e ruins. Sem a minha família nada teria sido possível.

Também agradeço aos meus professores, que me ensinaram muito durante minha graduação, em especial ao Rodolfo Krul Tessari, que aceitou minha proposta de tema e me proporcionou uma orientação excelente, com muita paciência, respeito e atenção, durante todo o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus amigos sempre agradeço pela força quem me dão, em especial ao Gabriel Felipetto de Assiz, à Katriny Kauany Amaral dos Santos e ao Evandro Ceciliano Mazer, pelo apoio e conselhos, além de todos os momentos de descontração que me foram fundamentais.

E não posso deixar de agradecer à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que me acolheu e me fez grande parte do que sou hoje.

RESUMO

YOKOMIZO, Matheus Haubert. **Desenvolvimento De Software Para Dimensionamento Da Estrutura De Um Galpão E De Elementos Isolados Em Aço.** 2020. 95 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Apucarana, 2021.

A utilização de materiais siderúrgicos na construção civil ocorre desde a Revolução Industrial e possui vantagens quando comparada à de outros materiais para estruturas, como o peso reduzido dos elementos estruturais, homogeneidade do material e execução ágil e flexível. No entanto, observa-se uma grande complexidade em realizar o dimensionamento desse sistema estrutural ao passo que não se encontra uma grande variedade de *softwares* que realizem esse dimensionamento e apresentem os métodos executados de forma clara para utilização em sala de aula. Nesse sentido, o presente trabalho objetivou desenvolver um *software* capaz de dimensionar um galpão metálico e apresentar um memorial de cálculo detalhado para complementar o ensino acerca do assunto. A linguagem de programação utilizada para esse fim foi o *Visual Basic*, uma vez que permite o processamento de uma grande quantidade de dados por meio de uma interface gráfica amigável. O desenvolvimento do *software* seguiu as recomendações de normas para o dimensionamento de estruturas, em especial a NBR 8800:2008, dando enfoque à verificação dos Estados Limites Últimos dos elementos estruturais. Assim, os resultados obtidos pelo *software* foram comparados com os apresentados na literatura, onde observou-se um erro na comparação muito pequeno, o que pode ter sido originado devido a arredondamentos ou simplificações no processo de dimensionamento, o que não impactou significativamente na verificação geral de segurança dos elementos. Dessa forma constatou-se que o *software* desenvolvido pode ser utilizado satisfatoriamente para complementar os estudos relacionados ao dimensionamento de estruturas em aço.

Palavras-chave: Estruturas Metálicas. *Software* Educacional. Dimensionamento. Ensino.

ABSTRACT

Yokomizo, Matheus Haubert. **Software Development for the Design of a Shed Structure and Single Steel Elements**. 2020. 95 p. Undergraduate thesis in Civil Engineering – Federal Technological University of Paraná. Apucarana, 2021.

The use of steel in civil construction has occurred since the Industrial Revolution and has advantages when compared to other materials, such as the reduced weight of structural elements, homogeneity of the material and agile and flexible execution. However, there is a great complexity in the design of such structural system, and there is not a wide variety of software that perform this design and present the methods executed clearly for use in undergraduation courses. Thus, the present work aimed to develop a software capable of designing a steel shed and presenting a detailed calculation report to complement the learning of the subject. The programming language used for this purpose was *Visual Basic*, since it allows the processing of a large amount of data through a friendly graphical interface. The software development followed the recommendations of national standards for the design of structures, in particular NBR 8800:2008, focusing on the verification of Ultimate Limit States of the structural elements. The results obtained by the software were compared with those presented in the literature, where a very small error was observed, which may have originated due to rounding or simplifications in the manual calculation process, which did not significantly impact the general safety check of the elements. Thus, it was found that the developed software can be used satisfactorily to complement studies related to the design of steel structures.

Keywords: Metal structures. Educational Software. Design. Teaching.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Ponte de Croalbrookdale..... | 15 |
| Figura 2 – Detalhe do meio do vão dos arcos da ponte sobre o rio Paraíba do Sul.. | 16 |
| Figura 3 – Desenho esquemático dos elementos constituintes de um galpão com vigas de alma cheia. | 20 |
| Figura 4 – Diagrama de tensão-deformação típico de aços estruturais tratados a frio. | 26 |
| Figura 5 – Nomenclaturas utilizadas nas dimensões de um perfil I..... | 37 |
| Figura 6 – Exemplo do posicionamento dos momentos M_{max} , M_A , M_B e M_C | 39 |
| Figura 7 – Fluxograma das principais etapas do programa. | 48 |
| Figura 8 – Tela para preenchimento dos dados referentes à geometria da estrutura. | 49 |
| Figura 9 – Tela para preenchimento dos dados relativos à cobertura..... | 50 |
| Figura 10 – Tela de pré-dimensionamento..... | 51 |
| Figura 11 – Tela de catálogo de perfis..... | 52 |
| Figura 12 – Tela de (a) criação de um novo perfil; (b) edição de perfil. | 52 |
| Figura 13 – Tela do catálogo de tipos de aço..... | 53 |
| Figura 14 – Tela de (a) Criação de um novo tipo de aço; (b) Exclusão de um tipo de aço existente. | 53 |
| Figura 15 – Tela de combinação de ações. | 54 |
| Figura 16 – Tela de personalização de ações..... | 55 |
| Figura 17 – Tela de dimensionamento dos elementos estruturais. | 56 |
| Figura 18 – Tela de detalhamento e montagem das pranchas. | 57 |
| Figura 19 – Tela de simulações. | 58 |
| Figura 20 – Vista (a) Frontal; (b) Superior; (c) Lateral da estrutura dimensionada.... | 59 |
| Figura 21 – Desenho esquemático de (a) Carregamento atuante no pórtico; Diagrama de (b) esforços normais; (c) esforços cortantes; (d) momentos fletores, apresentados pelo manual..... | 60 |
| Figura 22 – Desenho esquemático de (a) Carregamento atuante no pórtico; Diagrama de (b) esforços normais; (c) esforços cortantes; (d) momentos fletores, apresentados pelo <i>software</i> | 61 |
| Figura 23 – Diagrama de momentos fletores utilizado para o cálculo de C_b pelo manual. | 64 |

| | |
|--|----|
| Figura 24 – Diagrama de momentos fletores utilizado para o cálculo de C_b pelo <i>software</i> | 65 |
| Figura 25 – Valores utilizados para a comparação da terça. | 66 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Valores de propriedades mecânicas do aço..... | 25 |
| Tabela 2 – Aços especificados por Normas Brasileiras para uso estrutural..... | 26 |
| Tabela 3 – Aços de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural..... | 27 |
| Tabela 4 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências γ_m | 30 |
| Tabela 5 – Valores dos coeficientes de ponderação em função do tipo de ação permanente direta. | 32 |
| Tabela 6 – Valores dos coeficientes de ponderação em função do tipo de ação variável..... | 32 |
| Tabela 7 – Valores dos fatores de combinação ψ_0 | 33 |
| Tabela 8 – Parâmetros referentes ao momento fletor resistente..... | 37 |
| Tabela 9 – Equações para determinação dos índices de esbeltez dos estados limites FLT e FLM..... | 41 |
| Tabela 10 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados..... | 44 |
| Tabela 11 – Valores de $(b/t)_{lim}$ | 45 |
| Tabela 12 – Comparação entre os esforços internos máximos no pórtico do manual e do <i>software</i> | 62 |
| Tabela 13 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes ao Estado-Limite FLA dos pilares. | 62 |
| Tabela 14 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes ao Estado-Limite FLM dos pilares..... | 62 |
| Tabela 15 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes ao Estado-Limite FLT dos pilares. | 62 |
| Tabela 16 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes à determinação da força cortante resistente dos pilares..... | 63 |
| Tabela 17 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes à determinação da força axial resistente dos pilares. | 63 |
| Tabela 18 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes ao Estado-Limite FLT das vigas. | 64 |
| Tabela 19 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes à determinação da força axial resistente das vigas. | 64 |
| Tabela 20 – Comparação dos valores utilizando $K = 1,0$ | 65 |

| | |
|---|----|
| Tabela 21 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes ao Estado-Limite FLA das terças. | 66 |
| Tabela 22 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes ao Estado-Limite FLM das terças..... | 67 |
| Tabela 23 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes ao Estado-Limite FLT das terças..... | 67 |
| Tabela 24 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes à determinação da força cortante resistente das terças. | 67 |
| Tabela 25 – Comparação dos valores referentes ao problema 6.5.7..... | 68 |
| Tabela 26 – Comparação dos valores referentes ao problema 6.5.9..... | 68 |
| Tabela 27 – Comparação dos valores referentes ao problema 5.8.1..... | 68 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| BASIC | <i>Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code</i> |
| CS | Coluna Soldada |
| CVS | Coluna-Viga Soldada |
| ELU | Estado Limite Último |
| ELS | Estado Limite de Serviço |
| FLA | Flambagem Local da Alma |
| FLM | Flambagem Local da Mesa |
| FLT | Flambagem Lateral com Torção |
| MRD | Método da Rigidez Direta |
| NBR | Norma Brasileira Regulamentadora |
| VS | Viga Soldada |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------|---|
| A | Área |
| a | Distância entre as linhas de dois enrijecedores adjacentes |
| a_r | Relação entre a área da alma e da mesa comprimida |
| b | Largura |
| b_f | Largura da mesa |
| C_b | Fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme |
| C_w | Constante de empenamento da seção transversal |
| \vec{d} | Vetor de deslocabilidade |
| d | Altura total da seção transversal |
| E | Módulo de elasticidade |
| \vec{f} | Vetor de forças |
| F_G | Valor característico das ações permanentes |
| F_Q | Valor característico das ações variáveis |
| f_u | Resistência à ruptura do aço |
| f_y | Resistência ao escoamento do aço |
| G | Módulo de elasticidade transversal |
| h | Altura |
| I | Momento de inércia |
| J | Constante de torção |
| $[k]$ | Matriz de rigidez |
| l | Comprimento |
| M | Momento fletor |
| M_{cr} | Momento fletor de flambagem elástica |
| M_{pl} | Momento fletor de plastificação da seção transversal |
| M_r | Momento fletor correspondente ao início do escoamento |
| N | Força axial |
| N_e | Força axial de flambagem elástica |
| Q | Fator de redução relacionado à resistência à compressão |
| r | Raio de giração |
| $[R]$ | Matriz de rotação |

| | |
|---------------|--|
| R_d | Resistência de cálculo |
| S_d | Solicitação de cálculo |
| t_f | Espessura da mesa |
| t_w | Espessura da alma |
| V | Força cortante |
| V_{pl} | Força cortante referente à plastificação do elemento por cisalhamento |
| W | Módulo de resistência elástico |
| W_c | Módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção, relativo ao eixo de flexão |
| W_{ef} | Módulo de resistência mínimo elástico |
| W_t | Módulo de resistência elástico do lado tracionado da seção, relativo ao eixo de flexão |
| Z | Módulo de resistência plástico |
| β_a | Coefficiente de dilatação térmica |
| ε | Deformação |
| γ | Coefficiente de ponderação da resistência ou das ações |
| θ | Ângulo |
| λ | Índice de esbeltez |
| λ_0 | Índice de esbeltez reduzido |
| λ_p | Parâmetro de esbeltez limite para seções compactas |
| λ_r | Parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas |
| ν_a | Coefficiente de Poisson |
| χ | Fator de redução relacionado à resistência à compressão |
| ψ | Fator de redução de ações |
| ρ_a | Massa específica |
| σ | Tensão normal |
| τ | Tensão de cisalhamento |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 HISTÓRICO | 15 |
| 1.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS | 16 |
| 1.3 JUSTIFICATIVA | 17 |
| 1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO..... | 18 |
| 1.4.1 Objetivo Geral | 18 |
| 1.4.2 Objetivos Específicos | 18 |
| 2 METODOLOGIA | 19 |
| 2.1 LIMITAÇÃO | 20 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 21 |
| 3.1 TRABALHOS REALIZADOS NA ÁREA | 21 |
| 3.2 ELEMENTOS DE ESTRUTURAS DE AÇO | 23 |
| 3.2.1 Terças | 23 |
| 3.2.2 Vigas de Cobertura | 23 |
| 3.2.3 Pilares | 24 |
| 3.2.4 Vigas de Tapamento | 24 |
| 3.2.5 Contraventamento no Plano da Cobertura | 24 |
| 3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO..... | 25 |
| 3.4 PERFIS USUAIS EM ESTRUTURAS DE AÇO..... | 27 |
| 3.4.1 Perfis Laminados..... | 27 |
| 3.4.2 Perfis Soldados | 27 |
| 3.5 DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS | 28 |
| 3.5.1 Estados Limites | 28 |
| 3.5.1.1 Estados Limites Últimos | 28 |
| 3.5.2 Combinação de Ações | 30 |
| 3.5.3 Determinação dos Esforços Solicitantes | 33 |
| 3.5.4 Determinação do Momento Fletor Resistente de Cálculo | 35 |
| 3.5.4.1 Vigas de alma não esbelta | 35 |
| 3.5.4.2 Vigas de alma esbelta | 40 |
| 3.5.5 Determinação da Força Cortante Resistente de Cálculo..... | 41 |
| 3.5.6 Determinação da Força Axial Resistente de Cálculo | 43 |
| 3.5.7 Verificação da segurança frente a esforços combinados | 47 |

| | |
|--|-----------|
| 4 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL | 48 |
| 4.1 VISÃO GERAL DO PROGRAMA | 48 |
| 4.2 INÍCIO DO PROGRAMA | 48 |
| 4.3 DADOS DA ESTRUTURA | 49 |
| 4.4 PRÉ-DIMENSIONAMENTO | 50 |
| 4.4.1 Banco de Dados de Perfis | 51 |
| 4.4.2 Banco de Dados dos Tipos de Aço | 52 |
| 4.5 COMBINAÇÃO DE AÇÕES | 53 |
| 4.6 DIMENSIONAMENTO | 55 |
| 4.7 GERAÇÃO DE MEMORIAL DE CÁLCULO | 56 |
| 4.8 DETALHAMENTO | 56 |
| 4.9 EXPORTAÇÃO | 57 |
| 4.10 SIMULAÇÃO | 58 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 59 |
| 6 CONCLUSÕES | 70 |
| 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 70 |
| REFERÊNCIAS | 71 |
| APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO GERADO PELO SOFTWARE | 74 |
| APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO DE SIMULAÇÃO | 89 |
| APÊNDICE C – EXEMPLO DE PRANCHA GERADA PELO SOFTWARE | 94 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRICO

O início da utilização de materiais siderúrgicos em escala industrial ocorreu em meados do século XIX, com o advento da Revolução Industrial na Inglaterra, França e Alemanha. Com isso foi possível a aplicação de ferro fundido nas estruturas da construção civil (CHAMBERLAIN; FICANHA; FABEANE, 2013; PFEIL; PFEIL, 2009).

A construção da primeira ponte em ferro fundido deu-se em 1779, chamada Ponte Coalbrookdale, na Inglaterra. Essa ponte atravessa o rio Severn com um arco com vão de 30 metros (CHAMBERLAIN; FICANHA; FABEANE, 2013; PFEIL; PFEIL, 2009). A Figura 1 apresenta a Ponte Coalbrookdale.

Figura 1 – Ponte de Croalbrookdale.



Fonte: Estória Da História (2013).

Já o Brasil teve a utilização do aço dada em duas épocas. Na primeira o Brasil não possuía siderúrgicas, o que implicava na importação de componentes metálicos em larga escala da Inglaterra. Já a segunda época ocorreu entre as duas guerras mundiais. Nesse período houve a paralisação das importações, o que impôs a criação de empresas siderúrgicas no país (CHAMBERLAIN; FICANHA; FABEANE, 2013).

Acredita-se que a ponte sobre o rio Paraíba do Sul, no Estado do Rio de Janeiro, foi a primeira construção em ferro fundido no Brasil. Esta foi inaugurada em 1857 e vence cinco vãos de 30 metros por meio de arcos atirantados (BELLEI, 1998; PFEIL; PFEIL, 2009). A Figura 2 apresenta um detalhe do meio do vão dos arcos da ponte citada.

Figura 2 – Detalhe do meio do vão dos arcos da ponte sobre o rio Paraíba do Sul.



Fonte: Paraíba Do Sul (2020).

1.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS

As vantagens do uso do aço em estruturas são (BELLEI, 1998; CHAMBERLAIN; FICANHA; FABEANE, 2013):

- a) Devido à alta resistência do material em seus diversos tipos de tensão, é possível realizar o dimensionamento de peças com reduzida área de seção transversal, o que, mesmo com alta densidade, proporciona estruturas mais leves e, por consequência, reduz as solicitações nas fundações;
- b) O material é homogêneo, com limite de escoamento, ruptura e módulo de elasticidade bem definidos, o que possibilita o emprego de uma pequena margem de segurança nos projetos;
- c) Os elementos são fabricados em oficinas, com montagem mecanizada, o que propicia uma diminuição do tempo de execução;

- d) A construção de edificações em aço é rápida e flexível, uma vez que os elementos podem ser facilmente desmontados e substituídos.

Já as desvantagens do uso do aço em estruturas são (CHAMBERLAIN; FICANHA; FABEANE, 2013):

- a) A utilização desse sistema estrutural pode ser menos viável economicamente quando comparada à de outros sistemas, como em concreto armado, em função do planejamento da obra;
- b) Escassez de mão de obra especializada;
- c) A disponibilidade de alguns tipos de aço e perfis pode variar dependendo da região;
- d) Não há o costume de construir estruturas em aço em várias partes do país.

Adicionalmente, Bellei (1998) também aponta a suscetibilidade à corrosão do aço, recomendando a aplicação de uma camada de tinta ou outro método de proteção para reduzir os efeitos desse problema.

1.3 JUSTIFICATIVA

Embora haja uma grande variedade de *softwares* de dimensionamento de estruturas de concreto armado, como os desenvolvidos pela TQS (2020) e pela AltoQi (2020), não se percebe a mesma quantidade de *softwares* de dimensionamento de estruturas metálicas baseados na NBR 8800:2008, em especial aqueles voltados para o ensino. O projeto de estruturas metálicas apresenta uma grande quantidade de cálculos, tornando seu dimensionamento complexo, o que dificulta o entendimento e a receptividade por parte dos estudantes.

De tal maneira, com o desenvolvimento do *software* proposto, capaz de dimensionar uma estrutura personalizada pelo usuário e gerar um memorial de cálculo detalhado, espera-se complementar o ensino acerca do dimensionamento de estruturas metálicas e difundir a utilização de estruturas de aço por parte de futuros engenheiros civis.

1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.4.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo a elaboração de um *software* educacional que auxilie no dimensionamento de uma estrutura de galpão e de elementos executados em aço, de acordo com as recomendações vigentes da NBR 8800 (ABNT, 2008).

1.4.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos do presente trabalho:

- a) Desenvolver um *software* com interface intuitiva para utilização em sala de aula, utilizando a linguagem de programação *Visual Basic*;
- b) Realizar o dimensionamento detalhado de terças, vigas e pilares de um galpão em aço;
- c) Gerar automaticamente um memorial de cálculo para os usuários;
- d) Apresentar os resultados obtidos de maneira gráfica.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho possui caráter quantitativo, cuja pesquisa é classificada como exploratória, uma vez que possui a finalidade de desenvolver e esclarecer conhecimentos acerca do tema trabalhado (GIL, 2008). Dessa forma foram analisadas as normas vigentes relacionadas ao projeto de estruturas, em especial as voltadas para o dimensionamento em aço. Além disso, também foi analisada a linguagem de programação na qual o programa foi desenvolvido.

O *software* foi desenvolvido em linguagem *Visual Basic*, que é uma linguagem de programação desenvolvida pela Microsoft, sendo um aperfeiçoamento da linguagem *Basic* (*Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code*) da mesma empresa. O *Visual Basic* possui uma programação voltada para eventos e ambiente gráfico, que possibilita a criação de uma interface intuitiva para os usuários, além de facilitar o desenvolvimento do *software*. Com isso foi possível implementar um algoritmo capaz de receber valores de parâmetros, como dimensões da estrutura, propriedades mecânicas do aço utilizado, coeficientes de ponderação considerados, dentre outros, e, com isso, realizar a modelagem da estrutura para a determinação das reações de apoio e dos diagramas de esforços internos para posteriormente dimensionar os elementos.

Os esforços atuantes na estrutura foram calculados de acordo com o recomendado pela NBR 8800 – *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios* (ABNT, 2008), em consonância com a NBR 6120 – *Ações para o cálculo de estruturas de edificações* (ABNT, 2019) e com a NBR 6123 – *Forças devidas ao vento em edificações* (ABNT, 1988). Nas combinações de ações, os valores dos coeficientes de ponderação e de fatores de redução são preenchidos previamente com os valores recomendados pela norma, com a possibilidade de alteração manual.

A determinação das reações de apoio e dos diagramas de esforços internos é feita por meio do Método da Rigidez Direta (MRD), considerando a estrutura composta por elementos lineares de barras prismáticas com comportamento elástico. A adoção desse método deu-se por conta da grande facilidade de implementação computacional em comparação aos demais métodos.

A verificação da segurança é realizada para os elementos estruturais críticos, isto é, aqueles submetidos aos maiores esforços internos. Nestes elementos são

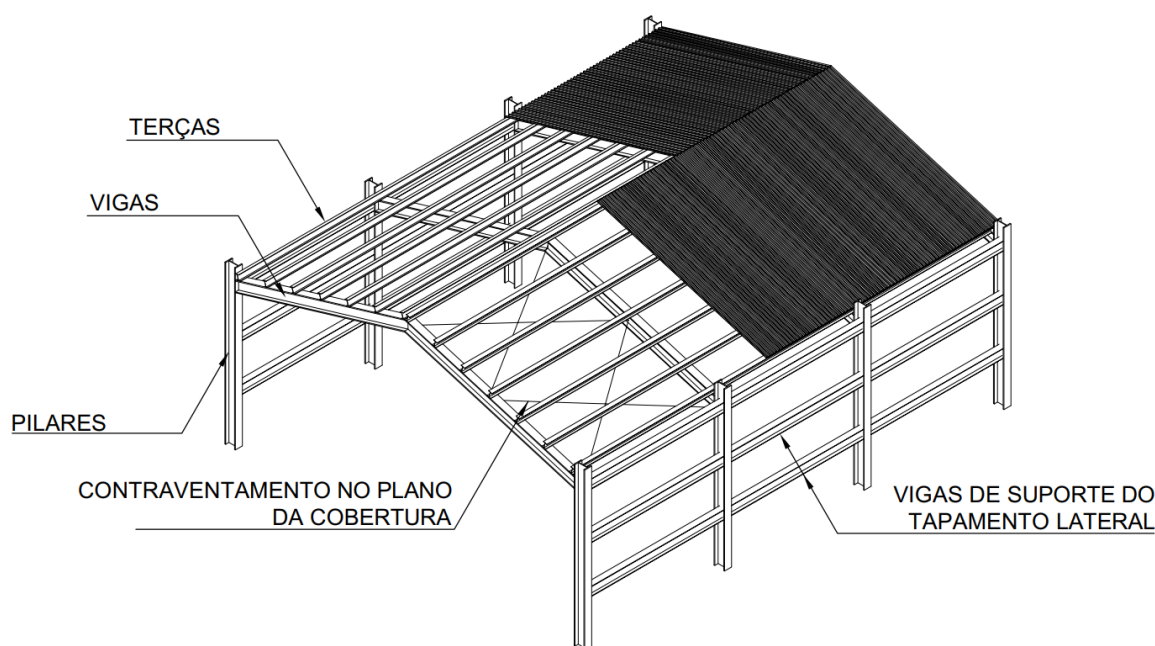
analisados, de acordo com a NBR 8800:2008, os esforços resistentes à Flambagem Local da Alma (FLA), à Flambagem Local da Mesa (FLM), à Flambagem Lateral com Torção (FLT), a esforços transversais e a esforços axiais.

Caso seja de interesse do usuário, também há a possibilidade de realizar simulações em um elemento estrutural qualquer, com especificações fornecidas pelo usuário.

2.1 LIMITAÇÃO

O *software* desenvolvido neste trabalho se limita ao dimensionamento de um galpão formado por terças, vigas de cobertura de alma cheia, pilares, vigas de tapamento e contraventamento, cujos elementos constituintes do galpão estão ilustrados na Figura 3.

Figura 3 – Desenho esquemático dos elementos constituintes de um galpão com vigas de alma cheia.



Fonte: Autoria própria.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo irá apresentar alguns trabalhos que foram realizados na área de dimensionamento de estruturas metálicas, automação de dimensionamentos (tanto de estruturas metálicas quanto de outros tipos de estruturas) e trabalhos voltados a desenvolvimento de *softwares* no âmbito da engenharia. Na sequência, será descrito em pormenores os elementos presentes na estrutura representada na Figura 3 e apresentados os métodos recomendados pela NBR 8800:2008 para o dimensionamento desses elementos, com enfoque nas terças, vigas e pilares.

3.1 TRABALHOS REALIZADOS NA ÁREA

A computação tem se mostrado uma ótima ferramenta no ensino de conceitos fundamentais para a engenharia, principalmente ao se tratar daqueles voltados a estruturas. Segundo Pravia e Kripka (1999), isso é devido ao fato de a análise estrutural tratar de conceitos abstratos, difíceis de serem entendidos pelos estudantes. Dessa forma a computação, quando devidamente utilizada, pode auxiliar tanto o educador em suas atividades, quanto o estudante em seu processo de construção de conhecimento.

Nesse contexto observa-se o desenvolvimento de vários *softwares* voltados à diversas áreas da engenharia e com finalidades variadas. Dentre esses pode-se citar:

- a) Ftool (*Two-dimensional Frame Analysis Tool*): ferramenta de análise de estruturas planas, inicialmente desenvolvida com fins educacionais, que posteriormente foi aperfeiçoada e comercializada. A análise estrutural fornecida pelo módulo educacional contempla a apresentação dos diagramas de esforços internos de estruturas reticuladas, em que o usuário possui a liberdade de definir as propriedades mecânicas e geométricas dos elementos que a compõe. Já o módulo profissional contempla a análise de múltiplos casos de carregamento, de acordo com as necessidades de projeto (FTOOL, 2020).
- b) VisualBarras: *software* desenvolvido para análise de estruturas planas por métodos matriciais. Possui a funcionalidade de observar os esforços internos, reações de apoio e deslocamentos na estrutura, tendo seu

grande diferencial na apresentação da matriz de rigidez da estrutura, para uso didático (PRAVIA; PASQUETTI; CHIARELLO, 2001).

- c) VisualVentos: ferramenta capaz de calcular os valores das cargas devidas à pressão de vento em estruturas de planta retangular e com cobertura de duas águas, segundo a NBR 6123:1988. Proporciona ao usuário a liberdade de definir os vários parâmetros referentes à determinação dessas ações, com uma interface gráfica simples para melhor entendimento. Também elabora um relatório ao final do processo, o que facilita a aferição dos resultados e seu uso didático (PRAVIA; CHIARELLO, 2003).
- d) VisualMetal: *software* desenvolvido para o dimensionamento de perfis metálicos I, L e U segundo a NBR 8800:1986. Permite ao usuário inserir as propriedades geométricas do perfil desejado, assim como os valores dos esforços solicitantes sobre o mesmo. Possui também a funcionalidade de determinar o perfil mais leve para suportar tais esforços, assim como elabora automaticamente um relatório com os cálculos realizados (PRAVIA; CHIARELLO; DREHMER, 2004).
- e) AutoMetal: *software* que realiza o dimensionamento de treliças metálicas planas de acordo com a norma NBR 8800:1986 para perfis laminados. Permite ao usuário criar uma treliça personalizada, ou utilizar uma geração de treliças automatizada conforme parâmetros inseridos manualmente. Também possibilita a definição das cargas atuantes na cobertura, assim como a combinação desejada, além de possuir um módulo de cálculo automatizado da ação do vento sobre a estrutura (SILVA; REQUENA; ASSAN, 1999).
- f) CoP 1.02: *software* desenvolvido pela ArcelorMittal para dimensionamento de ligações metálicas de acordo com os Eurocódigos. Possui uma visualização tridimensional da ligação analisada e permite o detalhamento de cada componente da ligação. Após o dimensionamento o programa elabora um relatório detalhado com os esforços atuantes e a resistência de cada componente isolado e a resistência total da ligação (ARCELORMITTAL, 2020).

Além dos *softwares* supracitados, ainda há a existência de diversos outros *softwares* desenvolvidos para fins educacionais e para fins comerciais. Dentre os *softwares* comerciais destacam-se os desenvolvidos pela TQS (2020), para dimensionamento de estruturas e fundações de edificações; os desenvolvidos pela AltoQi (2020), que possui módulos para as diversas áreas da engenharia, como o Eberick, QiBuilder, entre outros; o Civil 3D desenvolvido pela AutoDesk (2020), que automatiza várias etapas de projetos de infraestrutura civil; e o Metálicas 3D (MULTIPLUS, 2020), que é focado no dimensionamento de estruturas metálicas, de alumínio e de madeira.

3.2 ELEMENTOS DE ESTRUTURAS DE AÇO

Os elementos estruturais mais comuns de se observar em estruturas de aço são: terças, vigas, pilares, vigas de tapamento lateral e contraventamento no plano da cobertura. Esses elementos são descritos nos tópicos que seguem.

3.2.1 Terças

Terças são vigas longitudinais instaladas nos planos da cobertura, entre vigas principais ou secundárias de pórticos planos. Sua finalidade é suportar os esforços advindos do telhamento e do vento e conduzi-los à estrutura principal. Esses esforços podem ser provocados por ações de natureza permanente, como o peso próprio do telhamento e da própria terça, como de natureza acidental, como pressões devidas ao vento, sobrecargas acidentais, sobrecargas de manutenção, entre outras (BELLEI, 1998; PFEIL; PFEIL, 2009).

Nesse tipo de elemento estrutural é comum observar a ocorrência de flexão oblíqua devido à inclinação da cobertura, porém em casos excepcionais de coberturas planas pode ocorrer somente flexão simples (BELLEI, 1998).

3.2.2 Vigas de Cobertura

As cargas suportadas pelas terças são transmitidas para as vigas, que, por sua vez, as transmitem para os pilares. Ao contrário das terças, as vigas de cobertura

não apenas têm a função de conduzir as cargas da estrutura até a sua fundação, mas também possuem a função de conferir estabilidade à estrutura (BELLEI, 1998).

Devido à geometria usual dos galpões, as vigas nesse tipo de estrutura deverão suportar esforços de flexão simples, esforços cortantes e normais, causados pelas terças e por seu peso próprio.

3.2.3 Pilares

Os pilares recebem os esforços originários das vigas e devem transmiti-los às fundações. Estruturalmente é possível dividir os pilares em três partes principais: o fuste, que é entendido como o elemento portante do pilar; o ponto de ligação, que servirá de suporte para as outras partes da estrutura; e a base do pilar, que irá distribuir as cargas na fundação (BELLEI, 1998).

Esses elementos podem estar sujeitos a tensões de compressão simples ou composta (conjugadas a tensões de flexão), ou a tensões de flexotração, quando o vento se apresenta de forma particularmente expressiva na estrutura (BELLEI, 1998).

3.2.4 Vigas de Tapamento

São vigas instaladas entre pórticos ou pilares, cuja finalidade é servir de apoio para as chapas de tapamento, além de reduzir o comprimento de flambagem dos pilares no plano do tapamento (BELLEI, 1998; PFEIL; PFEIL, 2009).

3.2.5 Contraventamento no Plano da Cobertura

É um sistema que objetiva fornecer estabilidade espacial à estrutura, geralmente executada em forma de X. No plano da cobertura, esse sistema é responsável por garantir a estabilidade das vigas, que têm sua seção transversal parcialmente comprimida pelos esforços de flexão elevados que devem suportar (BELLEI, 1998; PFEIL; PFEIL, 2009).

3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO

A NBR 8800:2008 apresenta algumas propriedades mecânicas gerais de aços para cálculo, cujos valores são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de propriedades mecânicas do aço.

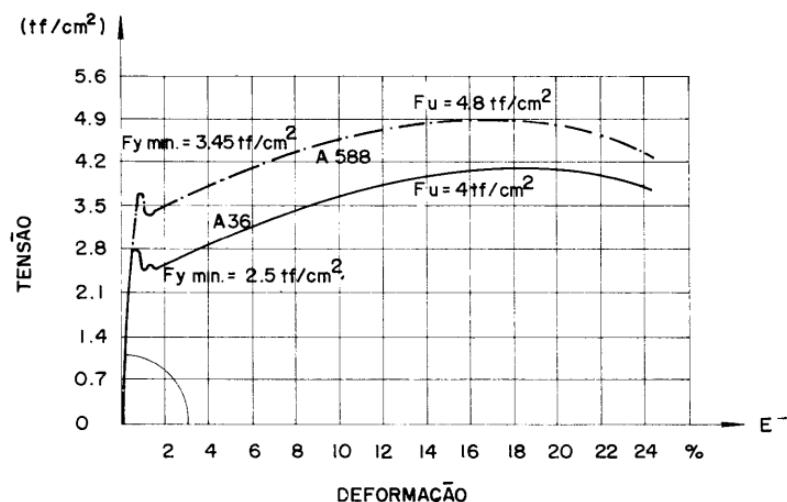
| Propriedade | Símbolo | Valor |
|------------------------------------|-----------|---|
| Módulo de Elasticidade | E, E_a | 200000 MPa |
| Coefficiente de Poisson | ν_a | 0,3 |
| Módulo de Elasticidade Transversal | G | 77000 MPa |
| Coefficiente de Dilatação Térmica | β_a | $1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ |
| Massa específica | ρ_a | 7.850 kg/m ³ |

Fonte: Adaptado de ABNT (2008, p. 13).

O aço estrutural costuma ser classificado em dois grupos, em função de sua composição química: aço-carbono e aço de baixa liga. A resistência do aço-carbono é incrementada principalmente devido à presença do carbono e é regulada pela presença de manganês. No entanto a adição do carbono resulta também em uma diminuição de sua ductilidade e de sua soldabilidade. Dessa forma é comum observar a utilização de aços de baixo teor de carbono em estruturas convencionais. Já os aços de baixa liga são aqueles em que é adicionado um elemento de liga no intuito de melhorar alguma propriedade física do material, como o aumento da resistência (BELLEI, 1998; PFEIL; PFEIL, 2009).

Dentre as propriedades do aço, a resistência ao escoamento (f_y) e a resistência à ruptura (f_u) possuem extrema importância para o dimensionamento de estruturas metálicas. A Figura 4 apresenta um exemplo de diagrama de tensão-deformação (σ - ϵ) comumente observado em aços estruturais tratados a frio, segundo o teste de tração (BELLEI, 1998).

Figura 4 – Diagrama de tensão-deformação típico de aços estruturais tratados a frio.



Fonte: Bellei (1998).

Analisando o diagrama da Figura 4, é possível perceber o comportamento elástico (linear) do material até um determinado valor de tensão, denominada tensão de proporcionalidade. A inclinação do diagrama nesse trecho corresponde ao módulo de elasticidade do aço (E). Após ultrapassar o trecho referente ao regime elástico do material, este passa a apresentar deformação a tensão constante. Essa propriedade é conhecida como escoamento ou cedência do material, sendo que a tensão que produz tal escoamento é denominada tensão de escoamento (BELLEI, 1998; PFEIL; PFEIL, 2009). Por fim, o maior valor de tensão suportado pelo aço corresponde à tensão de ruptura.

A NBR 8800:2008 apresenta alguns tipos de aço especificados por Normas Brasileiras para uso estrutural, bem como aços fabricados segundo o padrão americano, normatizados pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Os tipos mais usuais em estruturas civis encontram-se reproduzidos nas Tabela 2 e 3.

Tabela 2 – Aços especificados por Normas Brasileiras para uso estrutural.

| Denominação | f_y (MPa) | f_u (MPa) |
|-------------|-------------|-------------|
| MR 250 | 250 | 400-560 |
| AR 350 | 350 | 450 |
| AR 350 COR | 350 | 485 |
| AR 415 | 415 | 520 |

Fonte: Adaptado de ABNT (2008, p. 108).

Tabela 3 – Aços de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural.

| Denominação | f_y (MPa) | f_u (MPa) |
|---------------|-------------|-------------|
| A36 | 250 | 400-550 |
| A500 – Grau A | 230 | 210 |
| A500 – Grau B | 290 | 400 |

Fonte: Adaptado de ABNT (2008, p. 109).

3.4 PERFIS USUAIS EM ESTRUTURAS DE AÇO

3.4.1 Perfis Laminados

Os perfis laminados podem ser produzidos a partir do processo de laminação a quente ou laminação a frio. Em ambos os casos o aço passa por uma redução da área de sua seção transversal, por meio do alongamento do mesmo. Na laminação a quente o material é pré-aquecido, para posteriormente passar por um conjunto de cilindros, chamados de laminadores, que aplicarão pressão e deformarão o aço. Já a laminação a frio segue o mesmo princípio, porém sem o pré-aquecimento, o que evita o surgimento de tensões residuais devido ao processo de resfriamento diferencial do material, limitando essas tensões apenas àquelas proporcionadas pelo processo de deformação do material (MANCINI, RIBEIRO, 2003; PFEIL; PFEIL, 2009).

Os principais perfis laminados a quente são: cantoneiras, perfis I, W e U. No entanto, não há uma ampla aplicação desse tipo de perfil, pois há uma pequena disponibilidade de tipos de seções e tamanhos. Atualmente é possível encontrar também perfis laminados importados, que seguem o padrão americano ou europeu (CHAMBERLAIN, FICANHA, FABEANE, 2013).

Os perfis laminados a frio também apresentam seções com dimensões padronizadas, porém também podem ser produzidos de acordo com as necessidades do projeto, desde que sejam respeitadas as limitações de normas e equipamentos. Dentre os perfis desse tipo destacam-se os perfis U, Z e L (MANCINI, RIBEIRO, 2003).

3.4.2 Perfis Soldados

São perfis produzidos a partir do corte, arranjo e soldagem de chapas planas. Por esse motivo é possível encontrar uma grande variedade de perfis soldados, desde que respeite as relações previstas pela norma NBR 5884 – *Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico – Requisitos gerais* (ABNT, 2013). Os perfis soldados são

usualmente classificados nos tipos VS (Viga Soldada), CS (Coluna Soldada) e CVS (Coluna-Viga Soldada) (ABNT, 2013; CHAMBERLAIN, FICANHA, FABEANE, 2013; PFEIL; PFEIL, 2009).

3.5 DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS

Todo projeto estrutural deve ser realizado de modo a evitar o colapso da estrutura e garantir o bom desempenho da mesma ao longo de sua vida útil, evitando que ocorram grandes deslocamentos, vibrações e danos locais (PFEIL; PFEIL, 2009). Os tópicos que seguem apresentam o conceito de estados limites e quais os critérios estabelecidos por normas estruturais para que o dimensionamento da estrutura seja feito de forma correta.

3.5.1 Estados Limites

Um estado limite é aquele em que, ao ser atingido, a estrutura deixa de satisfazer a alguma função para a qual foi projetada. Esses estados limites podem ser divididos em dois tipos: Estados Limites Últimos (ELU) ou Estados Limites de Serviço (ELS) (PFEIL; PFEIL, 2009).

Os ELU referem-se ao colapso, ou qualquer outra forma de ruína da estrutura, comprometendo a segurança da mesma. Por sua vez os ELS são aqueles em que a utilização da estrutura fica comprometida, devido a deformações excessivas ou vibrações excessivas (PFEIL; PFEIL, 2009). O presente trabalho se restringirá a verificar os critérios de segurança relativos aos primeiros estados.

3.5.1.1 Estados Limites Últimos

Estados Limites Últimos (ELUs) estão diretamente ligados à aplicação excessiva de cargas na estrutura ou à baixa resistência dos elementos estruturais, o que pode ocasionar os seguintes modos de falha (ABNT, 2014; PFEIL; PFEIL, 2009; REIS, 1996):

- a) Perda de equilíbrio da estrutura, que passa a exibir movimentos de corpo rígido;

- b) Excesso de tensões em um elemento estrutural, ou seção, de forma a ocasionar a plastificação do mesmo (formação de rótulas plásticas);
- c) Aplicação de cargas que excedem a capacidade resistente de algum componente de ligação entre elementos estruturais, ocasionando a falha dessa ligação;
- d) Instabilidade proveniente do fenômeno de flambagem em um elemento estrutural ou seção; ou
- e) Ruptura por fadiga do elemento estrutural ou seção.

Em estruturas de aço é mais comum a ocorrência de ELUs decorrentes da plastificação total de seções transversais, dos fenômenos de flambagem local da mesa (FLM), flambagem local da alma (FLA), ou flambagem lateral com torção (FLT), bem como da instabilidade de pilares (REIS, 1996).

Segundo a NBR 8800:2008, a verificação de segurança, quando realizada de forma isolada em relação aos esforços atuantes, pode ser feita por meio da seguinte desigualdade,

$$R_d \geq S_d, \quad (1)$$

em que R_d representa os valores de cálculo dos esforços resistentes e S_d representa os valores de cálculo dos esforços solicitantes. Os valores de S_d são obtidos por meio de combinações últimas de ações, enquanto os valores de R_d devem ser calculados por meio de equações e considerações exclusivas a cada modo de falha.

A resistência de cálculo do aço, representada por f_d pela NBR 8800:2008, é obtida através da divisão da resistência característica do material (f_k) por um coeficiente de ponderação γ_m , ou seja,

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m}, \quad (2)$$

em que os valores de γ_m do aço estrutural são observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores dos coeficientes de ponderação das resistências γ_m .

| Combinações | Aço estrutural (γ_a) | |
|----------------------------|---|---------------------------|
| | Escoamento, flambagem e instabilidade (γ_{a1}) | Ruptura (γ_{a2}) |
| Normais | 1,10 | 1,35 |
| Especiais ou de construção | 1,10 | 1,35 |
| Excepcionais | 1,00 | 1,15 |

Fonte: Adaptado de ABNT (2008, p. 23).

3.5.2 Combinação de Ações

Conforme visto, os valores dos esforços solicitantes de projeto, S_d , são obtidos por meio de combinações últimas de ações. Para realizar tais combinações, é necessário antes classificar as ações em três categorias principais, conforme determina a ABNT NBR 8681 – *Ações e segurança nas estruturas - Procedimento* (ABNT, 2004):

- a) Ações permanentes;
- b) Ações variáveis; e
- c) Ações excepcionais.

As ações permanentes podem ser subdivididas em ações permanentes diretas e indiretas. As primeiras englobam as ações de peso próprio dos elementos de construção, em que podem ser incluídos os pesos próprios dos elementos estruturais, assim como o dos elementos construtivos permanentes. Além disso também podem ser considerados os empuxos devido ao movimento de terra e outros materiais granulosos, desde que não sejam removíveis. Já as ações permanentes indiretas são provenientes da protensão, recalques de apoios e retração dos materiais (ABNT, 2004).

As ações variáveis, por sua vez, são aquelas cuja intensidade ou tempo de atuação sofre variações significativas ao longo da vida útil da edificação. Como exemplo, pode-se destacar: forças de frenação, efeitos de ventos, variações de temperatura, atrito dos aparelhos de apoio, pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas, dentre outras. Essas ações podem ainda ser subdivididas em ações variáveis normais e especiais, em função de sua probabilidade de ocorrência (ABNT, 2004).

As ações variáveis normais são aquelas em que a probabilidade de ocorrência é grande o suficiente para serem obrigatoriamente consideradas no dimensionamento da estrutura. Já as ações variáveis especiais são aquelas que possuem intensidades especiais e que não ocorrem com frequência, como ações sísmicas, por exemplo. Para esse tipo de ação deve ser considerada uma combinação especial de ações (ABNT, 2004).

Por fim, as ações excepcionais são aquelas com tempo de duração muito curto e probabilidade de ocorrência muito baixa durante a vida útil da edificação, por exemplo: explosões, choques de veículos, incêndios, enchentes, entre outras. O projeto estrutural deve prever a ocorrência de ações excepcionais sempre que esta não puder ser desprezada e que não possam ser tomadas outras medidas que anulem ou reduzam o efeito de tal ação. A verificação da segurança nesse caso deve ser feita considerando somente estados limites últimos por meio de combinação excepcional, já que, uma vez ocorrida, essa ação pode causar efeitos catastróficos à edificação (ABNT, 2004).

Para estruturas correntes, o dimensionamento deve ser feito com base em combinações últimas normais de ações, conforme a Equação (3), recomendada pela NBR 8800:2008 em seu item 4.7.7.2.1.

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{Gi,k} + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k}, \quad (3)$$

em que γ_g representa o coeficiente de ponderação das ações permanentes, γ_q representa o coeficiente de ponderação das ações variáveis, $F_{Gi,k}$ o valor característico das ações permanentes, $F_{Q1,k}$ o valor característico da ação variável considerada como principal, $\psi_{0j} F_{Qj,k}$ o valor reduzido da combinação das demais ações variáveis.

O coeficiente γ_g é aplicado às ações de caráter permanente de forma a buscar o cenário mais pessimista à estrutura, ou seja, irá majorar as ações permanentes caso estas provoquem efeitos desfavoráveis à estrutura (ABNT, 2004).

A definição desse coeficiente é feita considerando a variabilidade das ações, como o controle dos processos de fabricação do material que será empregado na estrutura, por exemplo. A NBR 8681:2004 indica valores para γ_g em função do tipo de

ação, que são apresentados na Tabela 5. Pode-se perceber que materiais cujos processos de fabricação possuem maior controle de qualidade (e, conseqüentemente, apresentam menor variabilidade em seu peso) estão associados a menores coeficientes de ponderação quando comparados a materiais com reduzido controle de qualidade.

Tabela 5 – Valores dos coeficientes de ponderação em função do tipo de ação permanente direta.

| Combinação | Tipo de ação | Efeito | |
|------------|--|--------------|-----------|
| | | Desfavorável | Favorável |
| Normal | Peso próprio de estruturas metálicas | 1,25 | 1,0 |
| | Peso próprio de estruturas pré-moldadas | 1,30 | 1,0 |
| | Peso próprio de estruturas moldadas no local | 1,35 | 1,0 |
| | Elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i> | 1,40 | 1,0 |
| | Elementos construtivos em geral e equipamentos | 1,50 | 1,0 |

Fonte: Adaptado de ABNT (2004, p. 11).

Já o coeficiente γ_q , referente à ponderação das ações variáveis, deve ser considerado sobre as ações que apresentem efeitos desfavoráveis à estrutura. Caso o efeito de uma determinada ação variável seja favorável a estrutura, esta deve ser desconsiderada dos cálculos, exceto em casos em que é fisicamente impossível atuar separadamente de outra ação desfavorável. Nesse caso, ambas devem ser consideradas como uma ação única (ABNT, 2004). A Tabela 6 apresenta os valores de γ_q indicados pela NBR 8681:2004.

Tabela 6 – Valores dos coeficientes de ponderação em função do tipo de ação variável.

| Combinação | Tipo de ação | Coeficiente de ponderação |
|------------|--------------------------|---------------------------|
| Normal | Ações truncadas | 1,2 |
| | Efeito de temperatura | 1,2 |
| | Ação do vento | 1,4 |
| | Ações variáveis em geral | 1,5 |

Fonte: Adaptado de ABNT (2004, p. 12).

O valor reduzido $\psi_0 F_k$ de uma ação considera que a probabilidade de ocorrência simultânea de valores característicos de duas ações variáveis é muito baixa. Dessa forma, considera-se que haja a atuação de uma ação variável principal (sem redução de seu valor característico), enquanto as demais possuem valores reduzidos. Os fatores de combinação ψ_0 indicados pela NBR 8681:2004 são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores dos fatores de combinação ψ_0 .

| Ações | | ψ_0 |
|--|---|----------|
| Cargas acidentais de edifícios | Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas | 0,5 |
| | Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas | 0,7 |
| | Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas | 0,8 |
| Vento | Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral | 0,6 |
| Temperatura | Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local | 0,6 |
| Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos | Passarelas de pedestres | 0,6 |
| | Vigas de rolamento de pontes rolantes | 1,0 |

Fonte: Adaptado de ABNT (2004, p. 13).

Para estruturas correntes, é possível obter os valores característicos dos carregamentos atuantes com o auxílio da NBR 6120:2019. Usualmente, em estruturas de galpões metálicos, as ações mais expressivas são:

- a) Peso-próprio da estrutura, cuja massa linear pode ser obtida tanto por meio de catálogos do fabricante dos perfis metálicos, quanto por meio da massa específica do material, que é fornecida pela NBR 8800:2008;
- b) Ações de sobrecarga na cobertura, calculadas de acordo com item 6.4 da NBR 6120:2019;
- c) Ação devida à presença de um operador na cobertura, especificada como uma carga concentrada de 1 kN atuante em elementos isolados de cobertura na posição mais desfavorável; e
- d) Forças devidas ao vento, calculadas de acordo com a NBR 6123:1988.

3.5.3 Determinação dos Esforços Solicitantes

Após realizada a combinação de ações, é feita a determinação dos esforços solicitantes nos elementos da estrutura. Isso pode ser feito de acordo com diversos métodos para cálculo de estruturas isostáticas e hiperestáticas. O presente trabalho utiliza o Método da Rigidez Direta (MRD) para a determinação das reações de apoio e dos diagramas de esforços internos (normal, cortante e momento fletor) em vigas e pórticos.

De acordo com esse método deve-se, inicialmente, determinar a matriz de rigidez local das barras que compõem a estrutura analisada ($[k'_{barra}]$). Para isso são determinados individualmente os coeficientes da matriz, denominados coeficientes de rigidez locais. Os coeficientes de rigidez locais podem ser interpretados como as forças ou momentos atuantes nas extremidades da barra quando a mesma está sujeita a um deslocamento unitário ou rotação unitária (MARTHA, 2020a).

Em seguida é determinada a matriz de rigidez local da barra no sistema de referência global da estrutura ($[k_{barra}]$), por meio da equação:

$$[k_{barra}] = [R_{barra}]^T \cdot [k'_{barra}] \cdot [R_{barra}], \quad (4)$$

em que $[R_{barra}]$ e $[R_{barra}]^T$ representam a matriz de rotação e sua inversa, respectivamente. A matriz $[R_{barra}]$, para elementos de pórticos, é calculada como:

$$[R_{barra}] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

sendo que θ é o ângulo formado entre o sistema de eixos local e global. Já a matriz $[R_{barra}]^T$ corresponde à transposta da matriz $[R_{barra}]$.

Com a matriz de rigidez local no sistema global, determina-se a matriz de rigidez global da estrutura, $[K]$, por meio da superposição dos casos básicos, formados pela análise das barras isoladas. Esse procedimento de superposição é apresentado em seus pormenores por Martha (2020b).

Após determinar a matriz $[K]$, é possível calcular o vetor de forças generalizadas no sistema global (\vec{f}) e o vetor de deslocabilidade no sistema global (\vec{d}) por meio da Equação (6) (MARTHA, 2020b).

$$\vec{f} = [K] \cdot \vec{d}. \quad (6)$$

O vetor \vec{f} é composto pelas forças e momentos atuantes nos nós da estrutura de modo a equilibrá-la, já o vetor \vec{d} é composto pelos deslocamentos sofridos pelos

nós. Em função da vinculação (caso possua ou não), é possível determinar previamente alguns coeficientes de \vec{f} e \vec{d} de forma a possibilitar a resolução da Equação (6).

Para a determinação das reações de apoio é necessário realizar a superposição do vetor \vec{f} com o vetor das reações de engastamento das barras (\hat{f}'). Por fim, os esforços internos podem ser determinados como a superposição do vetor \vec{f} rotacionado para o sistema local da barra analisada com o vetor \hat{f}' (MARTHA, 2020b).

3.5.4 Determinação do Momento Fletor Resistente de Cálculo

O momento fletor resistente de cálculo é obtido por meio das recomendações expressas na NBR 8800:2008 e seu valor está atrelado a três estados limites últimos possíveis de ocorrer em elementos fletidos: Flambagem Lateral com Torção (FLT), Flambagem Local da Mesa (FLM) e Flambagem Local da Alma (FLA).

3.5.4.1 Vigas de alma não esbelta

Em casos de vigas com seções transversais de alma não-esbelta, o momento fletor resistente é determinado de acordo com Anexo G da NBR 8800:2008, que apresenta o procedimento de cálculo em função da esbeltez da seção ou de seus elementos (alma ou mesa).

O cálculo do momento resistente para o estado limite FLT é realizado conforme as expressões:

$$M_{Rd} = \begin{cases} \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} & , \text{ para } \lambda \leq \lambda_p & (7) \\ \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} & , \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r, & (8) \\ \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} & , \text{ para } \lambda > \lambda_r & (9) \end{cases}$$

enquanto o cálculo do momento resistente para os estados limites FLM e FLA são realizados conforme as expressões:

$$M_{Rd} = \begin{cases} \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} & , \text{ para } \lambda \leq \lambda_p & (10) \\ \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] & , \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r, & (11) \\ \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} & , \text{ para } \lambda > \lambda_r & (12) \end{cases}$$

Caso a alma do perfil seja classificada como esbelta (ou seja, $\lambda > \lambda_r$), a Equação (12) deixa de ser aplicável ao estado limite de FLA. Nessa situação, o cálculo do momento fletor resistente deve ser realizado conforme Anexo H da NBR 8800:2008, conforme será visto posteriormente neste trabalho.

O valor do momento fletor resistente de cálculo é limitado de modo a assegurar que a seção transversal mais solicitada não sofra escoamento de todas as suas fibras e configure uma rótula plástica. Tal limitação é imposta por meio das Equações (7) e (10), além da desigualdade à direita das Equações (8) e (9), em que o momento fletor resistente não deve ultrapassar o valor do momento de plastificação total da seção transversal (M_{pl}), calculado como:

$$M_{pl} = f_y Z, \quad (13)$$

em que Z representa o módulo de resistência plástica da seção analisada.

A determinação dos parâmetros M_r , M_{cr} , λ , λ_p e λ_r é realizada em função do tipo de estado limite analisado. A Tabela 8 apresenta as expressões de cálculo utilizadas para a determinação dos valores desses parâmetros no caso de perfis I e U não sujeitos a momento de torção, segundo a NBR 8800:2008.

Tabela 8 – Parâmetros referentes ao momento fletor resistente.

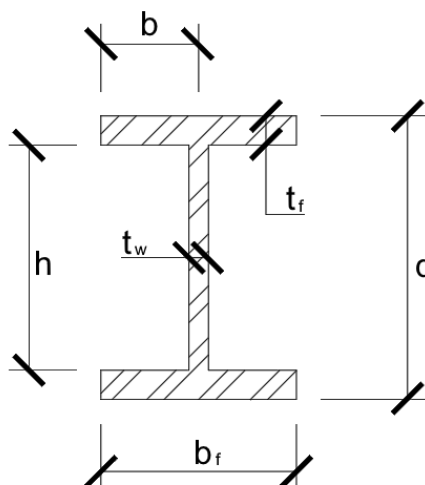
| Tipo de seção e eixo de flexão | Estado limite aplicável | M_r | M_{cr} | λ | λ_p | λ_r |
|--|-------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Seções I e H com dois eixos de simetria e seções 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 | $\frac{L_b}{r_y}$ | $1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ | Ver nota |
| | FLM | $(f_y - \sigma_r)W$ | Ver nota | $\frac{b}{t_f}$ | $0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ | Ver nota |
| | FLA | $f_y W$ | 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 dois eixos de simetria e seções U fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia | FLM | $(f_y - \sigma_r)W$ | Ver nota | $\frac{b}{t_f}$ | $0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ | Ver nota |
| | FLA | $f_y W_{ef}$ | $\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ | $\frac{h}{t_w}$ | $1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ | $1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ |

Fonte: Adaptado de NBR 8800 (ABNT, 2008, p. 134).

Nota: Os parâmetros não presentes na tabela são calculados separadamente.

Para exemplificar, a Figura 5 apresenta as nomenclaturas utilizadas nas dimensões de um perfil I.

Figura 5 – Nomenclaturas utilizadas nas dimensões de um perfil I.



Fonte: Autoria própria.

O parâmetro σ_r presente na Tabela 8 refere-se à tensão residual da seção, que é indicado ser tomado como 30% da resistência de escoamento.

A esbeltez limite para seções semicompactas (λ_r) e o do momento crítico (M_{cr}) no estado limite FLT são calculados segundo as Equações (14) e (15).

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}}, \quad (14)$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w}\right)}, \quad (15)$$

em que β_1 e C_w para seções I e U são calculados conforme as Equações (16) e (17), respectivamente.

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W}{E J}, \quad (16)$$

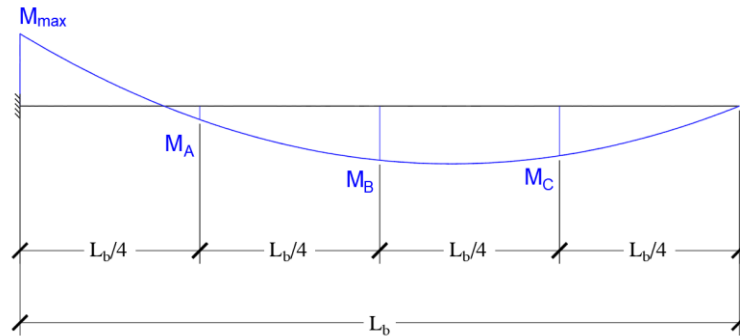
$$C_w = \begin{cases} \frac{I_y (d - t_f)^2}{4} & , \text{ para seções I} \\ \frac{t_f (b_f - 0,5 t_w)^3 (d - t_f)^2}{12} \left[\frac{3(b_f - 0,5 t_w) t_f + 2(d - t_f) t_w}{6(b_f - 0,5 t_w) t_f + (d - t_f) t_w} \right] & , \text{ para seções U} \end{cases} \quad (17)$$

No caso de vigas de esbeltez intermediária ou elevada sujeitas à FLT, é necessário calcular o valor do fator de modificação para o diagrama de momento fletor não-uniforme, C_b , conforme determina a Equação (18).

$$C_b = \frac{12,5 M_{\max}}{2,5 M_{\max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} R_m \leq 3,0, \quad (18)$$

em que M_{\max} é o momento fletor máximo solicitante de cálculo, em módulo, no comprimento destravado (L_b); M_A , M_B e M_C são os momentos fletores, em módulo, situados a um quarto, metade e três quartos do comprimento destravado do elemento estrutural analisado, respectivamente; e R_m é um parâmetro de monossimetria, igual a 1,00 em casos de seções fletidas em relação ao eixo de simetria. A Figura 6 apresenta o diagrama de momentos fletores em uma viga submetida a esforços quaisquer, onde pode-se observar os valores de M_{\max} , M_A , M_B e M_C .

Figura 6 – Exemplo do posicionamento dos momentos M_{\max} , M_A , M_B e M_C .



Fonte: Autoria própria.

Na verificação quanto ao estado limite último por FLM, os valores de λ_r e de M_{cr} são calculados em função do tipo de fabricação do perfil. A determinação desses parâmetros para perfis laminados é realizada conforme as Equações (19) e (20),

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{f_y - \sigma_r}}, \quad (19)$$

$$M_{cr} = \frac{0,69E}{\lambda^2} W_c, \quad (20)$$

enquanto para perfis soldados é realizada conforme as Equações (21) e (22).

$$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)/k_c}}, \quad (21)$$

$$M_{cr} = \frac{0,90Ek_c}{\lambda^2} W_c, \quad (22)$$

sendo k_c calculado em função da classificação do elemento do perfil analisado. Mesas de perfis de seções I, H, T ou U soldadas são classificadas como elementos AL (em que apenas uma das bordas longitudinais encontra-se vinculada) de grupo 5, o que implica em um cálculo de k_c conforme Equação (23).

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}}, \quad (23)$$

sendo que o valor de k_c deve estar no intervalo [0,35; 0,76].

O módulo de resistência mínimo elástico (W_{ef}), observado na verificação quanto ao estado limite FLA, é obtido a partir de uma seção de largura b_{ef} , que é calculada através da Equação (24).

$$b_{ef} = 1,92t_w \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[1 - \frac{c_a}{h/t_w} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq h, \quad (24)$$

sendo c_a igual a 0,34. No caso de perfis I o valor de W_{ef} pode ser obtido por meio da Equação (25).

$$W_{ef} = \frac{1}{b} \left(\frac{b_{ef} t_w^3}{12} + \frac{t_f b_f^3}{6} \right). \quad (25)$$

3.5.4.2 Vigas de alma esbelta

Caso o valor da esbeltez da alma (λ) seja superior à esbeltez limite para seções semicompactas (λ_r), então a determinação do momento fletor resistente de cálculo da viga é realizado conforme anexo H da NBR 8800:2008.

Nessa situação, o momento fletor resistente do perfil é dado em função da ocorrência do estado limite de escoamento da mesa tracionada, conforme expresso pela Equação (26).

$$M_{Rd} = \frac{W_{xt} f_y}{\gamma_{a1}}. \quad (26)$$

Já o momento fletor resistente de cálculo referente ao estado limite FLT é calculado conforme as expressões:

$$M_{Rd} = \begin{cases} \frac{k_{pg} W_{xc} f_y}{\gamma_{a1}} & , \text{ para } \lambda \leq \lambda_p & (27) \\ \frac{C_b k_{pg}}{\gamma_{a1}} \left[1 - 0,3 \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] W_{xc} f_y \leq \frac{k_{pg} W_{xc} f_y}{\gamma_{a1}} & , \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r, & (28) \\ \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{C_b k_{pg} \pi^2 E W_{xc}}{\lambda^2} \leq \frac{k_{pg} W_{xc} f_y}{\gamma_{a1}} & , \text{ para } \lambda > \lambda_r & (29) \end{cases}$$

enquanto para o estado limite FLM é calculado conforme as expressões:

$$M_{Rd} = \begin{cases} \frac{k_{pg} W_{xc} f_y}{\gamma_{a1}} & , \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{k_{pg}}{\gamma_{a1}} \left[1 - 0,3 \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] W_{xc} f_y & , \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r, \\ \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{0,90 k_{pg} E k_c W_{xc}}{\lambda^2} & , \text{ para } \lambda > \lambda_r \end{cases} \quad (30)$$

$$M_{Rd} = \begin{cases} \frac{k_{pg} W_{xc} f_y}{\gamma_{a1}} & , \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{k_{pg}}{\gamma_{a1}} \left[1 - 0,3 \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] W_{xc} f_y & , \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r, \\ \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{0,90 k_{pg} E k_c W_{xc}}{\lambda^2} & , \text{ para } \lambda > \lambda_r \end{cases} \quad (31)$$

$$M_{Rd} = \begin{cases} \frac{k_{pg} W_{xc} f_y}{\gamma_{a1}} & , \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{k_{pg}}{\gamma_{a1}} \left[1 - 0,3 \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] W_{xc} f_y & , \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r, \\ \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{0,90 k_{pg} E k_c W_{xc}}{\lambda^2} & , \text{ para } \lambda > \lambda_r \end{cases} \quad (32)$$

em que os valores de λ , λ_p e λ_r são determinados por meio das equações sintetizadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Equações para determinação dos índices de esbeltez dos estados limites FLT e FLM.

| Estado limite | λ | λ_p | λ_r |
|---------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| FLT | $\frac{L_b}{r_{yT}}$ | $1,10 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ | $\pi \sqrt{\frac{E}{0,7 f_y}}$ |
| FLM | $\frac{b_f}{2t_f}$ | $0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ | $0,95 \sqrt{\frac{k_c E}{0,7 f_y}}$ |

Fonte: Adaptado de NBR 8800 (ABNT, 2008).

O parâmetro k_{pg} pode ser determinado conforme a Equação (33).

$$k_{pg} = 1 - \frac{a_r}{1200 + 300 a_r} \left(\frac{h_c}{t_w} - 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right) \leq 1, \quad (33)$$

em que a_r é a relação entre a área da alma e da mesa comprimida, sendo que esta relação não pode ser superior a 10, e h_c é o dobro da distância entre o centro geométrico da seção e a face interna da mesa comprimida.

Por se tratar da verificação ao estado limite FLM, o valor de k_c é calculado conforme Equação (23) apresentada anteriormente.

3.5.5 Determinação da Força Cortante Resistente de Cálculo

A determinação da força cortante resistente de cálculo de um elemento, segundo a NBR 8800:2008, é realizada considerando a flexão da peça em seus eixos principais de inércia. Segundo a norma, o elemento constituinte de perfis I e U responsável por resistir aos esforços cortantes, quando a seção se encontra submetida a flexão em torno do eixo de maior inércia, é a alma, cuja resistência de cálculo pode ser determinada como:

$$V_{Rd} = \begin{cases} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} & , \text{ para } \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{\lambda_p V_{pl}}{\lambda \gamma_{a1}} & , \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r, \\ 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} & , \text{ para } \lambda > \lambda_r \end{cases} \quad (34)$$

$$(35)$$

$$(36)$$

em que os valores de λ , λ_p e λ_r são determinados conforme as Equações (37) a (39).

$$\lambda = \frac{h}{t_w}, \quad (37)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}}, \quad (38)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}}, \quad (39)$$

sendo k_v um parâmetro relativo à utilização de enrijecedores, sendo calculado por meio da expressão:

$$k_v = \begin{cases} 5,0, \text{ para } \begin{cases} \text{almas sem enrijecedores transversais,} \\ \frac{a}{h} > 3, \text{ ou} \\ \frac{a}{h} > \left[\frac{260}{h/t_w}\right]^2 \end{cases} \\ 5 + \frac{5}{(a/h)^2}, \text{ para demais casos} \end{cases}, \quad (40)$$

$$(41)$$

em que a é a distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores transversais adjacentes e V_{pl} é a força cortante referente à plastificação da alma por cisalhamento, obtido por meio da Equação (42).

$$V_{pl} = 0,60 A_w f_y, \quad (42)$$

em que A_w é a área efetiva de cisalhamento, calculada como:

$$A_w = dt_w. \quad (43)$$

Em contrapartida, em seções I e U fletidas em relação ao eixo de menor inércia, os elementos resistentes aos esforços cortantes são as mesas. A

determinação da força cortante resistente de cálculo nesse caso segue o mesmo procedimento apresentado para a determinação da resistência da alma, sendo que k_v é igual a 1,2 para todos os casos, h deve ser substituído pela metade da largura das mesas, t_w deve ser substituído pela espessura média das mesas e A_w passa a ser determinada conforme a Equação (44) (ABNT, 2008).

$$A_w = 2b_f t_f, \quad (44)$$

3.5.6 Determinação da Força Axial Resistente de Cálculo

A NBR 8800:2008 determina a resistência a força axial em função da forma como esse esforço se manifesta no elemento analisado, podendo ser um esforço de tração ou de compressão.

A determinação da resistência de cálculo a esforços axiais de tração é realizada de modo a garantir que não ocorra o escoamento das fibras da mesma. Essa verificação é feita por meio da Equação (45).

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}}, \quad (45)$$

em que A_g é a área bruta da seção transversal do elemento analisado.

Já para elementos solicitados a esforços de compressão, é necessário considerar os fenômenos de flambagem local e global da peça, o que é feito por meio da incorporação de fatores de redução à Equação (45). Dessa forma, a resistência de cálculo a esforços axiais de compressão é obtida conforme a Equação (46).

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}}, \quad (46)$$

sendo que χ representa o fator de redução referente à flambagem global da peça e Q representa o fator de redução referente à flambagem local de suas chapas.

O valor de χ é tomado conforme a expressão:

$$\chi = \begin{cases} 0,658\lambda_0^2 & , \text{ para } \lambda_0 \leq 1,5 \\ \frac{0,877}{\lambda_0^2} & , \text{ para } \lambda_0 > 1,5' \end{cases} \quad (47)$$

$$(48)$$

em que λ_0 representa o índice de esbeltez reduzido, calculado como:











$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}}, \quad (49)$$

o qual N_e refere-se à força axial de flambagem elástica. Esse parâmetro é verificado a partir do anexo E da norma, que considera que a flambagem pode ocorrer em torno dos eixos principais de inércia da peça, ou por torção em relação ao eixo longitudinal da mesma. O valor de N_e para o eixo principal de inércia x é obtido por meio da Equação (50).

$$N_e = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2}, \quad (50)$$

A Equação (50) pode ser estendida de forma análoga ao eixo y de menor inércia. O parâmetro $K_x L_x$ refere-se ao comprimento de flambagem em relação ao eixo x . A Tabela 10 apresenta os valores teóricos e recomendados para K_x ou K_y em função das vinculações do elemento analisado.

Tabela 10 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados.

| | | | | | | |
|--|--|--|---|--|--|--|
| Linha tracejada indica a linha elástica de flambagem | (a)  | (b)  | (c)  | (d)  | (e)  | (f)  |
| Valores teóricos de K_x ou K_y | 0,5 | 0,7 | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 2,0 |
| Valores recomendados | 0,65 | 0,80 | 1,2 | 1,0 | 2,1 | 2,0 |
| Código para condição de apoio |  | Rotação e translação impedidas | | | | |
| |  | Rotação livre, translação impedida | | | | |
| |  | Rotação impedida, translação livre | | | | |
| |  | Rotação e translação livres | | | | |

Fonte: Adaptado de NBR 8800 (ABNT, 2008, p. 125).

Paralelamente, verifica-se o valor de N_{ez} para a flambagem por torção em relação ao eixo longitudinal, que é calculado por meio da Equação (51).

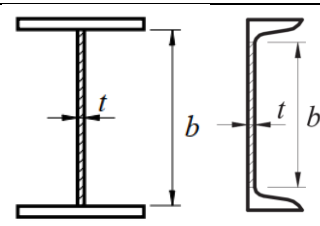
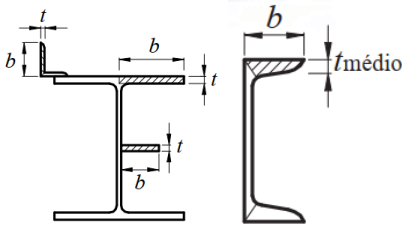
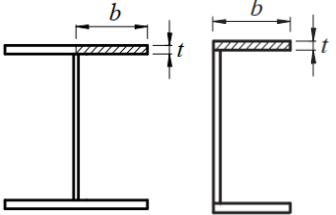
$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right], \quad (51)$$

em que $K_z L_z$ representa o comprimento de flambagem por torção, e r_0 representa o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento.

Já o fator Q presente na Equação (46) é obtido através do Anexo F da norma, que classifica os elementos constituintes dos perfis como AA (quando as duas bordas longitudinais do elemento estão vinculadas) ou AL (quando apenas uma das bordas longitudinais está vinculada).

Previamente ao cálculo do fator Q , verifica-se a relação entre a largura e a espessura do elemento (b/t). Caso essa relação seja inferior ao valor limite, $(b/t)_{lim}$, o fator Q possui valor igual a 1,00. O valor de $(b/t)_{lim}$ é obtido em função da classificação do elemento. A Tabela 11 apresenta a classificação dos elementos constituintes de perfis I e U, assim como a determinação de $(b/t)_{lim}$.

Tabela 11 – Valores de $(b/t)_{lim}$.

| Elemento | Grupo | Descrição do elemento | Alguns exemplos com indicação de b e t | $(b/t)_{lim}$ |
|----------|-------|--|--|---------------------------------|
| AA | 2 | Alma de seções I, H ou U |  | $1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ |
| AL | 4 | Mesas de seções I, H, T ou U laminados |  | $0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ |
| | 5 | Mesas de seções I, H T ou U soldados |  | $0,64 \sqrt{\frac{E}{f_y/k_c}}$ |

Fonte: Adaptado de NBR 8800 (ABNT, 2008, p. 128).

Caso a relação b/t ultrapasse o valor limite, o fator Q passa a ser calculado por meio da Equação (52).

$$Q = Q_s Q_a, \quad (52)$$

em que Q_s é o fator de redução associado a flambagem de elementos AL e Q_a é o fator de redução associado a flambagem de elementos AA.

Em elementos AL do grupo 4, o fator Q_s é calculado como:

$$Q_s = \begin{cases} 1,415 - 0,74 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}} & , \text{ para } 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \frac{0,69E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2} & , \text{ para } \frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}, \quad (53)$$

$$Q_s = \begin{cases} 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}} & , \text{ para } 0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} < \frac{b}{t} \leq 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \\ \frac{0,90E k_c}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2} & , \text{ para } \frac{b}{t} > 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \end{cases}. \quad (54)$$

enquanto para elementos AL do grupo 5 é calculado como:

$$Q_s = \begin{cases} 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}} & , \text{ para } 0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} < \frac{b}{t} \leq 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \\ \frac{0,90E k_c}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2} & , \text{ para } \frac{b}{t} > 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \end{cases}. \quad (55)$$

$$Q_s = \begin{cases} 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}} & , \text{ para } 0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} < \frac{b}{t} \leq 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \\ \frac{0,90E k_c}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2} & , \text{ para } \frac{b}{t} > 1,17 \sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} \end{cases}. \quad (56)$$

Em elementos AA, o fator Q_a é obtido por meio da Equação (57).

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g}, \quad (57)$$

em que A_{ef} é a área efetiva da seção transversal, calculada como:

$$A_{ef} = A_g - \sum (h - b_{ef}) t_w, \quad (58)$$

sendo b_{ef} calculado conforme Equação (24) vista anteriormente.

3.5.7 Verificação da segurança frente a esforços combinados

Em seu item 5.5.1, a NBR 8800:2008 apresenta o critério de segurança que deve ser verificado quando o elemento estrutural se encontra submetido a efeitos combinados de momentos fletores, força axial e forças cortantes.

Quando o elemento se encontra submetido simultaneamente a momentos fletores e força axial é necessário realizar a seguinte verificação de segurança:

$$\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0, \text{ para } \frac{N_{sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2, \text{ ou} \quad (59)$$

$$\frac{N_{sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0, \text{ para } \frac{N_{sd}}{N_{Rd}} < 0,2, \quad (60)$$

em que os parâmetros com subíndice Sd representam esforços solicitantes de cálculo e os parâmetros com subíndice Rd representam os esforços resistentes de cálculo.

Também deve ser verificada a segurança com relação aos esforços cortantes:

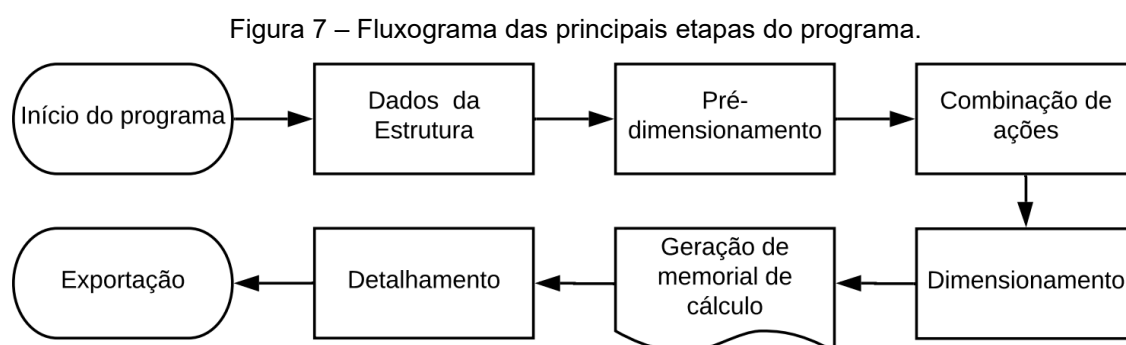
$$V_{Rd} \geq V_{sd}. \quad (61)$$

4 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Este capítulo visa apresentar as funcionalidades que foram implementadas no *software* desenvolvido. Apresenta-se inicialmente uma visão geral da divisão do funcionamento do programa, sendo cada um de seus módulos detalhados em seções específicas.

4.1 VISÃO GERAL DO PROGRAMA

O programa desenvolvido realiza o dimensionamento automatizado da estrutura em aço de um galpão similar ao apresentado na Figura 3, à luz da norma ABNT NBR 8800:2008. Para o dimensionamento do galpão, o programa segue o processo apresentado no fluxograma da Figura 7.



Fonte: Autoria própria.

Além disso, o *software* apresenta ainda uma funcionalidade extra voltada ao ensino em cursos de graduação: em uma aba destinada a simulações, o usuário pode definir as dimensões de um elemento estrutural que deseja dimensionar, inserir manualmente os valores dos esforços atuantes em uma seção qualquer, para posteriormente obter um memorial de cálculo detalhado com o dimensionamento do elemento em estudo.

4.2 INÍCIO DO PROGRAMA

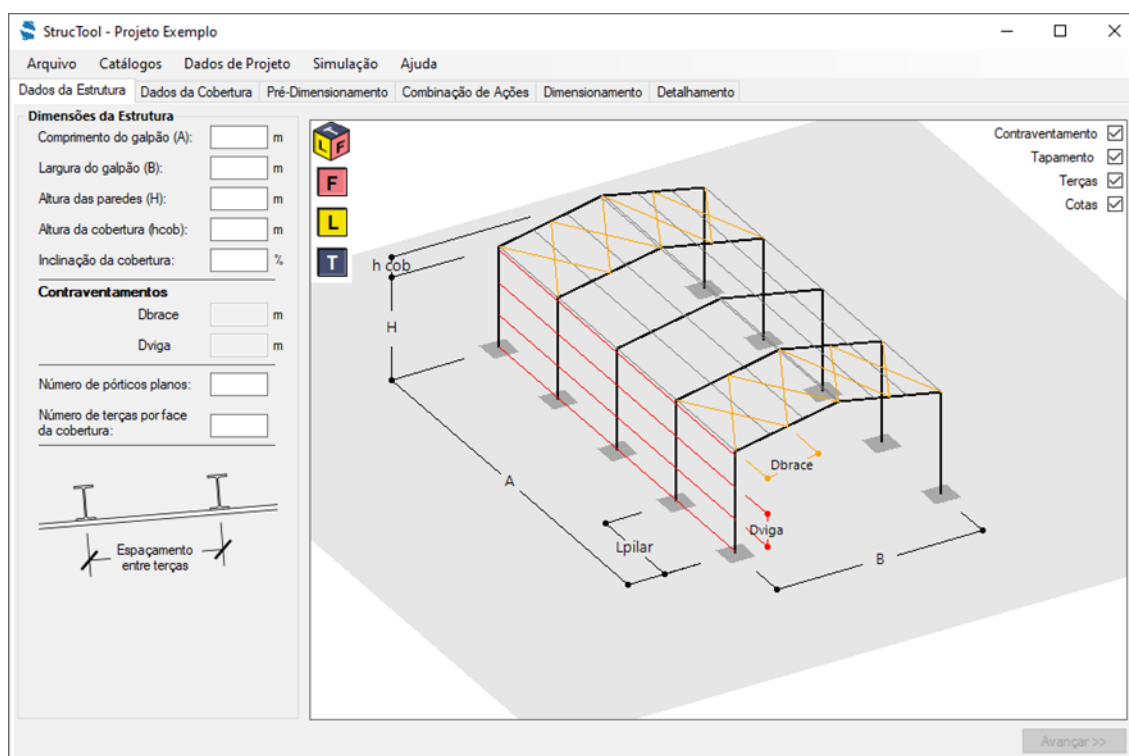
Ao ser iniciado, o programa solicita ao usuário o nome e tipo do projeto em função do tipo de estrutura desejada. Ao optar pelo dimensionamento de estruturas metálicas, o programa carrega automaticamente os valores das propriedades

mecânicas gerais do aço de acordo com o recomendado pela NBR 8800:2008, assim como os valores dos coeficientes de ponderação para combinação normal. Também são carregados catálogos de perfis e tipos de aço pré-definidos.

4.3 DADOS DA ESTRUTURA

O primeiro passo para o dimensionamento da estrutura de um galpão em aço corresponde à entrada de dados. Nessa etapa, o usuário deve inserir cada uma das dimensões relevantes da estrutura: comprimento, largura, altura das paredes, altura da cobertura, inclinação da cobertura, distância entre os contraventamentos de cobertura e distância entre as vigas de tapamento lateral. Além disso, deve informar o número de pórticos planos que compõem a estrutura e o número de terças por face da cobertura. A Figura 8 apresenta a tela para inserção das dimensões da estrutura.

Figura 8 – Tela para preenchimento dos dados referentes à geometria da estrutura.



Fonte: Autoria própria.

Ao atualizar cada dimensão da estrutura, o programa gera uma visualização tridimensional atualizada da estrutura para melhor compreensão do usuário. Esta visualização pode ser rotacionada livremente, porém vistas pré-definidas (vista frontal, lateral, superior) permitem representar graficamente o galpão em duas dimensões.

Também há a possibilidade de ocultar ou exibir cada grupo de elementos que compõem a estrutura (terças, vigas de tapamento e tirantes de contraventamento) para melhor entendimento.

Uma vez definidas as dimensões da estrutura, o programa conduz o usuário à aba “Dados da Cobertura”. Nela deverão ser inseridos os dados referentes à telha escolhida, conforme apresentado na Figura 9. Com base nesses dados, o programa estima o peso próprio do telhado.

Figura 9 – Tela para preenchimento dos dados relativos à cobertura.

Fonte: Autoria própria.

4.4 PRÉ-DIMENSIONAMENTO

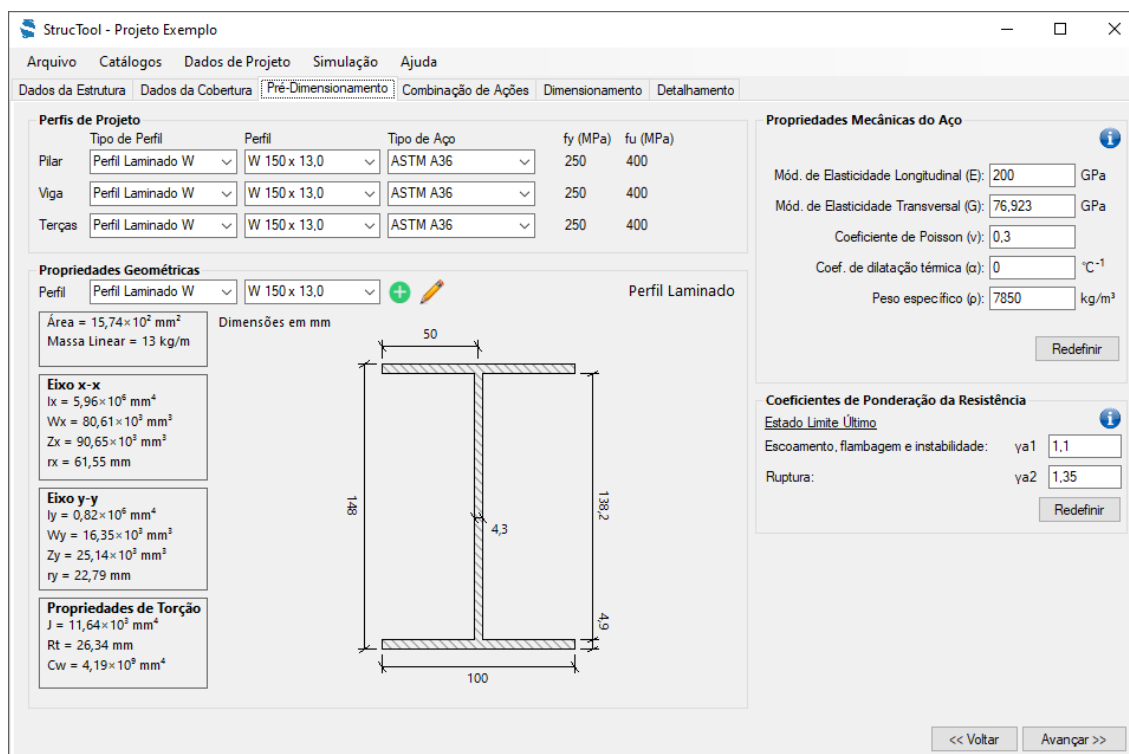
No pré-dimensionamento, o usuário deve selecionar os perfis e os aços utilizados nas terças, vigas e pilares. Deve informar ainda o tipo de aço de cada um desses perfis, de modo que o programa seja capaz de estimar a resistência isolada dos elementos estruturais.

Adicionalmente, o usuário pode optar por alterar os valores das propriedades mecânicas do aço e dos coeficientes de ponderação da resistência dos materiais

(cujos valores são definidos por padrão, em acordo com a NBR 8800:2008), sem a necessidade de abrir uma tela avulsa para isso.

A Figura 10 apresenta a tela referente ao pré-dimensionamento da estrutura.

Figura 10 – Tela de pré-dimensionamento.



Fonte: Autoria própria.

4.4.1 Banco de Dados de Perfis

Para auxiliar o usuário que se inicia no uso da ferramenta, um banco de dados de perfis metálicos foi implementado no *software*, o qual conta com uma grande variedade de perfis de seção I, soldados e laminados, e U laminados. Porém, caso o usuário necessite, poderá cadastrar um novo perfil com as dimensões desejadas, editar um perfil já existente ou apagar um perfil criado. Ao criar um novo perfil ou modificar um já existente, o programa calcula automaticamente a massa linear e as propriedades geométricas relevantes ao dimensionamento da estrutura, os quais podem ser editados conforme as necessidades do usuário.

A Figura 11 apresenta a interface gráfica em que são exibidos os perfis pré-programados e as propriedades geométricas da seção transversal e a Figura 12 apresenta as janelas de criação e edição de perfis.

Figura 11 – Tela de catálogo de perfis.

Catálogo de Perfis

Tipo de perfil: Perfil Laminado W
 Perfil: W 150 x 13,0

Dados Gerais
 Massa Linear = 13 kg/m
 Área = $15,74 \times 10^2 \text{ mm}^2$

Eixo x-x
 $I_x = 5,96 \times 10^6 \text{ mm}^4$
 $W_x = 80,61 \times 10^3 \text{ mm}^3$
 $Z_x = 90,65 \times 10^3 \text{ mm}^3$
 $r_x = 61,55 \text{ mm}$

Eixo y-y
 $I_y = 0,82 \times 10^6 \text{ mm}^4$
 $W_y = 16,35 \times 10^3 \text{ mm}^3$
 $Z_y = 25,14 \times 10^3 \text{ mm}^3$
 $r_y = 22,79 \text{ mm}$

Propriedades de Torção
 $J = 11,64 \times 10^3 \text{ mm}^4$
 $R_t = 26,34 \text{ mm}$
 $C_w = 4,19 \times 10^9 \text{ mm}^6$

Novo Perfil Editar Perfil Apagar Perfil Voltar

Fonte: Autoria própria.

Figura 12 – Tela de (a) criação de um novo perfil; (b) edição de perfil.

Novo Perfil

Dados do Perfil: Tipo de Perfil: Perfil Laminado W; Nome do Perfil: [] Confirmar

Propriedades Geométricas: Editar; Área: [] mm²

Eixo x-x: I_x [] mm⁴; W_x [] mm³; Z_x [] mm³; r_x [] mm

Eixo y-y: I_y [] mm⁴; W_y [] mm³; Z_y [] mm³; r_y [] mm

Propriedades de Torção: J [] mm⁴; R_t [] mm; C_w [] mm⁶

Massa Linear: [] kg/m; Soldado: [] Redefinir

Concluir Cancelar

Editar Perfil

Dados do Perfil: Tipo de Perfil: Perfil Laminado W; Nome do Perfil: W 150 x 13,0 Confirmar

Propriedades Geométricas: Editar; Área: 1574,26 mm²

Eixo x-x: I_x 5964801,46 mm⁴; W_x 80605,43 mm³; Z_x 90650,68 mm³; r_x 61,55 mm

Eixo y-y: I_y 817582,32 mm⁴; W_y 16351,65 mm³; Z_y 25138,83 mm³; r_y 22,79 mm

Propriedades de Torção: J 11635,75 mm⁴; R_t 26,34 mm; C_w 4185532984,65 mm⁶

Massa Linear: 13 kg/m; Laminado: [] Redefinir

Concluir Cancelar

(a)

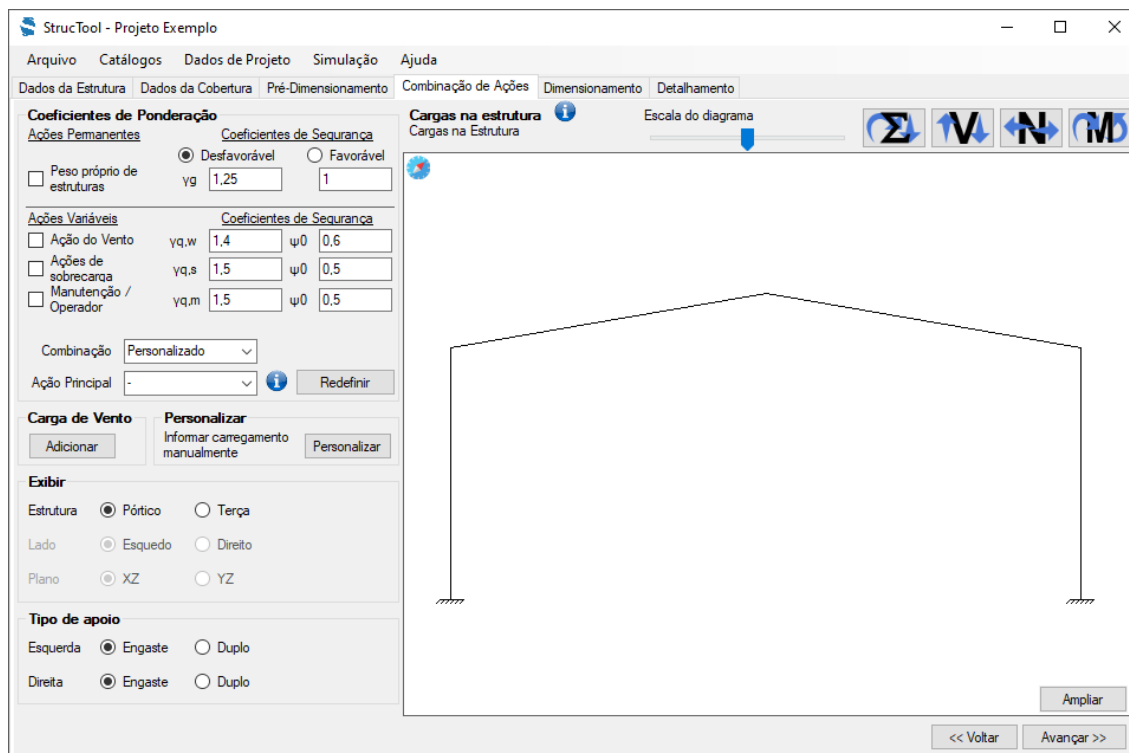
(b)

Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Banco de Dados dos Tipos de Aço

O banco de dados dos tipos de aço conta com uma variedade pré-definida de aços normatizados, cujas propriedades mecânicas de interesse são mostradas ao usuário. Ao acessá-lo, o programa exibe a denominação do aço, sua resistência ao

Figura 15 – Tela de combinação de ações.



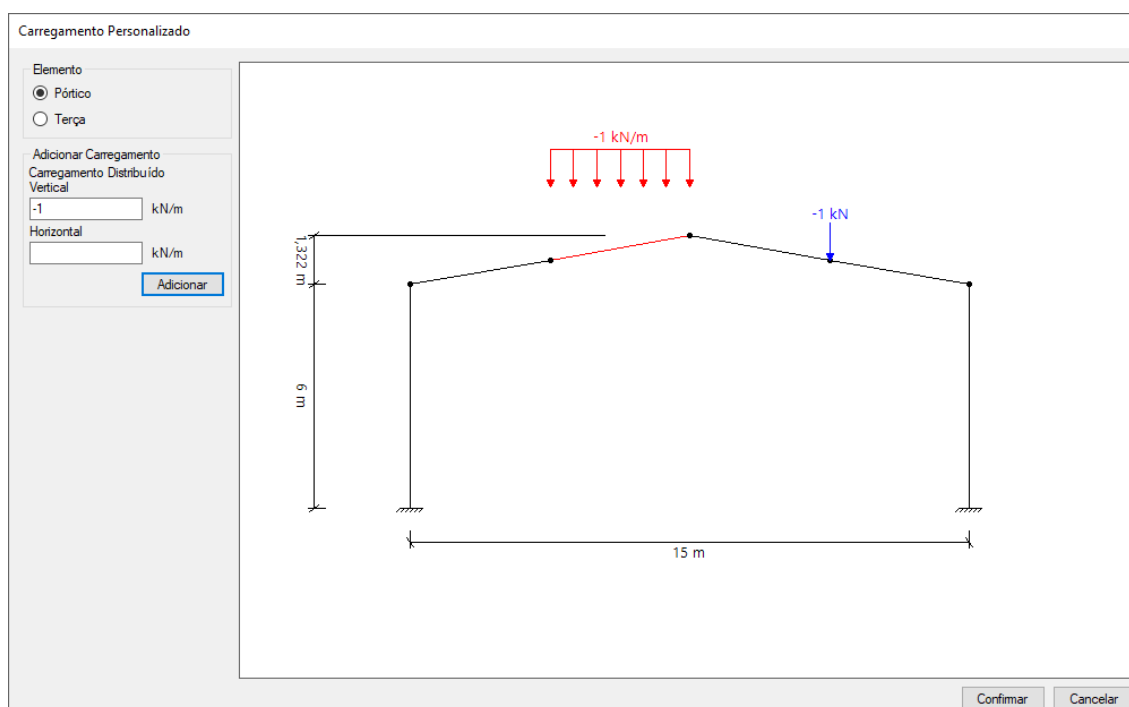
Fonte: Autoria própria.

A cada alteração feita pelo usuário, o programa atualiza a visualização bidimensional do pórtico ou da terça e calcula os esforços atuantes na estrutura. Os esforços normais, forças cortantes e momentos fletores solicitantes são mostrados por meio de botões específicos que permitem visualizar os resultados da análise estrutural.

Por ora, o usuário insere o valor das ações provenientes do vento na estrutura em uma tela à parte. Futuramente este programa será integrado a um módulo de cálculo das forças do vento, de modo a automatizar a entrada dos dados.

Caso o usuário deseje inserir manualmente os valores das ações atuantes na estrutura, há a possibilidade de entrar em uma nova tela de personalização de ações, onde é possível clicar nas barras ou nos nós do pórtico ou da terça e inserir carregamentos nos mesmos. A Figura 16 apresenta um exemplo de ações inseridas manualmente utilizando essa funcionalidade.

Figura 16 – Tela de personalização de ações.



Fonte: Autoria própria.

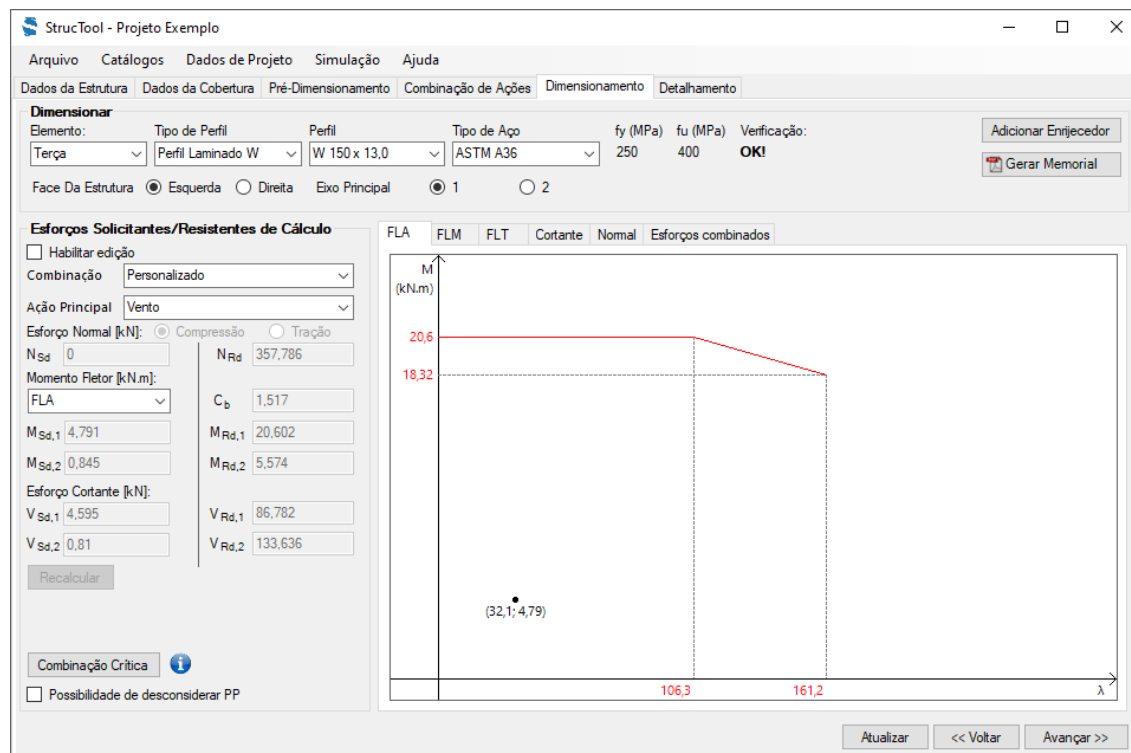
4.6 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento dos elementos que compõem a estrutura do galpão é realizado conforme apresentado nos itens 3.5.4 a 3.5.7, em que os esforços atuantes em cada elemento são:

- a) Terças: Momentos fletores e esforço cortante em ambos os eixos principais;
- b) Vigas e pilares: Momento fletor e esforço cortante no eixo de maior inércia; além de esforço axial, podendo ser de tração ou compressão em função da combinação analisada.

Nessa etapa são exibidos graficamente os resultados dos esforços solicitantes e resistentes de cada elemento isolado. Opcionalmente, há a possibilidade de alterar a escolha do perfil e do tipo de aço de cada elemento, de modo a ter uma melhor compreensão do comportamento do elemento com as novas especificações. Também é possível alterar os valores dos esforços solicitantes no elemento, caso seja de interesse do usuário, conforme visto na Figura 17.

Figura 17 – Tela de dimensionamento dos elementos estruturais.



Fonte: Autoria própria.

4.7 GERAÇÃO DE MEMORIAL DE CÁLCULO

Após realizado o dimensionamento dos elementos, o usuário possui a opção de gerar automaticamente um memorial de cálculo detalhado. O arquivo gerado é salvo em formato “.pdf” em uma pasta da escolha do usuário. O Apêndice A apresenta um exemplo de memorial gerado nessa etapa.

4.8 DETALHAMENTO

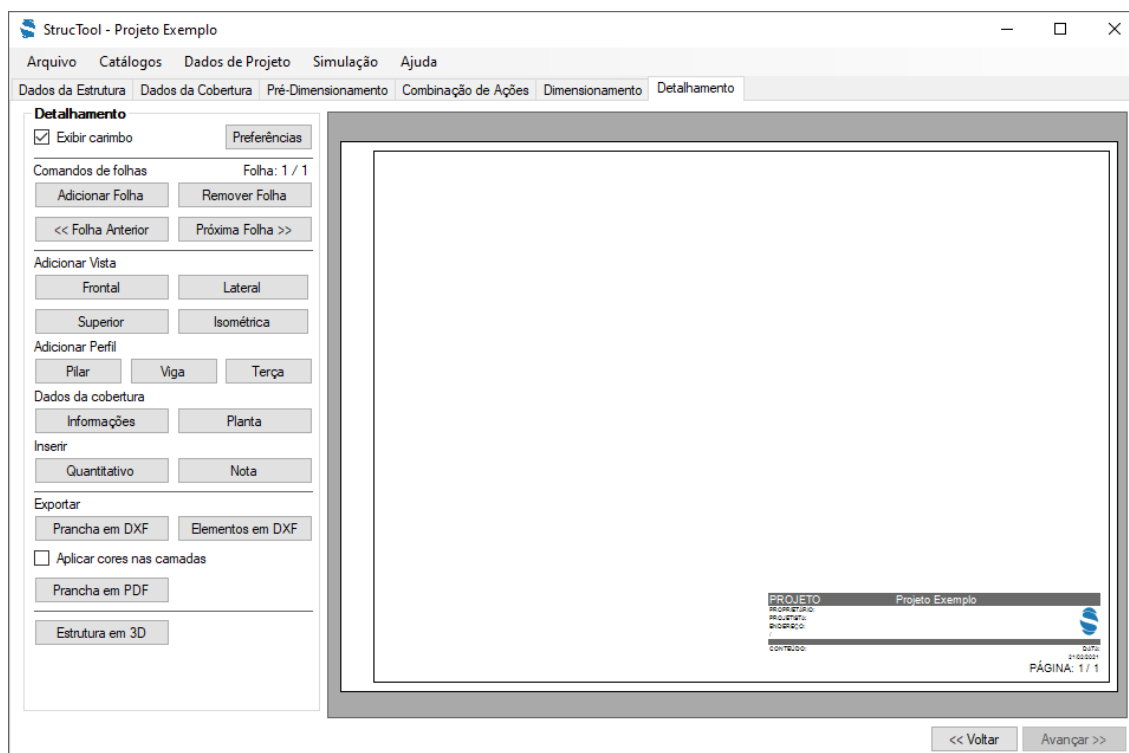
Feito o dimensionamento, o usuário segue para a aba de detalhamento, onde é possível criar pranchas nos formatos A0 à A4, nas orientações paisagem ou retrato. Nessa etapa é possível optar por exibir ou não o carimbo na folha, assim como editar o que será exibido no carimbo, como: nome do projeto, nome do proprietário, nome do projetista, endereço, conteúdo da folha, data e número da página.

Na prancha é possível adicionar as vistas frontal, lateral e superior, perspectiva isométrica, representações dos perfis utilizados nos pilares, vigas e terças

da estrutura, informações sobre a cobertura, uma planta de cobertura, um quantitativo dos materiais utilizados e notas com conteúdo definido pelo usuário. Em cada uma das vistas, representações de perfil ou na planta de cobertura é possível alterar a escala do desenho, conforme a necessidade.

A Figura 18 apresenta a tela de detalhamento e montagem das pranchas.

Figura 18 – Tela de detalhamento e montagem das pranchas.



Fonte: Autoria própria.

Para uma melhor visualização da estrutura projetada, há a opção também de observar a estrutura em 3D, onde é apresentada a estrutura com uma quantidade maior de detalhes.

4.9 EXPORTAÇÃO

Esta é a etapa final do programa, em que o usuário poderá exportar as pranchas diretamente em formato “.pdf” ou em formato “.dxf”. A exportação em “.dxf” pode ser feita de duas formas:

- a) A exportação direta das pranchas montadas, onde já é realizado um layout para plotagem das mesmas; ou

- b) Exportar as vistas da estrutura, os perfis e uma estrutura em 3D, em escala 1:1, utilizando a unidade em mm, para montagem manual das pranchas.

O Apêndice C apresenta um exemplo de prancha gerada diretamente em formato “.pdf”.

4.10 SIMULAÇÃO

O *software* também possui a função de realizar uma simulação de um elemento estrutural qualquer, com as especificações informadas pelo usuário. Dessa forma o usuário não fica limitado a analisar apenas os elementos do galpão pré-estabelecido. Essa ferramenta pode ser de interesse didático, uma vez que não trata de elementos com características genéricas.

A Figura 19 apresenta a tela de simulações do *software*. Nela são exibidas todas as propriedades geométricas do perfil escolhido em conjunto com os demais parâmetros de entrada a serem preenchidos pelo usuário.

Figura 19 – Tela de simulações.

The screenshot displays the 'Simulação' (Simulation) window with the following sections:

- Propriedades Perfil (Profile Properties):**
 - Tipo de Perfil: Perfil Laminado W
 - Perfil: W 150 x 13.0
 - Tipo de Aço: ASTM A36
 - fy (MPa): 250
 - fu (MPa): 400
 - Área = $15,74 \times 10^2 \text{ mm}^2$
 - Massa Linear = 13 kg/m
 - Dimensões em mm: 50, 148, 138,2, 4,3, 4,9, 100
 - Perfil Laminado (+)
- Eixo x-x (Axis x-x):**
 - $I_x = 5,96 \times 10^6 \text{ mm}^4$
 - $W_x = 80,61 \times 10^3 \text{ mm}^3$
 - $Z_x = 90,65 \times 10^3 \text{ mm}^3$
 - $r_x = 61,55 \text{ mm}$
- Eixo y-y (Axis y-y):**
 - $I_y = 0,82 \times 10^6 \text{ mm}^4$
 - $W_y = 16,35 \times 10^3 \text{ mm}^3$
 - $Z_y = 25,14 \times 10^3 \text{ mm}^3$
 - $r_y = 22,79 \text{ mm}$
- Propriedades de Torção (Torsion Properties):**
 - $J = 11,64 \times 10^3 \text{ mm}^4$
 - $R_t = 26,34 \text{ mm}$
 - $C_w = 4,19 \times 10^9 \text{ mm}^4$
- Dados do Elemento (Element Data):**
 - Comprimento Destruado (m): [input field]
 - Comprimento de Flambagem (m):
 - Eixo Principal 1: [input field]
 - Eixo Principal 2: [input field]
 - Coefficiente de flambagem por flexão:
 - (a) [diagram]
 - (b) [diagram]
 - (c) [diagram]
 - Kx
 - Ky
 - (d) [diagram]
 - (e) [diagram]
 - (f) [diagram]
- Solicitações de Cálculo (Calculation Requests):**
 - Momento (kN.m):
 - Eixo Principal 1: [input field]
 - Eixo Principal 2: [input field]
 - cb: [input field]
 - Cortante (kN):
 - Eixo Principal 1: [input field]
 - Eixo Principal 2: [input field]
 - kv: [input field]
 - Normal (kN):
 - Tração
 - Compressão
 - ya1: [input field]
 - 1,1: [input field]

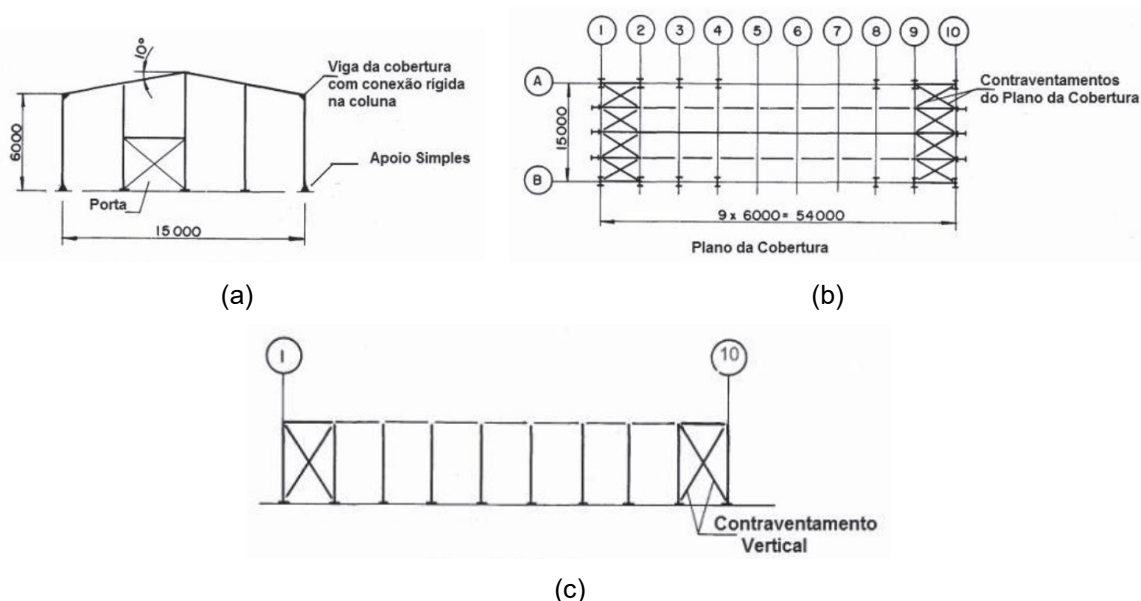
Buttons: Gerar Memorial, Voltar

Fonte: Autoria própria.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos por meio do *software* foram comparados com os apresentados por Pravia, Drehmer e Mesacasa Jr. (2018) no manual de dimensionamento de galpões em aço para usos gerais. A estrutura dimensionada no manual utilizado de referência é apresentada na Figura 20, em que o perfil utilizado nos pilares e vigas da estrutura é o perfil W310×38,7 e o perfil utilizado nas terças da cobertura é o perfil U152×15,6 (denominado no *software* de C152,40×15,62).

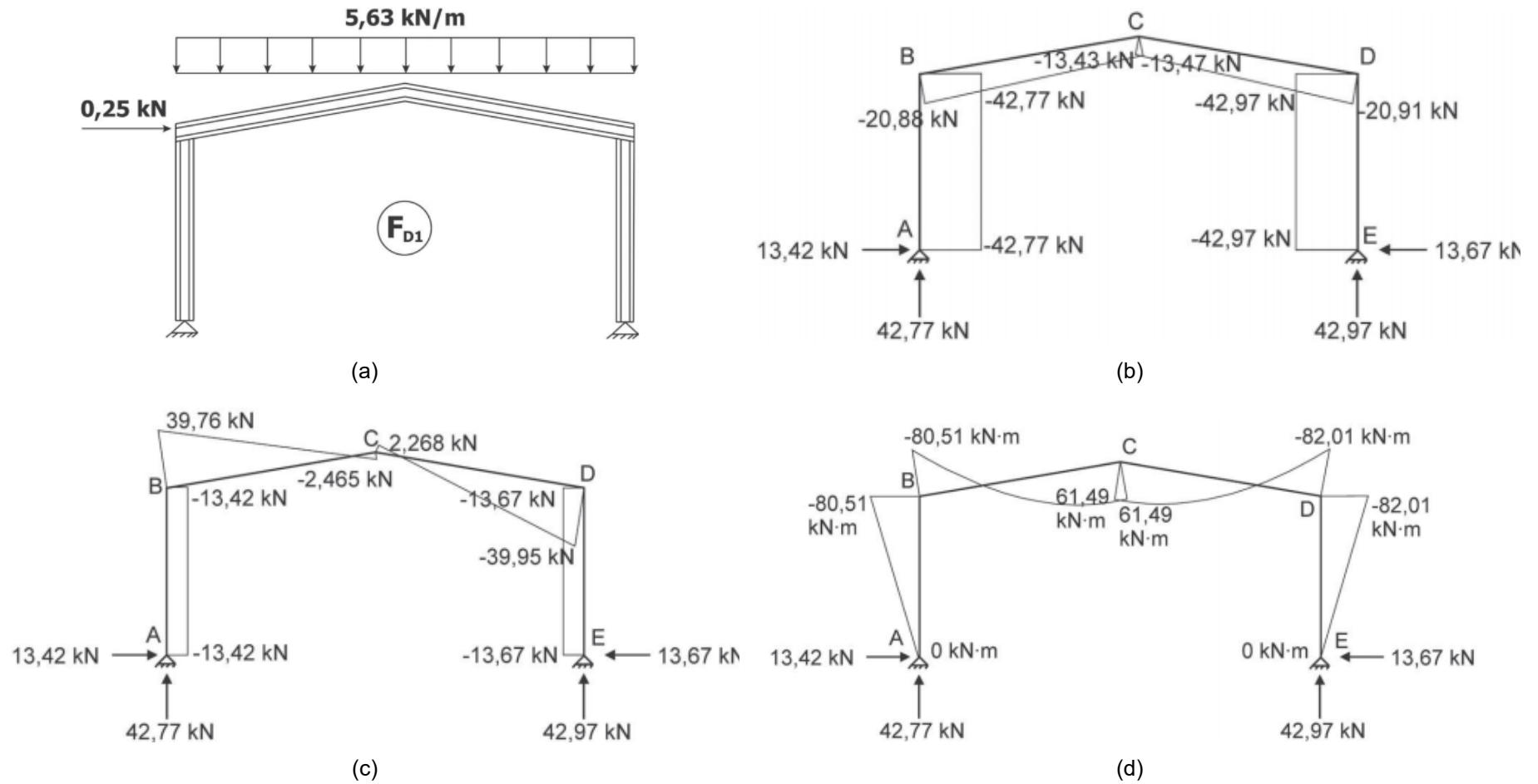
Figura 20 – Vista (a) Frontal; (b) Superior; (c) Lateral da estrutura dimensionada.



Fonte: Adaptado de Pravia, Drehmer e Mesacasa Jr. (2018).

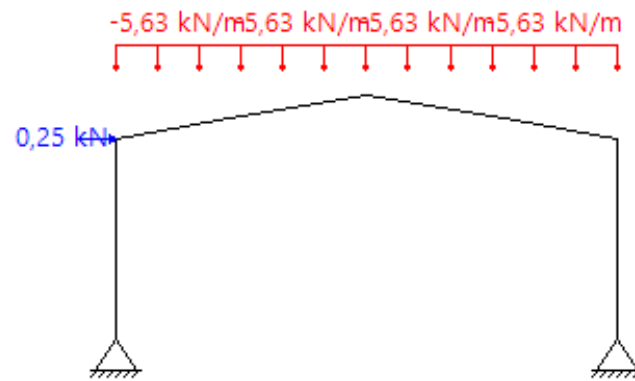
Como o levantamento de ações foi feito utilizando considerações diferentes entre o *software* e o manual, foi utilizada a função de carregamento personalizado (descrito no item 4.5), de modo que as ações atuantes na estrutura fossem iguais em ambas as estruturas. A Figura 21 apresenta o carregamento obtido no manual para uma determinada combinação, assim como os diagramas de esforços normais, esforços cortantes e momentos fletores no pórtico. Já a Figura 22 apresenta essas informações obtidas por meio do *software*.

Figura 21 – Desenho esquemático de (a) Carregamento atuante no pórtico; Diagrama de (b) esforços normais; (c) esforços cortantes; (d) momentos fletores, apresentados pelo manual.

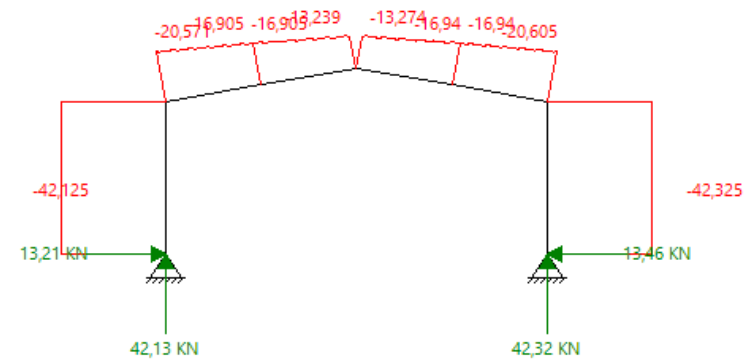


Fonte: Adaptado de Pravia, Drehmer e Mesacasa Jr. (2018).

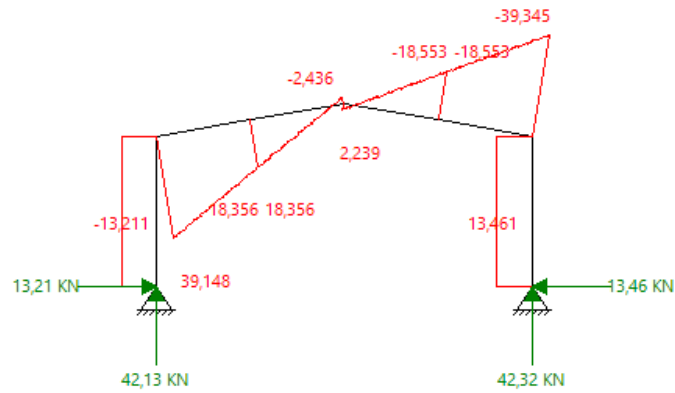
Figura 22 – Desenho esquemático de (a) Carregamento atuante no pórtico; Diagrama de (b) esforços normais; (c) esforços cortantes; (d) momentos fletores, apresentados pelo *software*.



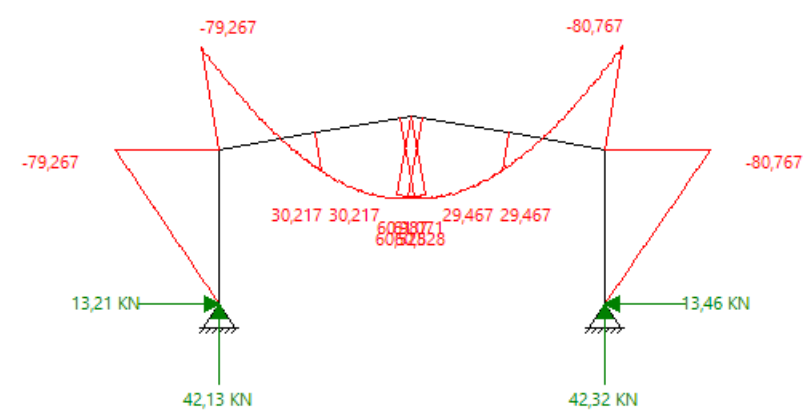
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 12 sintetiza os esforços internos máximos observados nos diagramas do manual e do *software* e faz uma comparação entre os valores obtidos.

Tabela 12 – Comparação entre os esforços internos máximos no pórtico do manual e do *software*.

| Elemento | Momento máximo | | | Normal máximo | | | Cortante máximo | | |
|----------|----------------|-----------------|-------|---------------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|-------|
| | Manual | <i>Software</i> | Erro | Manual | <i>Software</i> | Erro | Manual | <i>Software</i> | Erro |
| Pilar | 82,01 | 80,77 | 1,51% | 42,97 | 42,33 | 1,49% | 13,67 | 13,46 | 1,54% |
| Viga | 82,01 | 80,77 | 1,51% | 20,91 | 20,61 | 1,43% | 39,95 | 39,35 | 1,50% |

Fonte: Autoria Própria.

O erro observado na comparação dos resultados é, provavelmente, decorrente à arredondamentos no processo de determinação dos esforços internos.

Já as Tabelas 13 a 17 apresentam os valores dos parâmetros referentes ao dimensionamento dos pilares do pórtico estudado. O procedimento de cálculo utilizado pelo *software* para obtenção desses valores encontra-se no Apêndice A.

Tabela 13 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes ao Estado-Limite FLA dos pilares.

| Parâmetro | Manual | <i>Software</i> | Erro |
|-----------------|--------|-----------------|--------|
| M_{pl} (kN.m) | 212,31 | 208,06 | -2,00% |
| λ | 46,72 | 50,103 | 7,24% |
| λ_p | 90,53 | 90,53 | 0,00% |
| λ_r | 137,24 | 137,24 | 0,00% |
| M_{Rd} (kN.m) | 193,00 | 189,15 | -2,00% |

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 14 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes ao Estado-Limite FLM dos pilares.

| Parâmetro | Manual | <i>Software</i> | Erro |
|-----------------|--------|-----------------|--------|
| λ | 8,50 | 8,51 | 0,06% |
| λ_p | 9,15 | 9,15 | -0,01% |
| λ_r | 23,88 | 23,89 | 0,03% |
| M_{Rd} (kN.m) | 193,00 | 189,15 | -2,00% |

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 15 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes ao Estado-Limite FLT dos pilares.

| Parâmetro | Manual | <i>Software</i> | Erro |
|-----------------|----------|-----------------|--------|
| β_1 | 0,005064 | 0,005 | -1,26% |
| M_{cr} (kN.m) | 145,64 | 142,02 | -2,49% |
| λ | 157,07 | 155,587 | -0,94% |
| λ_p | 42,38 | 42,376 | -0,01% |
| λ_r | 119,27 | 118,289 | -0,82% |
| C_b | 1,667 | 1,667 | 0,00% |
| M_{Rd} (kN.m) | 132,40 | 129,11 | -2,49% |

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 16 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes à determinação da força cortante resistente dos pilares.

| Parâmetro | Manual | Software | Erro |
|--------------------------|--------|----------|-------|
| k_v | 5 | 5 | 0,00% |
| A_w (mm ²) | 1798 | 1798 | 0,00% |
| V_{pl} (kN) | 372,19 | 372,19 | 0,00% |
| λ | 46,72 | 50,103 | 7,24% |
| λ_p | 59,22 | 59,222 | 0,00% |
| λ_r | 73,76 | 73,758 | 0,00% |
| V_{Rd} (kN) | 338,35 | 338,35 | 0,00% |

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 17 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes à determinação da força axial resistente dos pilares.

| Parâmetro | Manual | Software | Erro |
|------------------------------|---------|----------|--------|
| Parâmetros referentes à mesa | | | |
| λ | 8,51 | 8,505 | -0,06% |
| $(b/t)_{lim}$ | 13,48 | 13,483 | 0,02% |
| Q_s | 1 | 1 | 0,00% |
| λ | 46,72 | 50,103 | 7,24% |
| Parâmetros referentes à alma | | | |
| $(b/t)_{lim}$ | 35,87 | 35,875 | 0,01% |
| b_{ef} | 221,15 | 224,316 | 1,43% |
| A_{ef} (mm ²) | 4680,9 | 4502 | -3,82% |
| Q_a | 0,94 | 0,921 | -2,02% |
| Q | 0,94 | 0,921 | -2,02% |
| N_{ex} (kN) | 4705,06 | 4608,72 | -2,05% |
| N_{ey} (kN) | 398,62 | 398,46 | -0,04% |
| λ_{0y} | 2,011 | 1,974 | -1,84% |
| χ_y | 0,2169 | 0,225 | 3,73% |
| N_{Rd} (kN) | 317,80 | 317,68 | -0,04% |

Fonte: Autoria Própria.

Analisando os erros apresentados nas tabelas, pode-se perceber que o maior erro é aquele relacionado à esbelteza da alma do perfil (observado nas Tabelas 13, 16 e 17). Isso deve-se ao fato de o manual considerar o comprimento livre da alma (de 271 mm), enquanto o cálculo feito pelo *software* considera o comprimento total da alma (de 290,6 mm). O método de cálculo que utiliza o comprimento total da alma ainda pode ser utilizado, uma vez que é mais conservador, atuando, assim, a favor da segurança.

Por fim, comparou-se a verificação da segurança do elemento, calculado por meio da Equação (60). Os valores obtidos no manual e pelo *software* foram de 0,69 e 0,692, respectivamente, o que resulta em um erro de 0,29%.

Na sequência realizou-se a comparação dos valores dos parâmetros de dimensionamento das vigas do pórtico. As Tabelas 18 e 19 apresentam os resultados obtidos. Os valores dos parâmetros referentes aos Estados-Limite FLA, FLM, cálculo da força cortante resistente e determinação de Q_a e Q_s não são apresentados, já que

o procedimento de cálculo é o mesmo quando comparado ao pilar, obtendo os mesmos valores, conseqüentemente.

Tabela 18 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes ao Estado-Limite FLT das vigas.

| Parâmetro | Manual | Software | Erro |
|-----------------|----------|----------|--------|
| β_1 | 0,005064 | 0,005 | -1,26% |
| M_{pl} (kN.m) | 212,31 | 208,06 | -2,00% |
| M_r | 133,69 | 130,96 | -2,04% |
| λ | 66,44 | 65,813 | -0,94% |
| λ_p | 42,38 | 42,376 | -0,01% |
| λ_r | 119,27 | 118,289 | -0,82% |
| C_b | 1,900 | 1,800 | -5,26% |
| M_{Rd} (kN.m) | 193,00 | 189,15 | -2,00% |

Fonte: Autoria Própria.

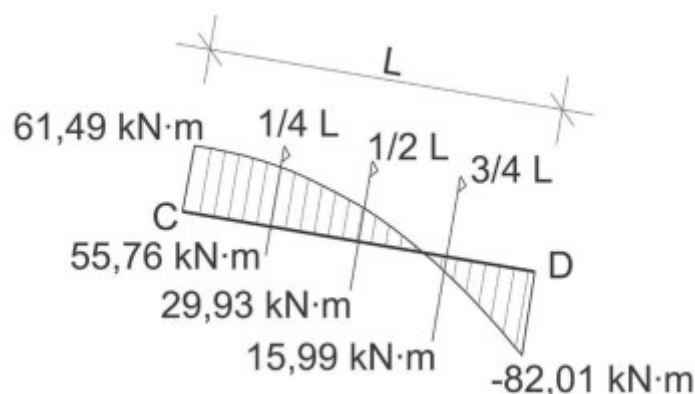
Tabela 19 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes à determinação da força axial resistente das vigas.

| Parâmetro | Manual | Software | Erro |
|----------------|---------|----------|---------|
| Q | 0,94 | 0,921 | -2,02% |
| N_{ex} (kN) | 2920,44 | 4469,80 | 53,05% |
| N_{ey} (kN) | 2227,82 | 3479,54 | 56,19% |
| λ_{oy} | 0,8506 | 0,668 | -21,47% |
| X_y | 0,7387 | 0,83 | 12,36% |
| N_{Rd} (kN) | 1082,38 | 1171,37 | 8,22% |

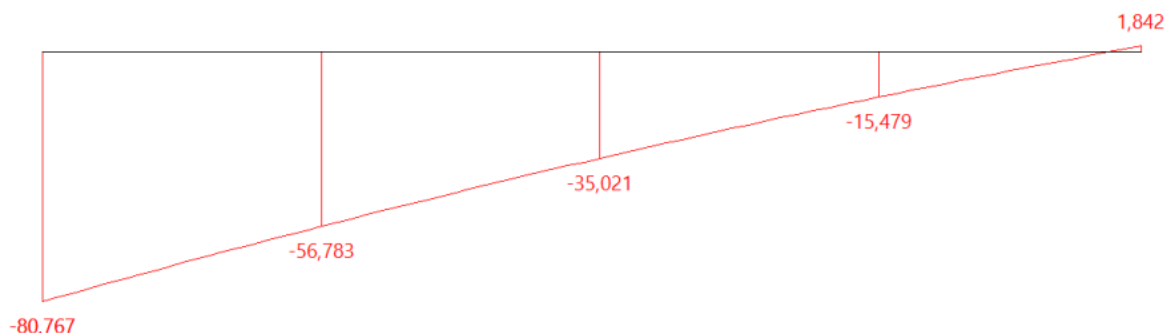
Fonte: Autoria Própria.

Na verificação das vigas percebeu-se que houve uma discrepância entre o cálculo de C_b entre o manual e o *software*. Nesse ponto o manual realizou o cálculo considerando o diagrama de momentos fletores no comprimento completo da viga (L), como observado na Figura 23, enquanto o *software* utiliza apenas a parte do diagrama referente ao comprimento destravado da viga (L_b), como apresentado na Figura 24.

Figura 23 – Diagrama de momentos fletores utilizado para o cálculo de C_b pelo manual.



Fonte: Adaptado de Pravia, Drehmer e Mesacasa Jr. (2018).

Figura 24 – Diagrama de momentos fletores utilizado para o cálculo de C_b pelo *software*.

Fonte: Autoria Própria.

Outros erros consideráveis observados na comparação foram os referentes à força axial de flambagem elástica (N_{ex} e N_{ey}). Isso deve-se ao fato de o manual realizar uma análise de segunda ordem em seu dimensionamento, o que permite a utilização de um coeficiente de flambagem (K) igual a 1,0. Como o *software* não realiza esse tipo de dimensionamento, o valor de K varia de acordo com o tipo de vinculação. No entanto foi modificado o código do *software*, para fins de comparação, de modo que o valor de K seja igual a 1,0, independente da vinculação. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Comparação dos valores utilizando $K = 1,0$.

| Parâmetro | Manual | <i>Software</i> | Erro |
|----------------|---------|-----------------|--------|
| Q | 0,94 | 0,921 | -2,02% |
| N_{ex} (kN) | 2920,44 | 2860,67 | -2,05% |
| N_{ey} (kN) | 2227,82 | 2226,90 | -0,04% |
| λ_{0y} | 0,8506 | 0,835 | -1,83% |
| X_y | 0,7387 | 0,747 | 1,12% |
| N_{Rd} (kN) | 1082,38 | 1054,52 | -2,57% |

Fonte: Autoria Própria.

Dessa forma pode-se observar que o erro relacionado a esses parâmetros diminuiu consideravelmente.

Com isso realizou-se a verificação de segurança, obtendo o valor de 0,43 no manual e 0,436 no *software* sem a modificação, resultando, assim, em um erro de 1,40%. Já no caso dos valores modificados obteve-se um valor de verificação de 0,437, que corresponde a um erro de 1,63%.

Em seguida realizou-se a comparação dos valores referentes às terças da cobertura.

No manual, as terças foram dimensionadas considerando linhas de tirantes flexíveis no centro do vão das mesmas, com objetivo de diminuir o comprimento de flambagem no eixo de menor inércia. Como o *software* não faz essa consideração, recorreu-se à utilização da tela de simulação. Os valores utilizados para essa simulação são apresentados na Figura 25.

Figura 25 – Valores utilizados para a comparação da terça.

Fonte: Autoria Própria.

As Tabelas 21 a 24 apresentam os resultados obtidos na comparação. O procedimento de cálculo realizado pelo *software* é apresentado no Apêndice B.

Tabela 21 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes ao Estado-Limite FLA das terças.

| Eixo | Parâmetro | Manual | Software | Erro |
|-------------|-----------------|--------|----------|--------|
| Principal 1 | M_{pl} (kN.m) | 25,25 | 25,19 | -0,23% |
| | λ | 13,875 | 13,835 | -0,29% |
| | λ_p | 107,67 | 106,349 | -1,23% |
| | M_{Rd} (kN.m) | 22,95 | 22,90 | -0,21% |
| Principal 2 | M_{pl} (kN.m) | 4,75 | 4,75 | 0,00% |
| | λ | 13,875 | 13,835 | -0,29% |
| | λ_p | 31,68 | 31,678 | -0,01% |
| | M_{Rd} (kN.m) | 4,32 | 4,32 | -0,05% |

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 22 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes ao Estado-Limite FLM das terças.

| Parâmetro | Manual | Software | Erro |
|-----------------|--------|----------|--------|
| M_{pl} (kN.m) | 25,25 | 25,19 | -0,23% |
| λ | 5,936 | 5,931 | -0,08% |
| λ_p | 10,75 | 10,748 | -0,02% |
| M_{Rd} (kN.m) | 22,95 | 22,90 | -0,21% |

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 23 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes ao Estado-Limite FLT das terças.

| Parâmetro | Manual | Software | Erro |
|-----------------|---------|----------|--------|
| β_1 | 0,00134 | 0,00158 | 17,73% |
| M_{pl} (kN.m) | 25,25 | 25,19 | -0,23% |
| M_r (kN.m) | 14,53 | 14,37 | -1,09% |
| λ | 223,88 | 215,557 | -3,72% |
| λ_p | 49,78 | 49,78 | 0,00% |
| λ_r | 287,05 | 265,528 | -7,50% |
| M_{Rd} (kN.m) | 15,80 | 15,34 | -2,91% |

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 24 – Comparação dos valores dos parâmetros referentes à determinação da força cortante resistente das terças.

| Eixo | Parâmetro | Manual | Software | Erro |
|-------------|--------------------------|--------|----------|--------|
| Principal 1 | A_w (mm ²) | 1216 | 1216 | 0,01% |
| | V_{pl} (kN) | 182,40 | 182,42 | 0,01% |
| | λ | 13,875 | 13,835 | -0,29% |
| | λ_p | 69,57 | 69,57 | 0,00% |
| | V_{Rd} (kN) | 165,82 | 165,84 | 0,01% |
| Principal 2 | A_w (mm ²) | 901 | 900 | -0,08% |
| | V_{pl} (kN) | 135,09 | 134,99 | -0,08% |
| | λ | 5,94 | 5,931 | -0,15% |
| | λ_p | 34,08 | 34,082 | 0,01% |
| | V_{Rd} (kN) | 122,81 | 122,72 | -0,08% |

Fonte: Autoria Própria.

Com isso observa-se que o maior erro encontrado se refere ao valor de β_1 , o que pode ser causado, provavelmente, pelo fato de ser um valor de ordem muito baixa, quando comparado aos demais valores, ocasionando, assim, erros de arredondamento.

Por fim, a verificação de segurança feita no manual resultou em 0,86, enquanto a realizada pelo *software* resultou em 0,867, o que corresponde a um erro de 0,81%.

Em seguida também foi feita uma verificação dos resultados por meio de uma comparação com alguns problemas propostos por Pfeil e Pfeil (2009).

A primeira comparação refere-se ao momento resistente ao Estado-Limite FLT, observado no problema 6.5.7, onde os autores analisaram uma viga contínua de quatro vãos de 8 m, executada em um perfil VS 400 × 49 de aço MR250.

Os dados relevantes a esse dimensionamento foram inseridos na seção de simulações do *software*. Os resultados obtidos nessa comparação estão presentes na Tabela 25.

Tabela 25 – Comparação dos valores referentes ao problema 6.5.7.

| Parâmetro | Bibliografia | Software | Erro |
|-----------------|--------------|----------|--------|
| β_1 | 0,00521 | 0,00518 | -0,58% |
| M_{cr} (kN.m) | 160,58 | 156,89 | -2,30% |
| λ | 176,991 | 176,941 | -0,03% |
| λ_r | 136,504 | 137,914 | 1,03% |
| M_{Rd} (kN.m) | 145,98 | 142,63 | -2,30% |

Fonte: Autoria Própria.

Em seguida realizou-se uma verificação referente ao esforço cortante resistente de cálculo, por meio da comparação com o problema 6.5.9 do trabalho de Pfeil e Pfeil (2009). Nesse problema foi analisado um perfil W 530 × 92,0 em aço MR250. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Comparação dos valores referentes ao problema 6.5.9.

| Parâmetro | Bibliografia | Software | Erro |
|--------------------------|--------------|----------|--------|
| A_w (mm ²) | 5437 | 5437 | 0,00% |
| V_{pl} (kN) | 815,49 | 815,49 | 0,00% |
| λ | 46,6 | 49,196 | 5,57% |
| λ_p | 69,9 | 69,57 | -0,47% |
| V_{Rd} (kN) | 741,00 | 741,36 | 0,05% |

Fonte: Autoria Própria.

Por fim realizou-se a comparação quanto ao esforço axial resistente de cálculo por meio do problema 5.8.1. Nesse problema analisou-se a resistência de um perfil W 150 × 37,1 de aço ASTM A36, de um elemento com 3m de comprimento e rotulado nas extremidades. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Comparação dos valores referentes ao problema 5.8.1.

| Parâmetro | Bibliografia | Software | Erro | |
|------------------------------|---------------|----------|--------|--------|
| Parâmetros referentes à mesa | λ | 6,6 | 6,638 | 0,58% |
| | $(b/t)_{lim}$ | 15,8 | 15,839 | 0,25% |
| | Q_s | 1 | 1 | 0,00% |
| Parâmetros referentes à alma | λ | 17,2 | 17,16 | -0,23% |
| | $(b/t)_{lim}$ | 42,1 | 42,144 | 0,10% |
| | Q_a | 1 | 1 | 0,00% |
| Q | 1 | 1 | 0,00% | |
| λ_{0x} | 0,49 | 0,494 | 0,82% | |
| N_{Rdx} | 982,1 | 964,024 | -1,84% | |
| λ_{0y} | 0,88 | 0,871 | -1,02% | |
| N_{Rdy} (kN) | 786,00 | 777,62 | -1,07% | |

Fonte: Autoria Própria.

Por meio da comparação com esses problemas propostos por Pfeil e Pfeil, pode-se observar que não houve uma discrepância muito alta entre os valores apresentados pelos autores com aqueles obtidos pelo *software*.

Portanto pode-se constatar que os valores dos parâmetros obtidos pelo *software* comparados com aqueles apresentados tanto no manual de Pravia, Drehmer e Mesacasa Jr. (2018) quanto com os apresentados no trabalho de Pfeil e Pfeil (2009) não resultaram em erros consideráveis e injustificáveis.

6 CONCLUSÕES

O *software* foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação *Visual Basic* e segue devidamente os passos necessários para o dimensionamento correto de uma estrutura de galpão em aço, segundo as recomendações da NBR 8800:2008.

Os elementos dimensionados pelo *software* são as terças, vigas e pilares do galpão. Os resultados obtidos foram avaliados através de uma comparação com aqueles apresentados pelo manual elaborada por Pravia, Drehmer e Mesacasa Jr. (2018). Os erros obtidos através dessa comparação foram muito baixos, derivados, em sua maioria, de arredondamentos ou simplificações, o que não influenciou significativamente na verificação geral de segurança dos elementos. Assim, foi possível validar os resultados tanto no programa principal, quanto na aba de simulação de elementos isolados.

O memorial de cálculo gerado pelo *software* apresenta detalhadamente o procedimento utilizado para a obtenção dos carregamentos atuantes e dos parâmetros relacionados ao dimensionamento dos elementos, apresentando a simbologia e os valores de cada parâmetro para possibilitar a aferição manual dos resultados.

Além disso, também apresenta graficamente os resultados obtidos em cada etapa do dimensionamento, assim como possibilita a montagem de pranchas no próprio *software*, as quais podem ser exportadas em formato “.pdf” ou “.dxf”.

Dessa forma, o *software* desenvolvido pode ser utilizado para complementar os estudos relacionados às disciplinas de dimensionamento de estruturas em aço, facilitando o entendimento dos estudantes referente ao tema.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para aprimoramento do *software*, propõe-se:

- a) Realização de análise não linear;
- b) Inclusão de outros perfis para dimensionamento;
- c) Galpões com geometria variável (estrutura genérica);
- d) Exportação de arquivos em formato “.ifc”; e
- e) Realização do detalhamento das ligações.

REFERÊNCIAS

- ArcelorMittal. **Design Software**. [S. l.], 04 set. 2020. Disponível em: https://sections.arcelormittal.com/design_aid/design_software/EN/. Acesso em: 04 set. 2020.
- ALTOQI. **Produtos**. [S. l.], 30 ago. 2020. Disponível em: <https://www.altoqi.com.br/produtos/>. Acesso em: 30 ago. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5884**: Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico – Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- 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, 2008.
- AUTODESK. **Software para Documentação e Projetos de Infraestrutura Civil**. [S. l.], 30 ago. 2020. Disponível em: <https://www.autodesk.com.br/products/civil-3d/overview?plc=CIV3D&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>. Acesso em: 30 ago. 2020.
- BELLEI, I. H. **Edifícios Industriais Em Aço**: Projeto E Cálculo. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998.
- CHAMBERLAIN, Z.; FICANHA, R.; FABEANE, R. **Projeto E Cálculo De Estruturas De Aço**: Edifício Industrial Detalhado. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- ESTÓRIA DA HISTÓRIA. **A Ponte De Coalbrookdale**. [S. l.], 19 nov. 2013. Disponível em: <http://estoriasdahistoria12.blogspot.com/2013/11/a-ponte-de-coalbrookdale.html>. Acesso em: 07 maio 2020.
- FTOOL: **Overview**. [S. l.], 30 ago. 2020. Disponível em: <https://www.ftool.com.br/Ftool/site/about>. Acesso em: 30 ago. 2020.
- GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- MANCINI, L. C.; RIBEIRO, L. F. L. **Pré-Dimensionamento De Estruturas Metálicas Em Fase De Concepção Arquitetônica**. 2003. 256 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

MARTHA, L. F. **Método da Rigidez Direta para Modelos Estruturais Lineares e Elásticos**: Capítulo 1 a 5. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica (PUC), 31 ago. 2020. Disponível em: <http://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/~lfm/compgraf-161/LFMartha-MetRigidezDireta-caps1-2-3-4-5.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2020a.

MARTHA, L. F. **Método da Rigidez Direta para Modelos Estruturais Lineares e Elásticos**: Capítulo 6 a 8. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica (PUC), 31 ago. 2020. Disponível em: <http://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/~lfm/compgraf-161/LFMartha-MetRigidezDireta-caps6-7-8.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2020b.

MULTIPLUS (ed.). **Metálicas 3D**: Software para Projeto de Estruturas Metálicas. [S. l.], 30 ago. 2020. Disponível em: <https://multiplus.com/software/metalicas-3d/index.html>. Acesso em: 30 ago. 2020.

Paraíba Do Sul. **Turismo**. Disponível em: <http://paraibadosul.rj.gov.br/turismo/arquitetura>. Acesso em: 07 maio 2020.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas De Aço**: Dimensionamento Prático De Acordo Com A NBR 8800:2008. 8. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2009.

PRAVIA, Z. M. C.; DREHMER, G. A.; MESACASA JR., E. **Manual De Construção Em Aço**: Galpões Para Usos Gerais. 4. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: CBCA, 2018.

PRAVIA, Z. M. C.; KRIPKA, M. Proposta Metodológica Para o Uso e Desenvolvimento de Ferramentas Computacionais no Ensino de Estruturas. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 27., 1999, Natal. **Anais** [...]. Natal: Associação Brasileira de Educação em Engenharia (ABENGE), 1999. p. 2597-2604.

PRAVIA, Z. M. C.; PASQUETTI, E.; CHIARELLO, J. A. VisualBarras: Um Software Didático Para o Ensino de Análise Matricial de Estruturas Reticuladas Planas. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 29., 2001, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre: Associação Brasileira de Educação em Engenharia (ABENGE), 2001.

PRAVIA, Z. M. C.; CHIARELLO, J. A. O Programa VisualVentos: Determinação de Forças Devidas ao Vento em Edificações de Base Retangular e Cobertura a Duas Águas Segundo a NBR6123. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 31., 2003, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Educação em Engenharia (ABENGE), 2003.

PRAVIA, Z. M. C.; CHIARELLO, J. A.; DREHMER, G. A. O Programa VisualMetal: Verificação de Elementos Laminados e Soldados Conforme as Prescrições da NBR8800/1986. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 32., 2004, Brasília. **Anais** [...]. Brasília: Associação Brasileira de Educação em Engenharia (ABENGE), 2004.

REIS, A. L. F. **O Método Da Energia Aplicado À Flambagem Lateral Com Torção De Vigas De Aço**. 1996. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas gerais, Belo Horizonte, 1996.

SILVA, A. C. **Automação De Projetos De Estruturas Metálicas Em Plataforma CAD**. 2008. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SILVA, N. C.; REQUENA, J. A. V.; ASSAN, A. E. **Automação de Projetos de Treliças Metálicas Planas**. 1999. Artigo. Disponível em: <http://www.fec.unicamp.br/~autmetal/artigo>. Acesso em: 30 ago. 2020.

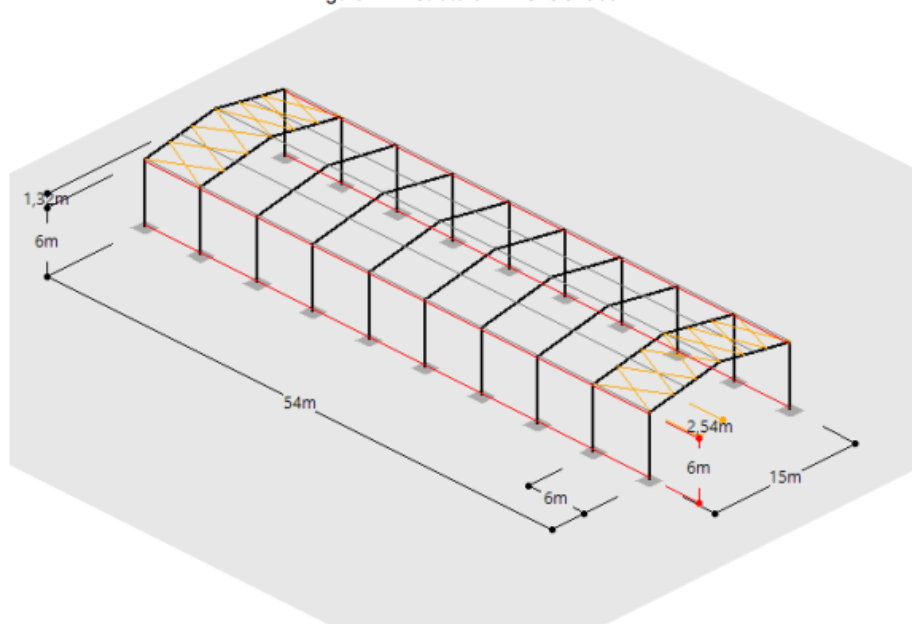
TQS: **Quem somos**. [S. l.], 30 ago. 2020. Disponível em: <https://www.tqs.com.br/tqsabout/company>. Acesso em: 30 ago. 2020.

APÊNDICE A – Memorial de cálculo gerado pelo *software*



1. DIMENSÕES DA ESTRUTURA

Figura 1 - Estrutura Dimensionada.



Largura total: 15 m
 Comprimento total: 54 m
 Altura do pilar: 6 m
 Elevação da cobertura: 1,322 m
 Inclinação da cobertura: 17,63%
 Ângulo da cobertura: 0,175 rad
 Comprimento da viga: 7,616 m
 Quantidade de pórticos planos: 10
 Quantidade de terças por face de cobertura: 3
 Distância entre pórticos: 6 m
 Espaçamento entre terças: 3,808 m
 Distância entre contraventamentos no plano da cobertura: 2,538 m
 Distância entre vigas do tapamento lateral: 6 m

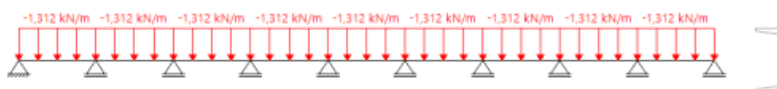
2. AÇÕES ATUANTES NA ESTRUTURA

As ações atuantes na estrutura foram informadas manualmente. As Figuras 2 e 3 apresentam os carregamentos informados nas terças.

Figura 2 - Cargas atuantes no eixo x das terças.

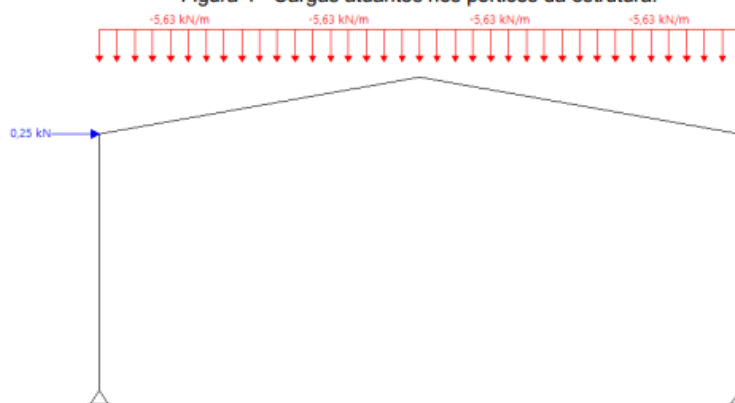


Figura 3 - Cargas atuantes no eixo y das terças.



A Figura 4 apresenta o carregamento informado nos pórticos.

Figura 4 - Cargas atuantes nos pórticos da estrutura.



3. DIMENSIONAMENTO DAS TERÇAS

3.1. DADOS DA SEÇÃO TRANSVERSAL

Tipo de Perfil: Perfil C

Perfil: C 152,40 x 15,62

Tipo de aço: ASTM A572-GR50 → $f_y = 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2$, $f_u = 0,45 \text{ kN} / \text{mm}^2$

Propriedades geométricas da seção transversal:

Massa Linear = 15,62 Kg / m

$d = 152,4 \text{ mm}$

$b_f = 51,66 \text{ mm}$

$t_f = 8,71 \text{ mm}$

$t_w = 7,98 \text{ mm}$

$h = 110,4 \text{ mm}$

$k = 21 \text{ mm}$

Área = 1977,058 mm²

$I_x = 6,256 \times 10^6 \text{ mm}^4$

$W_x = 82,094 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$Z_x = 100,77 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$r_x = 56,25 \text{ mm}$

$I_y = 0,383 \times 10^6 \text{ mm}^4$

$W_y = 9,879 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$Z_y = 11,21 \times 10^3 \text{ mm}^3$

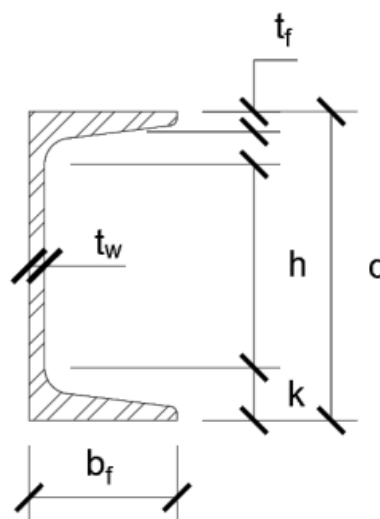
$r_y = 13,917 \text{ mm}$

$J = 45,34 \times 10^3 \text{ mm}^4$

$R_t = 17,912 \text{ mm}$

$C_w = 1,579 \times 10^9 \text{ mm}^6$

$L_b = 6000 \text{ mm}$



3.2. ESFORÇOS SOLICITANTES

A Tabela 1 apresenta os esforços atuantes na seção mais solicitada do elemento.

Tabela 1 - Esforços atuantes na seção.

| Eixo Principal | Msd (kN.m) | Vsd (kN) | Nsd (kN) |
|----------------|------------|----------|----------|
| 1 | 4,991 | 4,768 | 0 |
| 2 | 0,879 | 0,839 | 0 |

3.3. DETERMINAÇÃO DO MOMENTO RESISTENTE DE CÁLCULO

A determinação dos parâmetros para o cálculo do momento resistente de cálculo foi feita de acordo com o Anexo G (NBR 8800:2008, p. 130).

Os parâmetros M_r , M_{cr} , λ , λ_p e λ_r foram calculados a partir da Tabela G.1 (p. 134).

3.3.1. Flambagem Local Da Alma (FLA)

3.3.1.1. Eixo principal 1

$$\lambda = h / t_w = 110,4 \text{ mm} / 7,98 \text{ mm} = 13,835$$

$$\lambda_p = 3,76 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 3,76 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 90,53$$

$$M_{pl} = f_y \cdot Z_x = 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 100,77 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 34,766 \text{ kN.m}$$

Como $13,835 \leq 90,53$, então o perfil é compacto em FLA, logo MRd é calculado pelo item G.2.2 (a):

$$MRd = M_{pl} / \gamma_{a1} = 34,766 \text{ kN.m} / 1,1 = 31,605 \text{ kN.m}$$

3.3.1.2. Eixo principal 2

$$\lambda = h / t_w = 110,4 \text{ mm} / 7,98 \text{ mm} = 13,835$$

$$\lambda_p = 1,12 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 1,12 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 26,966$$

$$M_{pl} = f_y \cdot Z_y = 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 11,21 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 3,866 \text{ kN.m}$$

Como $13,835 \leq 26,966$, então o perfil é compacto em FLA, logo MRd é calculado pelo item G.2.2 (a):

$$MRd = M_{pl} / \gamma_{a1} = 3,866 \text{ kN.m} / 1,1 = 3,515 \text{ kN.m}$$

3.3.2. Flambagem Local Da Mesa (FLM)

3.3.2.1. Eixo principal 1

$$\lambda = b / t_f = 8,71 \text{ mm} = 5,931$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 0,38 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 9,149$$

$$M_{pl} = f_y \cdot Z_x = 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 100,77 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 34,766 \text{ kN.m}$$

Como $5,931 \leq 9,149$, então o perfil é compacto em FLM, logo MRd é calculado pelo item G.2.2 (a):

$$MRd = M_{pl} / \gamma_{a1} = 34,766 \text{ kN.m} / 1,1 = 31,605 \text{ kN.m}$$

3.3.2.2. Eixo principal 2

$$\lambda = b_f / t_f = 51,66 \text{ mm} / 8,71 \text{ mm} = 5,931$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 0,38 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 9,149$$

$$M_{pl} = f_y \cdot Z_y = 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 11,21 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 3,866 \text{ kN.m}$$

Como $5,931 \leq 9,149$, então o perfil é compacto em FLM, logo MRd é calculado pelo item G.2.2 (a):

$$MRd = M_{pl} / \gamma_{a1} = 3,866 \text{ kN.m} / 1,1 = 3,515 \text{ kN.m}$$

3.3.3. Flambagem Lateral com Torção (FLT)

$$\lambda = L_b / r_y = 6000 \text{ mm} / 13,917 \text{ mm} = 431,114$$

$$\lambda_p = 1,76 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 1,76 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 42,376$$

$$\beta_1 = (f_y - \sigma_r) \cdot W_x / (E \cdot J) = (0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 - 0,104 \text{ kN/mm}^2) \cdot 82,094 \times 10^3 \text{ mm}^3 / (200 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 45,34 \times 10^3 \text{ mm}^4) = 0,002$$

$$\lambda_r = 1,38 \cdot \text{Raiz}(I_y \cdot J) / (r_y \cdot J \cdot \beta_1) \cdot \text{Raiz}(1 + \text{Raiz}(1 + 27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2 / I_y)) =$$

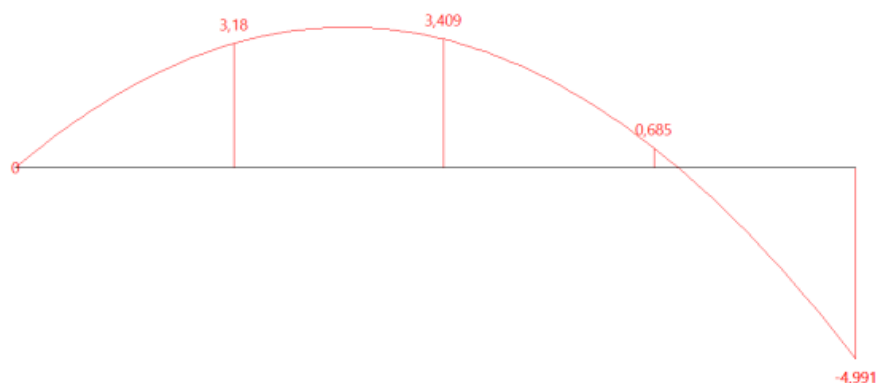
$$\lambda_r = 1,38 \cdot \text{Raiz}(0,383 \times 10^6 \text{ mm}^4 \cdot 45,34 \times 10^3 \text{ mm}^4) / (13,917 \text{ mm} \cdot 45,34 \times 10^3 \text{ mm}^4 \cdot 0,002) \cdot \text{Raiz}(1 + \text{Raiz}(1 + 27 \cdot 1,579 \times 10^9 \text{ mm}^6 \cdot 0,002^2 / 0,383 \times 10^6 \text{ mm}^4)) = 197,17$$

$$M_{pl} = f_y \cdot Z_x = 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 100,77 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 34,766 \text{ kN.m}$$

$$C_b = 12,5 \cdot M_{\text{Max}} / (2,5 \cdot M_{\text{Max}} + 3 \cdot M_A + 4 \cdot M_B + 3 \cdot M_C)$$

Para o cálculo do C_b considerou-se a seguinte diagrama de momentos fletores:

Figura 5 - Diagrama de momentos fletores para o cálculo de C_b .



$$C_b = 12,5 \cdot 4,991 / (2,5 \cdot 4,991 + 3 \cdot 3,18 + 4 \cdot 3,409 + 3 \cdot 0,685) = 1,654$$

$$M_{cr} = (C_b \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_y / L_b^2 \cdot \text{Raiz}(C_w / I_y \cdot (1 + 0,039 \cdot J \cdot L_b^2 / C_w))) =$$

$$(1,654 \cdot \pi^2 \cdot 200 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 0,383 \times 10^6 \text{ mm}^4 / (6000 \text{ mm})^2 \cdot \text{Raiz}(1,579 \times 10^9 \text{ mm}^6 / 0,383 \times 10^6$$

$$\text{mm}^4 \cdot (1 + 0,039 \cdot 45,34 \times 10^3 \text{ mm}^4 \cdot (6000 \text{ mm})^2 / 1,579 \times 10^9 \text{ mm}^6))) =$$

$$14,337 \text{ kN.m}$$

Como $431,114 > 197,17$, então o perfil é esbelto em FLT, logo M_{Rd} é calculado pelo item G.2.1 (c):

$$M_{Rd} = M_{cr} / \gamma_{a1} = 14,337 \text{ kN.m} / 1,1 = 13,034 \text{ kN.m}$$

3.4. DETERMINAÇÃO DA FORÇA CORTANTE RESISTENTE DE CÁLCULO

3.4.1. Eixo principal 1

Como não há enrijecedores, então $k_v = 5$

$$A_w = d \cdot t_w = 152,4 \text{ mm} \cdot 7,98 \text{ mm} = 1216,152 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl} = 0,6 \cdot A_w \cdot f_y = 0,6 \cdot 1216,152 \text{ mm}^2 \cdot 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 = 251,743 \text{ kN}$$

$$\lambda = h / t_w = 110,4 \text{ mm} / 7,98 \text{ mm} = 13,835$$

$$\lambda_p = 1,1 \cdot \text{Raiz}(k_v \cdot E / f_y) = 1,1 \cdot \text{Raiz}(5 \cdot 200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 59,222$$

Como $13,835 \leq 59,222$, então

$$V_{Rd} = V_{pl} / \gamma_{a1} = 251,743 \text{ kN} / 1,1 = 228,858 \text{ kN}$$

3.4.2. Eixo principal 2

$$k_v = 1,2$$

$$A_w = 2 \cdot b_f \cdot t_f = 2 \cdot 51,66 \text{ mm} \cdot 8,71 \text{ mm} = 899,917 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl} = 0,6 \cdot A_w \cdot f_y = 0,6 \cdot 899,917 \text{ mm}^2 \cdot 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 = 186,283 \text{ kN}$$

$$\lambda = b_f / (2 \cdot t_f) = 51,66 \text{ mm} / (2 \cdot 8,71 \text{ mm}) = 5,931 \text{ mm}^2$$

$$\lambda_p = 1,1 \cdot \text{Raiz}(k_v \cdot E / f_y) = 1,1 \cdot \text{Raiz}(1,2 \cdot 200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 29,013$$

Como $5,931 \leq 29,013$, então

$$V_{Rd} = V_{pl} / \gamma_{a1} = 186,283 \text{ kN} / 1,1 = 169,348 \text{ kN}$$

3.5. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA

Como $N_{sd} / N_{Rd} = 0 / 1532,578 = 0 < 0,2$ então a verificação é feita de acordo com item 5.5.1.2 (b) da NBR 8800:2008:

$$N_{sd} / (2 \cdot N_{Rd}) + M_{sd,1} / M_{Rd,1} + M_{sd,2} / M_{Rd,2} =$$

$$0 / (2 \cdot 1532,578) + 4,991 / 31,605 + 0,879 / 3,515 = 0,408 \leq 1$$

$$V_{sd,1} / V_{Rd,1} = 4,768 / 228,858 = 0,021 \leq 1$$

$$V_{sd,2} / V_{Rd,2} = 0,839 / 169,348 = 0,005 \leq 1$$

Segurança atendida.

4. DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS

4.1. DADOS DA SEÇÃO TRANSVERSAL

Tipo de Perfil: Perfil Laminado W

Perfil: W 310 x 38,7

Tipo de aço: ASTM A572-GR50 → $f_y = 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2$, $f_u = 0,45 \text{ kN} / \text{mm}^2$

Propriedades geométricas da seção transversal:

Massa Linear = 39 Kg / m

$d = 310 \text{ mm}$

$b_f = 165 \text{ mm}$

$b = 82,5 \text{ mm}$

$t_f = 9,7 \text{ mm}$

$t_w = 5,8 \text{ mm}$

$h = 290,6 \text{ mm}$

Área = $4886,48 \text{ mm}^2$

$I_x = 84,053 \times 10^6 \text{ mm}^4$

$W_x = 542,278 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$Z_x = 603,08 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$r_x = 131,153 \text{ mm}$

$I_y = 7,267 \times 10^6 \text{ mm}^4$

$W_y = 88,085 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$Z_y = 134,49 \times 10^3 \text{ mm}^3$

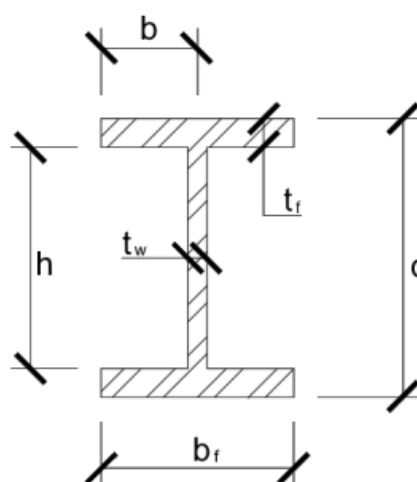
$r_y = 38,564 \text{ mm}$

$J = 119,92 \times 10^3 \text{ mm}^4$

$R_t = 43,946 \text{ mm}$

$C_w = 163,835 \times 10^9 \text{ mm}^6$

$L_b = 2538 \text{ mm}$



4.2. ESFORÇOS SOLICITANTES

A Tabela 2 apresenta os esforços atuantes na seção mais solicitada do elemento.

Tabela 2 - Esforços atuantes na seção.

| Eixo Principal | Msd (kN.m) | Vsd (kN) | Nsd (kN) |
|----------------|------------|----------|----------|
| 1 | 80,767 | 39,345 | |
| 2 | 0 | 0 | -20,605 |

Nota: Valores negativos de Nsd representam esforços de compressão.

4.3. DETERMINAÇÃO DO MOMENTO RESISTENTE DE CÁLCULO

A determinação dos parâmetros para o cálculo do momento resistente de cálculo foi feita de acordo com o Anexo G (NBR 8800:2008, p. 130).

Os parâmetros M_r , M_{cr} , λ , λ_p e λ_r foram calculados a partir da Tabela G.1 (p. 134).

4.3.1. Flambagem Local Da Alma (FLA)

21/02/2021 21:03

4.3.1.1. Eixo principal 1

$$\lambda = h / t_w = 290,6 \text{ mm} / 5,8 \text{ mm} = 50,103$$

$$\lambda_p = 3,76 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 3,76 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 90,53$$

$$M_{pl} = f_y \cdot Z_x = 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 603,08 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 208,063 \text{ kN.m}$$

Como $50,103 \leq 90,53$, então o perfil é compacto em FLA, logo MRd é calculado pelo item G.2.2 (a):

$$MRd = M_{pl} / \gamma_{a1} = 208,063 \text{ kN.m} / 1,1 = 189,148 \text{ kN.m}$$

4.3.2. Flambagem Local Da Mesa (FLM)

4.3.2.1. Eixo principal 1

$$\lambda = b / t_f = 82,5 \text{ mm} / 9,7 \text{ mm} = 8,505$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 0,38 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 9,149$$

$$M_{pl} = f_y \cdot Z_x = 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 603,08 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 208,063 \text{ kN.m}$$

Como $8,505 \leq 9,149$, então o perfil é compacto em FLM, logo MRd é calculado pelo item G.2.2 (a):

$$MRd = M_{pl} / \gamma_{a1} = 208,063 \text{ kN.m} / 1,1 = 189,148 \text{ kN.m}$$

4.3.3. Flambagem Lateral com Torção (FLT)

$$\lambda = L_b / r_y = 2538 \text{ mm} / 38,564 \text{ mm} = 65,813$$

$$\lambda_p = 1,76 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 1,76 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 42,376$$

$$\beta_1 = (f_y - \sigma_r) \cdot W_x / (E \cdot J) = (0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 - 0,104 \text{ kN/mm}^2) \cdot 542,278 \times 10^3 \text{ mm}^3 / (200 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 119,92 \times 10^3 \text{ mm}^4) = 0,005$$

$$\lambda_r = 1,38 \cdot \text{Raiz}(I_y \cdot J) / (r_y \cdot J \cdot \beta_1) \cdot \text{Raiz}(1 + \text{Raiz}(1 + 27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2 / I_y)) =$$

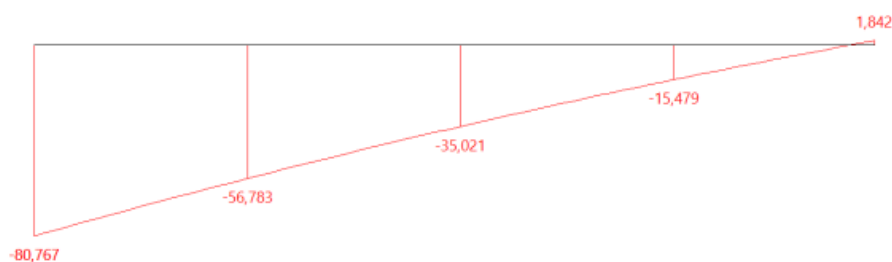
$$\lambda_r = 1,38 \cdot \text{Raiz}(7,267 \times 10^6 \text{ mm}^4 \cdot 119,92 \times 10^3 \text{ mm}^4) / (38,564 \text{ mm} \cdot 119,92 \times 10^3 \text{ mm}^4 \cdot 0,005) \cdot \text{Raiz}(1 + \text{Raiz}(1 + 27 \cdot 163,835 \times 10^9 \text{ mm}^6 \cdot 0,005^2 / 7,267 \times 10^6 \text{ mm}^4)) = 118,289$$

$$M_{pl} = f_y \cdot Z_x = 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 603,08 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 208,063 \text{ kN.m}$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r) \cdot W_x = (0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 - 0,104 \text{ kN/mm}^2) \cdot 542,278 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 130,96 \text{ kN.m}$$

$$C_b = 12,5 \cdot M_{\text{Max}} / (2,5 \cdot M_{\text{Max}} + 3 \cdot M_A + 4 \cdot M_B + 3 \cdot M_C)$$

Para o cálculo do C_b considerou-se a seguinte diagrama de momentos fletores:

Figura 6 - Diagrama de momentos fletores para o cálculo de C_b .

$$C_b = 12,5 \cdot 80,767 / (2,5 \cdot 80,767 + 3 \cdot 56,783 + 4 \cdot 35,021 + 3 \cdot 15,479) = 1,807$$

Como $42,376 < 65,813 \leq 118,289$, então o perfil é semi-compacto em FLT, logo M_{Rd} é calculado pelo item G.2.1 (b):

$$M_{Rd} = C_b / \gamma_{a1} \cdot [M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot (\lambda - \lambda_p) / (\lambda_r - \lambda_p)] =$$

$$1,807 / 1,1 [208,063 \text{ kN.m} - (208,063 \text{ kN.m} - 130,96 \text{ kN.m}) \cdot (65,813 - 42,376) / (118,289 - 42,376)] =$$

$$302,642 \text{ kN.m}$$

Como $302,642 \text{ kN.m} > 189,148 \text{ kN.m}$, então $M_{Rd} = 189,148 \text{ kN.m}$

4.4. DETERMINAÇÃO DA FORÇA CORTANTE RESISTENTE DE CÁLCULO

4.4.1. Eixo principal 1

Como não há enrijecedores, então $k_v = 5$

$$A_w = d \cdot t_w = 310 \text{ mm} \cdot 5,8 \text{ mm} = 1798 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl} = 0,6 \cdot A_w \cdot f_y = 0,6 \cdot 1798 \text{ mm}^2 \cdot 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 = 372,186 \text{ kN}$$

$$\lambda = h / t_w = 290,6 \text{ mm} / 5,8 \text{ mm} = 50,103$$

$$\lambda_p = 1,1 \cdot \text{Raiz}(k_v \cdot E / f_y) = 1,1 \cdot \text{Raiz}(5 \cdot 200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 59,222$$

Como $50,103 \leq 59,222$, então

$$V_{Rd} = V_{pl} / \gamma_{a1} = 372,186 \text{ kN} / 1,1 = 338,351 \text{ kN}$$

4.5. DETERMINAÇÃO DA FORÇA AXIAL RESISTENTE DE CÁLCULO

Cálculo da resistência à compressão.

Cálculo de Q para a mesa:

Elemento AL - Grupo 4 (Perfil Laminado)

$$\lambda = b / t_f = 82,5 \text{ mm} / 9,7 \text{ mm} = 8,505$$

$$(b / t)_{lim} = 0,56 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 0,56 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 13,483$$

Como $\lambda \leq (b / t)_{lim}$, então $Q_s = 1$

Cálculo de Q para a alma:

Elemento AA - Grupo 2

$$\lambda = h / t_w = 290,6 \text{ mm} / 5,8 \text{ mm} = 50,103$$

$$(b / t)_{lim} = 1,49 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 1,49 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 35,875$$

$$b_{ef} = 1,92 \cdot t_w \cdot \text{Raiz}(E / f_y) \cdot (1 - c_a / (h / t_w) \cdot \text{Raiz}(E / f_y)) =$$

$$1,92 \cdot 5,8 \text{ mm} \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) \cdot (1 - 0,34 / (290,6 \text{ mm} / 5,8 \text{ mm}) \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2)) = 224,316 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = A_g - (h - b_{ef}) \cdot t_w = 4886,48 \text{ mm}^2 - (290,6 \text{ mm} - 224,316 \text{ mm}) \cdot 5,8 \text{ mm} = 4502,03 \text{ mm}^2$$

$$Q_a = A_{ef} / A_g = 4502,03 \text{ mm}^2 / 4886,48 \text{ mm}^2 = 0,921$$

$$\text{Portanto } Q = Q_s \cdot Q_a = 1 \cdot 0,921 = 0,921$$

4.5.1. Eixo X

$$N_{ex} = \pi^2 \cdot E \cdot I_x / (K_x \cdot L_x)^2 = \pi^2 \cdot 200 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 84,053 \times 10^6 \text{ mm}^4 / (0,8 \cdot 7615,664 \text{ mm})^2 = 4469,795 \text{ kN}$$

$$\lambda_{0x} = \text{Raiz}(Q \cdot A_g \cdot f_y / N_{ex}) = \text{Raiz}(0,921 \cdot 4886,48 \text{ mm}^2 \cdot 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 4469,795 \text{ kN}) = 0,589$$

$$X_x = 0,658 \wedge (\lambda_{0x}^2) = 0,658 \wedge (0,589^2) = 0,865$$

$$NR_{dx} = X_x \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y / \gamma_{a1} = 0,865 \cdot 0,921 \cdot 4886,48 \text{ mm}^2 \cdot 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 1,1 = 1220,873 \text{ kN}$$

4.5.2. Eixo Y

$$N_{ey} = \pi^2 \cdot E \cdot I_y / (K_y \cdot L_y)^2 = \pi^2 \cdot 200 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 7,267 \times 10^6 \text{ mm}^4 / (0,8 \cdot 2538 \text{ mm})^2 = 3479,536 \text{ kN}$$

$$\lambda_{0y} = \text{Raiz}(Q \cdot A_g \cdot f_y / N_{ey}) = \text{Raiz}(0,921 \cdot 4886,48 \text{ mm}^2 \cdot 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 3479,536 \text{ kN}) = 0,668$$

$$X_y = 0,658 \wedge (\lambda_{0y}^2) = 0,658 \wedge (0,668^2) = 0,83$$

$$NR_{dy} = X_y \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y / \gamma_{a1} = 0,83 \cdot 0,921 \cdot 4886,48 \text{ mm}^2 \cdot 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 1,1 = 1171,37 \text{ kN}$$

Como $NR_{dy} < NR_{dx}$, então $NR_d = 1171,37 \text{ kN}$

4.6. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA

Como $N_{sd} / NR_d = 20,605 / 1171,37 = 0,018 < 0,2$ então a verificação é feita de acordo com item

5.5.1.2 (b) da NBR 8800:2008:

$$N_{sd} / (2 \cdot NR_d) + M_{sd,1} / MR_{d,1} + M_{sd,2} / MR_{d,2} =$$

$$20,605 / (2 \cdot 1171,37) + 80,767 / 189,148 + 0 / 27,618 = 0,436 \leq 1$$

$$V_{sd,1} / VR_{d,1} = 39,345 / 338,351 = 0,116 \leq 1$$

$$V_{sd,2} / VR_{d,2} = 0 / 602,37 = 0 \leq 1$$

Segurança atendida.

5. DIMENSIONAMENTO DOS PILARES

5.1. DADOS DA SEÇÃO TRANSVERSAL

Tipo de Perfil: Perfil Laminado W

Perfil: W 310 x 38,7

Tipo de aço: ASTM A572-GR50 → $f_y = 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2$, $f_u = 0,45 \text{ kN} / \text{mm}^2$

Propriedades geométricas da seção transversal:

Massa Linear = 39 Kg / m

$d = 310 \text{ mm}$

$b_f = 165 \text{ mm}$

$b = 82,5 \text{ mm}$

$t_f = 9,7 \text{ mm}$

$t_w = 5,8 \text{ mm}$

$h = 290,6 \text{ mm}$

Área = $4886,48 \text{ mm}^2$

$I_x = 84,053 \times 10^6 \text{ mm}^4$

$W_x = 542,278 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$Z_x = 603,08 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$r_x = 131,153 \text{ mm}$

$I_y = 7,267 \times 10^6 \text{ mm}^4$

$W_y = 88,085 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$Z_y = 134,49 \times 10^3 \text{ mm}^3$

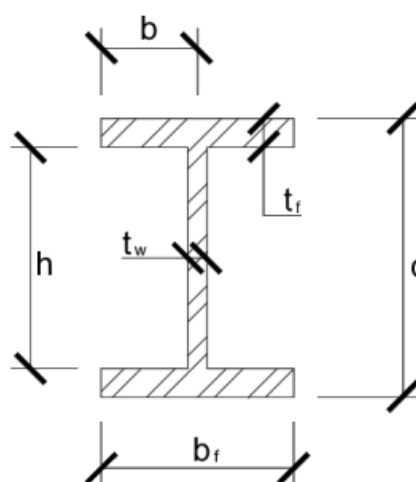
$r_y = 38,564 \text{ mm}$

$J = 119,92 \times 10^3 \text{ mm}^4$

$R_t = 43,946 \text{ mm}$

$C_w = 163,835 \times 10^9 \text{ mm}^6$

$L_b = 6000 \text{ mm}$



5.2. ESFORÇOS SOLICITANTES

A Tabela 3 apresenta os esforços atuantes na seção mais solicitada do elemento.

Tabela 3 - Esforços atuantes na seção.

| Eixo Principal | Msd (kN.m) | Vsd (kN) | Nsd (kN) |
|----------------|------------|----------|----------|
| 1 | 80,767 | 13,461 | |
| 2 | 0 | 0 | -42,325 |

Nota: Valores negativos de Nsd representam esforços de compressão.

5.3. DETERMINAÇÃO DO MOMENTO RESISTENTE DE CÁLCULO

A determinação dos parâmetros para o cálculo do momento resistente de cálculo foi feita de acordo com o Anexo G (NBR 8800:2008, p. 130).

Os parâmetros M_r , M_{cr} , λ , λ_p e λ_r foram calculados a partir da Tabela G.1 (p. 134).

5.3.1. Flambagem Local Da Alma (FLA)

21/02/2021 21:03

5.3.1.1. Eixo principal 1

$$\lambda = h / t_w = 290,6 \text{ mm} / 5,8 \text{ mm} = 50,103$$

$$\lambda_p = 3,76 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 3,76 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 90,53$$

$$M_{pl} = f_y \cdot Z_x = 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 603,08 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 208,063 \text{ kN.m}$$

Como $50,103 \leq 90,53$, então o perfil é compacto em FLA, logo MRd é calculado pelo item G.2.2 (a):

$$MRd = M_{pl} / \gamma_{a1} = 208,063 \text{ kN.m} / 1,1 = 189,148 \text{ kN.m}$$

5.3.2. Flambagem Local Da Mesa (FLM)

5.3.2.1. Eixo principal 1

$$\lambda = b / t_f = 82,5 \text{ mm} / 9,7 \text{ mm} = 8,505$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 0,38 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 9,149$$

$$M_{pl} = f_y \cdot Z_x = 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 603,08 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 208,063 \text{ kN.m}$$

Como $8,505 \leq 9,149$, então o perfil é compacto em FLM, logo MRd é calculado pelo item G.2.2 (a):

$$MRd = M_{pl} / \gamma_{a1} = 208,063 \text{ kN.m} / 1,1 = 189,148 \text{ kN.m}$$

5.3.3. Flambagem Lateral com Torção (FLT)

$$\lambda = L_b / r_y = 6000 \text{ mm} / 38,564 \text{ mm} = 155,587$$

$$\lambda_p = 1,76 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 1,76 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 42,376$$

$$\beta_1 = (f_y - \sigma_r) \cdot W_x / (E \cdot J) = (0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 - 0,104 \text{ kN/mm}^2) \cdot 542,278 \times 10^3 \text{ mm}^3 / (200 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 119,92 \times 10^3 \text{ mm}^4) = 0,005$$

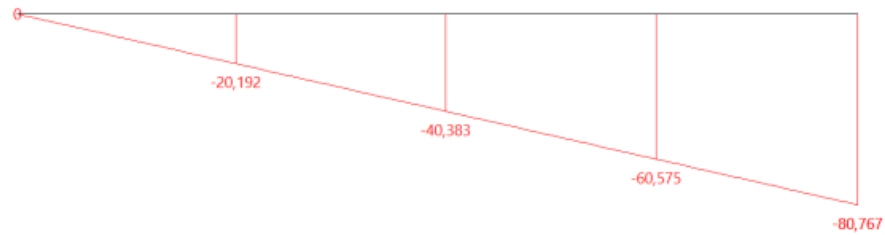
$$\lambda_r = 1,38 \cdot \text{Raiz}(I_y \cdot J) / (r_y \cdot J \cdot \beta_1) \cdot \text{Raiz}(1 + \text{Raiz}(1 + 27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2 / I_y)) =$$

$$\lambda_r = 1,38 \cdot \text{Raiz}(7,267 \times 10^6 \text{ mm}^4 \cdot 119,92 \times 10^3 \text{ mm}^4) / (38,564 \text{ mm} \cdot 119,92 \times 10^3 \text{ mm}^4 \cdot 0,005) \cdot \text{Raiz}(1 + \text{Raiz}(1 + 27 \cdot 163,835 \times 10^9 \text{ mm}^6 \cdot 0,005^2 / 7,267 \times 10^6 \text{ mm}^4)) = 118,289$$

$$M_{pl} = f_y \cdot Z_x = 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 603,08 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 208,063 \text{ kN.m}$$

$$C_b = 12,5 \cdot M_{\text{Max}} / (2,5 \cdot M_{\text{Max}} + 3 \cdot M_A + 4 \cdot M_B + 3 \cdot M_C)$$

Para o cálculo do C_b considerou-se a seguinte diagrama de momentos fletores:

Figura 7 - Diagrama de momentos fletores para o cálculo de C_b .

$$C_b = 12,5 \cdot 80,767 / (2,5 \cdot 80,767 + 3 \cdot 20,192 + 4 \cdot 40,383 + 3 \cdot 60,575) = 1,667$$

$$M_{cr} = (C_b \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_y / L_b^2 \cdot \text{Raiz}(C_w / I_y \cdot (1 + 0,039 \cdot J \cdot L_b^2 / C_w))) =$$

$$(1,667 \cdot \pi^2 \cdot 200 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 7,267 \times 10^6 \text{ mm}^4 / (6000 \text{ mm})^2 \cdot \text{Raiz}(163,835 \times 10^9 \text{ mm}^6 / 7,267 \times 10^6 \text{ mm}^4 \cdot (1 + 0,039 \cdot 119,92 \times 10^3 \text{ mm}^4 \cdot (6000 \text{ mm})^2 / 163,835 \times 10^9 \text{ mm}^6))) =$$

$$141,99 \text{ kN.m}$$

Como $155,587 > 118,289$, então o perfil é esbelto em FLT, logo M_{Rd} é calculado pelo item G.2.1 (c):

$$M_{Rd} = M_{cr} / \gamma_{a1} = 141,99 \text{ kN.m} / 1,1 = 129,082 \text{ kN.m}$$

5.4. DETERMINAÇÃO DA FORÇA CORTANTE RESISTENTE DE CÁLCULO

5.4.1. Eixo principal 1

Como não há enrijecedores, então $k_v = 5$

$$A_w = d \cdot t_w = 310 \text{ mm} \cdot 5,8 \text{ mm} = 1798 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl} = 0,6 \cdot A_w \cdot f_y = 0,6 \cdot 1798 \text{ mm}^2 \cdot 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 = 372,186 \text{ kN}$$

$$\lambda = h / t_w = 290,6 \text{ mm} / 5,8 \text{ mm} = 50,103$$

$$\lambda_p = 1,1 \cdot \text{Raiz}(k_v \cdot E / f_y) = 1,1 \cdot \text{Raiz}(5 \cdot 200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 59,222$$

Como $50,103 \leq 59,222$, então

$$V_{Rd} = V_{pl} / \gamma_{a1} = 372,186 \text{ kN} / 1,1 = 338,351 \text{ kN}$$

5.5. DETERMINAÇÃO DA FORÇA AXIAL RESISTENTE DE CÁLCULO

Cálculo da resistência à compressão.

Cálculo de Q para a mesa:

Elemento AL - Grupo 4 (Perfil Laminado)

$$\lambda = b / t_f = 82,5 \text{ mm} / 9,7 \text{ mm} = 8,505$$

$$(b / t)_{lim} = 0,56 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 0,56 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 13,483$$

Como $\lambda \leq (b / t)_{lim}$, então $Q_s = 1$

Cálculo de Q para a alma:

Elemento AA - Grupo 2

$$\lambda = h / t_w = 290,6 \text{ mm} / 5,8 \text{ mm} = 50,103$$

$$(b / t)_{lim} = 1,49 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 1,49 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 35,875$$

$$b_{ef} = 1,92 \cdot t_w \cdot \text{Raiz}(E / f_y) \cdot (1 - c_a / (h / t_w)) \cdot \text{Raiz}(E / f_y) =$$

$$1,92 \cdot 5,8 \text{ mm} \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) \cdot (1 - 0,34 / (290,6 \text{ mm} / 5,8 \text{ mm})) \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 224,316 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = A_g - (h - b_{ef}) \cdot t_w = 4886,48 \text{ mm}^2 - (290,6 \text{ mm} - 224,316 \text{ mm}) \cdot 5,8 \text{ mm} = 4502,03 \text{ mm}^2$$

$$Q_a = A_{ef} / A_g = 4502,03 \text{ mm}^2 / 4886,48 \text{ mm}^2 = 0,921$$

$$\text{Portanto } Q = Q_s \cdot Q_a = 1 \cdot 0,921 = 0,921$$

5.5.1. Eixo X

$$N_{ex} = \pi^2 \cdot E \cdot I_x / (K_x \cdot L_x)^2 = \pi^2 \cdot 200 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 84,053 \times 10^6 \text{ mm}^4 / (1 \cdot 6000 \text{ mm})^2 = 4608,724 \text{ kN}$$

$$\lambda_{0x} = \text{Raiz}(Q \cdot A_g \cdot f_y / N_{ex}) = \text{Raiz}(0,921 \cdot 4886,48 \text{ mm}^2 \cdot 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 4608,724 \text{ kN}) = 0,581$$

$$X_x = 0,658 \wedge (\lambda_{0x}^2) = 0,658 \wedge (0,581^2) = 0,868$$

$$NR_{dx} = X_x \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y / \gamma_{a1} = 0,868 \cdot 0,921 \cdot 4886,48 \text{ mm}^2 \cdot 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 1,1 = 1226,237 \text{ kN}$$

5.5.2. Eixo Y

$$N_{ey} = \pi^2 \cdot E \cdot I_y / (K_y \cdot L_y)^2 = \pi^2 \cdot 200 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 7,267 \times 10^6 \text{ mm}^4 / (1 \cdot 6000 \text{ mm})^2 = 398,458 \text{ kN}$$

$$\lambda_{0y} = \text{Raiz}(Q \cdot A_g \cdot f_y / N_{ey}) = \text{Raiz}(0,921 \cdot 4886,48 \text{ mm}^2 \cdot 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 398,458 \text{ kN}) = 1,974$$

$$X_y = 0,877 / \lambda_{0y}^2 = 0,877 / 1,974^2 = 0,225$$

$$NR_{dy} = X_y \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y / \gamma_{a1} = 0,225 \cdot 0,921 \cdot 4886,48 \text{ mm}^2 \cdot 0,345 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 1,1 = 317,679 \text{ kN}$$

Como $NR_{dy} < NR_{dx}$, então $NR_d = 317,679 \text{ kN}$

5.6. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA

Como $N_{sd} / NR_d = 42,325 / 317,679 = 0,133 < 0,2$ então a verificação é feita de acordo com item

5.5.1.2 (b) da NBR 8800:2008:

$$N_{sd} / (2 \cdot NR_d) + M_{sd,1} / MR_d,1 =$$

$$42,325 / (2 \cdot 317,679) + 80,767 / 129,082 = 0,692 \leq 1$$

$$V_{sd,1} / VR_d,1 = 13,461 / 338,351 = 0,04 \leq 1$$

$$V_{sd,2} / VR_d,2 = 0 / 602,37 = 0 \leq 1$$

Segurança atendida.

StrucTool 2021. Módulo de Projeto de Estruturas em Aço.

Software desenvolvido para fins educacionais.

Desenvolvedor: Matheus Haubert Yokomizo, Engenheiro Civil

Supervisor: Prof. Rodolfo Krul Tessari, Doutor em Engenharia de Estruturas

21/02/2021 21:03



APÊNDICE B – Memorial de cálculo de simulação



1. SIMULAÇÃO

1.1. DADOS DA SEÇÃO TRANSVERSAL

Tipo de Perfil: Perfil C

Perfil: C 152,40 x 15,62

Tipo de aço: ASTM A36 → $f_y = 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2$, $f_u = 0,4 \text{ kN} / \text{mm}^2$

Propriedades geométricas da seção transversal:

Massa Linear = 15,62 Kg / m

$d = 152,4 \text{ mm}$

$b_f = 51,66 \text{ mm}$

$t_f = 8,71 \text{ mm}$

$t_w = 7,98 \text{ mm}$

$h = 110,4 \text{ mm}$

$k = 21 \text{ mm}$

Área = 1977,06 mm²

$I_x = 6,256 \times 10^6 \text{ mm}^4$

$W_x = 82,094 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$Z_x = 100,77 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$r_x = 56,25 \text{ mm}$

$I_y = 0,383 \times 10^6 \text{ mm}^4$

$W_y = 9,879 \times 10^3 \text{ mm}^3$

$Z_y = 19 \times 10^3 \text{ mm}^3$

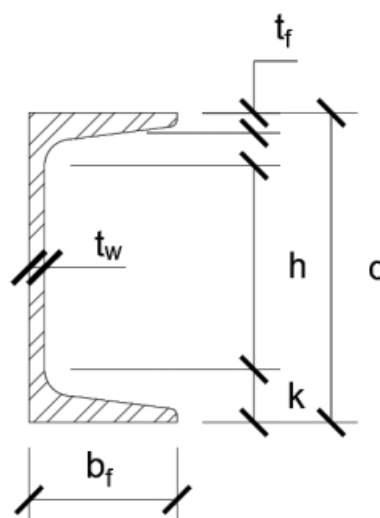
$r_y = 13,92 \text{ mm}$

$J = 45,34 \times 10^3 \text{ mm}^4$

$R_t = 17,91 \text{ mm}$

$C_w = 1,579 \times 10^9 \text{ mm}^6$

$L_b = 3000 \text{ mm}$



1.2. ESFORÇOS SOLICITANTES

A Tabela 1 apresenta os esforços atuantes na seção mais solicitada do elemento.

Tabela 1 - Esforços atuantes na seção.

| Eixo Principal | Msd (kN.m) | Vsd (kN) | Nsd (kN) |
|----------------|------------|----------|----------|
| 1 | 13,302 | 0 | 0 |
| 2 | 0,06 | 0,099 | 0 |

1.3. DETERMINAÇÃO DO MOMENTO RESISTENTE DE CÁLCULO

A determinação dos parâmetros para o cálculo do momento resistente de cálculo foi feita de acordo com o Anexo G (NBR 8800:2008, p. 130).

Os parâmetros M_r , M_{cr} , λ , λ_p e λ_r foram calculados a partir da Tabela G.1 (p. 134).

1.3.1. Flambagem Local Da Alma (FLA)

1.3.1.1. Eixo principal 1

$$\lambda = h / t_w = 110,4 \text{ mm} / 7,98 \text{ mm} = 13,835$$

$$\lambda_p = 3,76 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 3,76 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 106,349$$

$$M_{pl} = f_y \cdot Z_x = 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 100,77 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 25,193 \text{ kN.m}$$

Como $13,835 \leq 106,349$, então o perfil é compacto em FLA, logo MRd é calculado pelo item G.2.2 (a):

$$MRd = M_{pl} / \gamma_{a1} = 25,193 \text{ kN.m} / 1,1 = 22,902 \text{ kN.m}$$

1.3.1.2. Eixo principal 2

$$\lambda = h / t_w = 110,4 \text{ mm} / 7,98 \text{ mm} = 13,835$$

$$\lambda_p = 1,12 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 1,12 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 31,678$$

$$M_{pl} = f_y \cdot Z_y = 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 19 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 4,75 \text{ kN.m}$$

Como $13,835 \leq 31,678$, então o perfil é compacto em FLA, logo MRd é calculado pelo item G.2.2 (a):

$$MRd = M_{pl} / \gamma_{a1} = 4,75 \text{ kN.m} / 1,1 = 4,318 \text{ kN.m}$$

Como $4,318 \text{ kN.m} > 1,50 \cdot W_y \cdot f_y / \gamma_{a1} = 1,50 \cdot 9,879 \times 10^3 \text{ mm}^3 \cdot 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 1,1 = 3,368 \text{ kN.m}$,
então MRd = 3,368 kN.m

1.3.2. Flambagem Local Da Mesa (FLM)

1.3.2.1. Eixo principal 1

$$\lambda = b / t_f = 8,71 \text{ mm} = 5,931$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 0,38 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 10,748$$

$$M_{pl} = f_y \cdot Z_x = 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 100,77 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 25,193 \text{ kN.m}$$

Como $5,931 \leq 10,748$, então o perfil é compacto em FLM, logo MRd é calculado pelo item G.2.2 (a):

$$MRd = M_{pl} / \gamma_{a1} = 25,193 \text{ kN.m} / 1,1 = 22,902 \text{ kN.m}$$

1.3.2.2. Eixo principal 2

$$\lambda = b_f / t_f = 51,66 \text{ mm} / 8,71 \text{ mm} = 5,931$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 0,38 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 10,748$$

$$M_{pl} = f_y \cdot Z_y = 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 19 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 4,75 \text{ kN.m}$$

Como $5,931 \leq 10,748$, então o perfil é compacto em FLM, logo MRd é calculado pelo item G.2.2 (a):

$$MRd = M_{pl} / \gamma_{a1} = 4,75 \text{ kN.m} / 1,1 = 4,318 \text{ kN.m}$$

Como $4,318 \text{ kN.m} > 1,50 \cdot W_y \cdot f_y / \gamma_{a1} = 1,50 \cdot 9,879 \times 10^3 \text{ mm}^3 \cdot 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 1,1 = 3,368 \text{ kN.m}$,
então MRd = 3,368 kN.m

1.3.3. Flambagem Lateral com Torção (FLT)

$$\lambda = L_b / r_y = 3000 \text{ mm} / 13,92 \text{ mm} = 215,517$$

$$\lambda_p = 1,76 \cdot \text{Raiz}(E / f_y) = 1,76 \cdot \text{Raiz}(200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 49,78$$

$$\beta_1 = (f_y - \sigma_r) \cdot W_x / (E \cdot J) = (0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2 - 0,075 \text{ kN/mm}^2) \cdot 82,094 \times 10^3 \text{ mm}^3 / (200 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 45,34 \times 10^3 \text{ mm}^4) = 0,002$$

$$\lambda_r = 1,38 \cdot \text{Raiz}(I_y \cdot J) / (r_y \cdot J \cdot \beta_1) \cdot \text{Raiz}(1 + \text{Raiz}(1 + 27 \cdot C_w \cdot \beta_1^2 / I_y)) =$$

$$\lambda_r = 1,38 \cdot \text{Raiz}(0,383 \times 10^6 \text{ mm}^4 \cdot 45,34 \times 10^3 \text{ mm}^4) / (13,92 \text{ mm} \cdot 45,34 \times 10^3 \text{ mm}^4 \cdot 0,002) \cdot \text{Raiz}(1 + \text{Raiz}(1 + 27 \cdot 1,579 \times 10^9 \text{ mm}^6 \cdot 0,002^2 / 0,383 \times 10^6 \text{ mm}^4)) = 265,479$$

$$M_{pl} = f_y \cdot Z_x = 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2 \cdot 100,77 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 25,193 \text{ kN.m}$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r) \cdot W_x = (0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2 - 0,075 \text{ kN/mm}^2) \cdot 82,094 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 14,367 \text{ kN.m}$$

$$C_b = 1$$

Como $49,78 < 215,517 \leq 265,479$, então o perfil é semi-compacto em FLT, logo MRd é calculado pelo item G.2.1 (b):

$$MRd = C_b / \gamma_{a1} \cdot [M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot (\lambda - \lambda_p) / (\lambda_r - \lambda_p)] =$$

$$1 / 1,1 [25,193 \text{ kN.m} - (25,193 \text{ kN.m} - 14,367 \text{ kN.m}) \cdot (215,517 - 49,78) / (265,479 - 49,78)] = 15,34 \text{ kN.m}$$

1.4. DETERMINAÇÃO DA FORÇA CORTANTE RESISTENTE DE CÁLCULO

1.4.1. Eixo principal 1

$$k_v = 5$$

$$A_w = d \cdot t_w = 152,4 \text{ mm} \cdot 7,98 \text{ mm} = 1216,152 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl} = 0,6 \cdot A_w \cdot f_y = 0,6 \cdot 1216,152 \text{ mm}^2 \cdot 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2 = 182,423 \text{ kN}$$

$$\lambda = h / t_w = 110,4 \text{ mm} / 7,98 \text{ mm} = 13,835$$

$$\lambda_p = 1,1 \cdot \text{Raiz}(k_v \cdot E / f_y) = 1,1 \cdot \text{Raiz}(5 \cdot 200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 69,57$$

Como $13,835 \leq 69,57$, então

$$VRd = V_{pl} / \gamma_{a1} = 182,423 \text{ kN} / 1,1 = 165,839 \text{ kN}$$

1.4.2. Eixo principal 2

$$k_v = 1,2$$

$$A_w = 2 \cdot b_f \cdot t_f = 2 \cdot 51,66 \text{ mm} \cdot 8,71 \text{ mm} = 899,917 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl} = 0,6 \cdot A_w \cdot f_y = 0,6 \cdot 899,917 \text{ mm}^2 \cdot 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2 = 134,988 \text{ kN}$$

$$\lambda = b_f / (2 \cdot t_f) = 51,66 \text{ mm} / (2 \cdot 8,71 \text{ mm}) = 5,931 \text{ mm}^2$$

$$\lambda_p = 1,1 \cdot \text{Raiz}(k_v \cdot E / f_y) = 1,1 \cdot \text{Raiz}(1,2 \cdot 200 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2) = 34,082$$

Como $5,931 \leq 34,082$, então

$$VRd = V_{pl} / \gamma_{a1} = 134,988 \text{ kN} / 1,1 = 122,716 \text{ kN}$$

1.5. DETERMINAÇÃO DA FORÇA AXIAL RESISTENTE DE CÁLCULO

Cálculo da resistência à tração.

$$NRd = A_g \cdot f_y / \gamma_{a1} = 1977,06 \text{ mm}^2 \cdot 0,25 \text{ kN} / \text{mm}^2 / 1,1 = 449,332 \text{ kN}$$

1.6. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA

Como $N_{sd} / NRd = 0 / 449,332 = 0 < 0,2$ então a verificação é feita de acordo com item 5.5.1.2 (b) da

NBR 8800:2008:

$N_{sd} / (2 \cdot N_{Rd}) + M_{sd,1} / M_{Rd,1} =$

$0 / (2 \cdot 449,332) + 13,302 / 15,34 = 0,867 \leq 1$

$V_{sd,1} / V_{Rd,1} = 0 / 165,839 = 0 \leq 1$

$V_{sd,2} / V_{Rd,2} = 0,099 / 122,716 = 0,001 \leq 1$

Segurança atendida.



APÊNDICE C – Exemplo de prancha gerada pelo *software*