

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA REGIÃO DOS VINHEDOS  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA**

**GUILHERME LEONARDO DONA DOTTO**

**PROJETO DE MEZANINO METÁLICO EM PERFIL W LAMINADO**

**BENTO GONÇALVES**

**2022**

**GUILHERME LEONARDO DONA DOTTO**

**PROJETO DE MEZANINO METÁLICO EM PERFIL W LAMINADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na disciplina de TCC II, ao Curso de Engenharia Mecânica, no Campus Universitário da Região dos Vinhedos, da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Vagner do Nascimento.

**BENTO GONÇALVES**

**2022**

## GUILHERME LEONARDO DONA DOTTO

### PROJETO DE MEZANINO METÁLICO EM PERFIL W LAMINADO

O presente trabalho tem por objetivo demonstrar e definir o processo de elaboração de um projeto de um mezanino metálico em perfil W laminado fabricado em aço ASTM A 572 Grau 50, nas dimensões de 18 x 10 x 3 metros para uma carga de 500 kgf/m<sup>2</sup>, incluindo o seu piso *wall*. Será apresentado para a disciplina de TCC II, ao curso de Engenharia Mecânica, no Campus Universitário da Região dos Vinhedos, da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em \_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_.

#### Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Vagner do Nascimento  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof. Dr. Gustavo Ribeiro da Silva  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, que fez com que meus objetivos fossem alcançados, durante todos os meus anos de estudos.

Aos meus pais que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho. Sou grato à toda minha família pelo apoio que sempre me deram durante toda a minha vida, em especial, à minha namorada, pois, sem o seu apoio e compreensão, não teria tido êxito.

Ao professor Vagner, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e zelo. Aos ex-professores Jean Balotin e Tiago Poletto por me encorajarem a fazer o TCC no momento em que achava que não estava preparado, bem como pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional.

Às pessoas com quem convivi ao longo desses anos de curso, que me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.

## RESUMO

Diante do aumento do setor industrial, a demanda por estruturas de aço cresceu, desta forma, para suprir as necessidades e expandir a área útil de determinado espaço sem a necessidade de tornar maior o tamanho da propriedade, desenvolveu-se a estrutura metálica mezanino. Sendo, assim, o objetivo deste trabalho foi definir e explanar o processo de elaboração de um projeto de um mezanino metálico em perfil W laminado fabricado em aço ASTM A 572 grau 50 nas dimensões 18 x 10 x 3 metros para uma sobrecarga de 500 kgf/m<sup>2</sup>, incluindo o seu piso *wall*, com base nos perfis disponibilizados pela empresa Gerdau Açominas, mediante o uso do *software* comercial SCIA Engineer, sob a devida licença disponível para estudantes. Na metodologia foi apresentada a escolha do painel *wall*, bem como o *software* utilizado, além das considerações necessárias para o devido dimensionamento do mezanino, incluindo o cálculo misto, assim como as definições das ligações da estrutura dimensionada, tudo em conformidade com as normas regulamentadoras pertinentes. Por fim, concluiu-se que a estrutura metálica proposta levou a um projeto interessante para o estudo proposto, mediante resultado eficiente e esteticamente agradável.

**Palavras-chave:** Mezanino. Estrutura Metálica. Dimensionamento. Segurança.

## ABSTRACT

Given the increase in the industrial sector, the demand for steel structures has grown, thus, to meet the needs and expand the usable area of a given space without the need to make the property bigger, the mezzanine metal structure was developed. Thus, the objective of this work was to define and explain the elaboration process of a project of a metallic mezzanine in rolled W profile made of ASTM A 572 grade 50 steel in the dimensions 18 x 10 x 3 meters for an overload of 500 kgf/m<sup>2</sup>, including its floor wall, based on the profiles provided by the company Gerdau Açominas, through the use of the commercial software SCIA Engineer, under the proper license available for students. The methodology presented the choice of the wall panel, as well as the software used, and the necessary considerations for the due dimensioning of the mezzanine, including the mixed calculation, as well as the definitions of the connections of the dimensioned structure, all in accordance with the relevant regulatory standards. Finally, it was concluded that the proposed steel structure led to an interesting project for the proposed study, with efficient and aesthetically pleasing results.

**Keywords:** Mezzanine. Steel structure. Dimensioning. Safety.

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Porcentagens máximas para aços-carbonos .....                            | 10 |
| Tabela 2 – Propriedades mecânicas de aços-carbonos.....                             | 10 |
| Tabela 3 – Propriedades mecânicas de aços de baixa liga .....                       | 11 |
| Tabela 4 – Propriedades mecânicas de ligas padrão ASTM conforme NBR 8800/2008 ..... | 13 |
| Tabela 5 – Valores mínimos das cargas verticais .....                               | 16 |
| Tabela 6 – Características padrões de piso <i>wall</i> .....                        | 16 |
| Tabela 7 – Viga principal (ELU).....  | 78 |
| Tabela 8 – Viga principal (ELS).....  | 78 |
| Tabela 9 – Viga secundária (ELU) .....  | 78 |
| Tabela 10 – Viga secundária (ELS).....  | 78 |
| Tabela 11 – Viga secundária (ELS).....  | 78 |
| Tabela 12 – Pilar (ELU).....  | 79 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Os perfis padronizados pela norma ABNT NBR 6355:2003 e suas nomenclaturas.....                       | 12 |
| Figura 2 – Principais produtos laminados .....  | 14 |
| Figura 3 – Modelo de mezanino com perfil “I” e piso em laje de concreto .....                                   | 15 |
| Figura 4 – Ilustração do painel <i>wall</i> Eternit .....   | 17 |
| Figura 5 – Instalação do painel <i>wall</i> Eternit na estrutura .....  | 17 |
| Figura 6 – Fixação em via “I”/perfil .....  | 18 |
| Figura 7 – Exemplo de flambagem em uma coluna simples .....   | 23 |
| Figura 8 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados .....                                      | 26 |
| Figura 9 – Vista frontal .....  | 32 |
| Figura 10 – Vista lateral .....   | 32 |
| Figura 11 – Vista superior .....  | 32 |
| Figura 12 – Vista isométrica .....  | 33 |
| Figura 13 – Sistemas construtivos – Painel <i>Wall</i> .....  | 34 |
| Figura 14 – Sistemas construtivos – Painel <i>Wall</i> .....  | 34 |
| Figura 15 – Opção de instalação com amarração para melhor travamento.....                                       | 35 |
| Figura 16 – Valores dos fatores de combinação $\psi_0$ e redução $\psi_1$ e $\psi_2$ para ações variáveis ..... | 37 |
| Figura 17 – Tabela C.1 – Deslocamentos máximos.....   | 38 |
| Figura 18 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações $\gamma_f = \gamma_{f1}\gamma_{f3}$ .....          | 38 |
| Figura 19 – Definições dos tipos de ligamentos do mezanino .....  | 39 |
| Figura 20 – Dados para o caso de carga LC1.....   | 40 |
| Figura 21 – Dados para o caso de carga LC2.....   | 41 |
| Figura 22 – Posicionamento das cargas no painel.....  | 41 |
| Figura 23 – Dados para o caso de carga LC3.....   | 42 |
| Figura 24 – Posicionamento das sobrecargas .....  | 42 |
| Figura 25 – Combinações ELU e ELS com suas respectivas ponderações.....   | 42 |
| Figura 26 – Definições de flambagem da viga principal no eixo y-y.....  | 43 |
| Figura 27 – Definições de flambagem da viga principal no eixo z-z.....  | 43 |
| Figura 28 – Definições de flambagem da viga secundária no eixo y-y.....   | 44 |
| Figura 29 – Definições de flambagem da viga secundária no eixo z-z.....   | 44 |
| Figura 30 – Definições de flambagem dos pilares no eixo y-y .....   | 44 |
| Figura 31 – Definições de flambagem dos pilares no eixo z-z .....   | 45 |
| Figura 32 – Estrutura metálica .....  | 45 |
| Figura 33 – Verificação ELU região central da viga secundária.....  | 46 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 34 – Verificação ELU pontos extremos da viga secundária .....          | 48 |
| Figura 35 – Vigas secundárias com as maiores deformações .....                | 50 |
| Figura 36 – Verificação ELU região central da viga principal .....            | 51 |
| Figura 37 – Verificação ELU pontos extremos da viga principal .....           | 52 |
| Figura 38 – Vigas principais com as maiores deformações .....                 | 54 |
| Figura 39 – Verificação ELU nos pilares .....                                 | 55 |
| Figura 40 – Dimensões do material.....  | 57 |
| Figura 41 – Momento solicitante atuante na viga secundária.....               | 58 |
| Figura 42 – Cisalhante solicitante atuante na viga secundária.....            | 59 |
| Figura 43 – Deslocamento atuante na viga secundária .....                     | 62 |
| Figura 44 – Momento solicitante atuante na viga principal.....                | 63 |
| Figura 45 – Cisalhante solicitante atuante na viga principal.....             | 64 |
| Figura 46 – Deslocamento atuante na viga principal.....                       | 66 |
| Figura 47 – Esforço normal solicitante nos pilares .....                      | 68 |
| Figura 48 – Orientação de montagem e cálculo da empresa Gerdau Açominas ..... | 71 |
| Figura 49 – Ligações dispostas no projeto estrutural .....                    | 72 |
| Figura 50 – Orientação de montagem e cálculo da empresa Gerdau Açominas ..... | 73 |
| Figura 51 – Ligações dispostas no projeto estrutural .....                    | 74 |
| Figura 52 – Orientação de montagem e cálculo da empresa Gerdau Açominas ..... | 74 |
| Figura 53 – Ligações dispostas no projeto estrutural .....                    | 76 |
| Figura 54 – Orientação de montagem e cálculo da empresa Gerdau Açominas ..... | 76 |
| Figura 55 – Ligações dispostas no projeto estrutural .....                    | 77 |

## LISTA DE SIGLAS

|      |   |
|------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas          |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| FEM  | Fábrica de Estruturas Metálicas                   |
| FLA  | Flambagem Local da Alma                           |
| FLM  | Flambagem Local da Mesa Comprimida                |
| FLT  | Flambagem Lateral com Torção                      |
| NBR  | Norma Brasileira                                  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|           |  |
|-----------|--|
| $a$       | A distância entre enrijecedores transversais adjacentes.   |
| $A_g$     | A área bruta da seção transversal da barra.  |
| $A_w$     | A área efetiva de cisalhamento, definida para seções I, H, U e T fletidas em relação ao eixo perpendicular a alma.   |
| $C$       | <i>Celsius</i> .   |
| $C_b$     | O fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme.   |
| $C_w$     | A constante de empenamento da seção transversal.   |
| cm        | Centímetros.   |
| $d$       | A altura total da seção transversal.   |
| $E$       | O módulo de elasticidade do aço.   |
| $F_{ser}$ | A ação do serviço em kN.   |
| $f_u$     | A resistência característica do concreto à compressão.   |
| $f_y$     | A resistência ao escoamento do aço.  |
| $G$       | O módulo de elasticidades transversal do aço.  |
| $h$       | A altura da alma.  |
| $I$       | O momento de inércia da seção transversal em relação a um dos eixos principais.  |
| $J$       | A constante de torção da seção transversal.  |
| $k_v$     | Definido 5,0 para almas se enrijecedores transversais, para $\frac{a}{h} > 3$ ou para $\frac{a}{h} > \left[ \frac{260}{h/t_w} \right]^2$ e $5 + \frac{5}{(a/h)^2}$ para todos os outros casos. |
| $K_2L_2$  | O comprimento da flambagem por torção.   |
| Kg        | Quilograma.  |
| kgf       | Quilograma-força.  |
| $KL$      | O comprimento de flambagem por flexão em relação a um dos eixos principais de inércia.   |
| kN        | Quilo Newton.  |

|            |  |
|------------|--|
| $m^2$      | Metros quadrados.  |
| $m^3$      | Metros cúbicos.  |
| mm         | Milímetro.   |
| $M_A$      | O momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda.    |
| $M_B$      | O momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção centra do comprimento.  |
| $M_C$      | O momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda. |
| $M_{max}$  | O momento fletor máximo solicitando de cálculo, em módulo, no comprimento destravado.  |
| $M_{pl}$   | O momento fletor de plastificação.   |
| $M_{Sd}$   | O momento fletor solicitante de cálculo.   |
| $M_r$      | O momento fletor correspondente ao início do escoamento, incluindo a influência das tensões residuais (exceto para flambagem local da mesa).               |
| $M_{Rd}$   | O momento fletor resistente de cálculo.  |
| $N_{c,Sd}$ | A força axial de compressão solicitante do cálculo.  |
| $N_{c,Rd}$ | A força axial de compressão resistente do cálculo  |
| $N_e$      | A força axial de flambagem elástica.   |
| $N_{ey}$   | A força axial de flambagem elástica em relação ao eixo y.  |
| $N_{ez}$   | A força axial de flambagem elástica em relação ao eixo x.  |
| $Q$        | O fator de redução total associado a flambagem, cujo valor deve ser obtido no Anexo F da NBR 8800:2008.  |
| $Q_s$      | O fator de redução se a seção possuir apenas elementos AL, calculado mediante o Anexo F da NRB 8800:2008.  |
| $Q_a$      | O fator de redução se a seção possuir apenas elementos AA, calculado mediante o Anexo F da NRB 8800:2008.  |
| $r_0$      | O raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento.   |
| $r_x$      | O raio de giração em relação ao eixo central x.  |

|               |   |
|---------------|---|
| $r_y$         | O raio de giração em relação ao eixo central y.   |
| $t$           | A espessura de uma chapa, espessura mínima de filete de solda.                                      |
| $t_w$         | A espessura da alma.  |
| $V_{pl}$      | A força cortante correspondente a plastificação da alma por cisalhamento.                           |
| $V_{Rd}$      | A força cortante resistente de cálculo.   |
| $V_{Sd}$      | A força cortante solicitante de cálculo.  |
| $y_0$         | A coordenada do centro de cisalhamento na direção do eixo y em relação ao eixo geométrico da seção. |
| $\chi$        | O fator de redução associado à resistência à compressão, dado em Anexo A.                           |
| $x_0$         | A coordenada do centro de cisalhamento na direção do eixo x em relação ao eixo geométrico da seção. |
| $\lambda$     | O parâmetro de esbeltez da seção transversal.   |
| $\lambda_0$   | O índice de esbeltez reduzido.  |
| $\lambda_p$   | O parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação.   |
| $\lambda_r$   | O parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento.                                     |
| $\gamma_{a1}$ | O coeficiente de ponderação relacionado ao escoamento, flambagem e instabilidade.                   |
| $\psi_{2j}$   | O fator adimensional de redução das ações variáveis.  |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO .....                                    | 4  |
| 1.2 PROBLEMA .....                                    | 5  |
| 1.3 HIPÓTESES .....                                   | 5  |
| 1.4 OBJETIVOS .....                                   | 6  |
| 1.4.1 Objetivo geral .....                            | 6  |
| 1.4.2 Objetivos específicos.....                      | 6  |
| 1.5 JUSTIFICATIVA .....                               | 7  |
| <br>  |    |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO .....                           | 8  |
| 2.1 CONCEITOS BÁSICOS DA ENGENHARIA ESTRUTURAL.....   | 8  |
| 2.1.1 O aço como material estrutural .....            | 8  |
| 2.1.1.1 Classificação dos aços .....                  | 9  |
| 2.1.2 Perfis metálicos .....                          | 12 |
| 2.1.2.1 Perfis laminados .....                        | 14 |
| 2.1.3 Mezanino metálico .....                         | 15 |
| 2.1.4 Piso <i>wall</i> .....                          | 16 |
| 2.2 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO .....                | 18 |
| 2.2.1 Ações .....                                     | 18 |
| 2.2.1.1 Ações permanentes.....                        | 19 |
| 2.2.1.2 Ações variáveis .....                         | 19 |
| 2.2.1.3 Ações excepcionais.....                       | 20 |
| 2.2.1.4 Combinações últimas normais .....             | 20 |
| 2.2.1.5 Combinações de serviço quase permanente ..... | 21 |
| 2.3 PROJETO .....                                     | 21 |
| 2.3.1 Critérios e elementos construtivos .....        | 21 |
| 2.3.2 Concepção estrutural .....                      | 22 |
| 2.4 CONDIÇÕES GERAIS DO PROJETO .....                 | 23 |
| 2.4.1 Compressão .....                                | 23 |
| 2.4.2 Flexão.....                                     | 27 |
| 2.4.3 Cisalhamento .....                              | 29 |
| 2.5 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO .....                     | 30 |
| <br>  |    |
| 3 METODOLOGIA.....                                    | 31 |
| 3.1 APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE UTILIZADO.....           | 31 |
| 3.2 CONSIDERAÇÕES DO MEZANINO.....                    | 31 |

|  |    |
|--|----|
| 3.3 APRESENTAÇÃO DOS DADOS PARA O DIMENSIONAMENTO .....            | 33 |
| 3.3.1 Ações permanentes.....                                       | 33 |
| 3.3.2 Ações variáveis .....  | 33 |
| 3.4 DEFINIÇÃO DO ARRANJO .....                                     | 33 |
| 3.4.1 Piso <i>wall</i> .....                                       | 33 |
| 3.4.2 Vigas .....  | 35 |
| 3.4.3 Pilares .....  | 35 |
| 3.4 DESCRIÇÃO DO MATERIAL ADOTADO .....                            | 36 |
| <br>   |    |
| 4 DESENVOLVIMENTO .....  | 37 |
| 4.1 COMBINAÇÕES DAS AÇÕES.....                                     | 37 |
| 4.1.1 Estado Limite de Serviço (ELS).....                          | 37 |
| 4.1.1.1 Deslocamentos máximos .....                                | 38 |
| 4.1.2 Estado Limite Último (ELU) .....                             | 38 |
| 4.2 DEFINIÇÃO DAS LIGAÇÕES DAS VIGAS .....                         | 39 |
| 4.3 CÁLCULO VIA <i>SOFTWARE</i> .....                              | 40 |
| 4.3.1 Disposição dos carregamentos .....                           | 40 |
| 4.3.1.1 LC1 – Peso próprio da estrutura metálica .....             | 40 |
| 4.3.1.2 LC2 – Peso próprio das placas de piso <i>wall</i> .....    | 40 |
| 4.3.1.3 LC3 – Sobrecarga de 500kgf/m <sup>2</sup> .....            | 41 |
| 4.3.1.4 Combinação ELU e ELS.....                                  | 42 |
| 4.3.2 Definição dos comprimentos e configuração de flambagem ..... | 43 |
| 4.3.3 Resultados .....   | 45 |
| 4.3.3.1 Vigas secundárias .....                                    | 46 |
| 4.3.3.1.1 Estado Limite de Último (ELU) .....                      | 46 |
| 4.3.3.1.2 Estado Limite de Serviço (ELS).....                      | 50 |
| 4.3.3.2 Vigas principais .....                                     | 50 |
| 4.3.3.2.1 Estado Limite de Último (ELU) .....                      | 51 |
| 4.3.3.2.2 Estado Limite de Serviço (ELS).....                      | 54 |
| 4.3.3.3 Pilares .....  | 55 |
| 4.3.3.3.2 Estado Limite de Último (ELU) .....                      | 55 |
| 4.3.3.3.1 Estado Limite de Serviço (ELS).....                      | 56 |
| 4.4 CÁLCULO MISTO .....  | 57 |
| 4.4.1 Vigas secundárias .....                                      | 57 |
| 4.4.1.1 Estado Limite de Último (ELU) .....                        | 58 |
| 4.4.1.1.1 Esforço solicitante de cálculo .....                     | 58 |
| 4.4.1.1.2 Esforço resistente de cálculo.....                       | 59 |

|   |    |
|---|----|
| 4.4.1.1.2.1 Momento resistente .....  | 59 |
| 4.4.1.1.2.1.1 Flambagem Local da Alma (FLA) .....                                 | 59 |
| 4.4.1.1.2.1.2 Flambagem Local da Mesa (FLM) .....                                 | 59 |
| 4.4.1.1.2.1.3 Flambagem Lateral com Torção (FLT) .....                            | 60 |
| 4.4.1.1.2.2 Esforço cisalhante .....  | 61 |
| 4.4.1.2 Estado Limite de Serviço (ELS).....                                       | 62 |
| 4.4.2 Vigas principais .....  | 62 |
| 4.4.2.1 Estado Limite de Último (ELU) .....                                       | 63 |
| 4.4.2.1.1 Esforço solicitante de cálculo .....                                    | 63 |
| 4.4.2.1.2 Esforço resistente de cálculo.....                                      | 64 |
| 4.4.2.1.2.1 Momento resistente .....  | 64 |
| 4.4.2.1.2.1.1 Flambagem Local da Alma (FLA) .....                                 | 64 |
| 4.4.2.1.2.1.2 Flambagem Local da Mesa (FLM).....                                  | 65 |
| 4.4.2.1.2.1.3 Flambagem Lateral com Torção (FLT) .....                            | 65 |
| 4.4.2.1.2.2 Esforço cisalhante .....  | 65 |
| 4.4.2.2 Estado Limite de Serviço (ELS).....                                       | 66 |
| 4.4.3 Pilares .....   | 67 |
| 4.4.3.1 Estado Limite de Último (ELU) .....                                       | 67 |
| 4.4.3.1.1 Esforço solicitante de cálculo .....                                    | 67 |
| 4.4.3.1.2 Esforço resistente de cálculo.....                                      | 68 |
| 4.4.3.1.2.1 Compressão .....  | 68 |
| 4.4.3.1.2.1.1 Limitação do índice de esbeltez .....                               | 68 |
| 4.4.3.1.2.1.2 Verificação dos elementos compridos AL e AA .....                   | 68 |
| 4.4.3.1.2.1.2.1 Verificação da mesa (AL) .....                                    | 69 |
| 4.4.3.1.2.1.2.2 Verificação da alma (AA).....                                     | 69 |
| 4.4.3.1.2.1.3 Força axial de flambagem elásticas .....                            | 69 |
| 4.4.3.1.2.1.4 Índice de esbeltez reduzido ( $\lambda_0$ ) .....                   | 70 |
| 4.4.3.1.2.1.5 Força axial de compressão resistente de cálculo ( $N_c, R_d$ )..... | 70 |
| 4.4.3.2 Estado Limite de Serviço (ELS).....                                       | 71 |
| 4.5 LIGAÇÕES .....  | 71 |
| 4.5.1 Ligações viga secundária com viga principal .....                           | 71 |
| 4.5.2 Ligações viga secundária com pilar .....                                    | 73 |
| 4.5.3 Ligações viga principal com pilar.....                                      | 74 |
| 4.5.4 Base do pilar .....   | 76 |
| <br>  |    |
| 5 RESULTADO MEDIANTE A COMPARAÇÃO DOS CÁLCULOS.....                               | 78 |



|   |    |
|---|----|
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....  | 80 |
| 7 REFERÊNCIAS.....  | 81 |
| ANEXO A – DESLOCAMENTOS MÁXIMOS .....                                       | 83 |
| ANEXO B – COEFICIENTES DE PONDERAÇÕES DE AÇÕES.....                         | 84 |
| ANEXO C – FATORES DE COMBINAÇÃO E REDUÇÃO PARA AS AÇÕES VARIÁVEIS .....     | 85 |
| ANEXO D – COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS.....                  | 86 |
| ANEXO E – VALOR DE $\chi$ EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE ESBELTEZ $\lambda_0$ ..... | 87 |
| ANEXO F – VALORES DE <i>btlim</i> .....                                     | 88 |
| ANEXO G – PARÂMETROS DE MOMENTO FLETOR RESISTENTE.....                      | 89 |
| ANEXO F – TABELA DE BITOLAS DA EMPRESA GERDAU AÇOMINAS .....                | 90 |

## 1 INTRODUÇÃO

O universo em que se insere o tema proposto é de edificação em estruturas metálicas, especificamente o projeto de mezanino metálico industrial, incluindo o seu piso *wall*, em perfil W laminado fabricado em aço ASTM A 572 grau 50 nas dimensões 18 x 10 x 3 metros para uma sobrecarga de 500 kgf/m<sup>2</sup>, priorizando a segurança do projeto em conformidade as normas regulamentadoras.

Martha (2010) sinaliza o grande avanço que a engenharia estrutural teve no final do século XIX, devido a Revolução Industrial, razão pela qual buscou-se a eficiência produtiva, a qualidade de produtos e a maior adaptabilidade as recorrentes mudanças para esses segmentos, gerando, desta forma, um aperfeiçoamento nos materiais de maior resistência mecânica.

Em consequência, possibilitou-se aos engenheiros o dimensionamento das forças e solicitações que logram a segurança nas estruturas ou em seus componentes, além da definição dos materiais adequados e o necessário projeto da estrutura com a identificação dos componentes que geram efeitos prejudiciais ao seu êxito.

Com isso, nos primórdios dos anos 2000, a utilização de estruturas metálicas no Brasil teve elevado crescimento, estimando-se que o consumo de aço destinado à esta atividade, em 2002, era de 324 mil toneladas, posteriormente, em 2009, passou a ser de 1,6 milhões de toneladas (FALEIROS; JUNIOR; SANTANA, 2012), sendo que, nos dias atuais, o consumo é de 5,6 milhões de toneladas (BRASIL, 2022).

A estrutura metálica é muito utilizada, atualmente, principalmente, em situações que necessitam expandir a área útil de determinado espaço sem a necessidade de tornar maior o tamanho da propriedade, é o mezanino. Em suma, a sua edificação se dá por perfis laminados e padronizados pelo mercado, cuja geometria é alterada de acordo com o seu dimensionamento, reduzindo, desta forma, o custo final para o cliente.

Por efeito, o gerenciamento e planejamento de projetos em acordo com a legislação vigente, assim como os aspectos competitivos de um empreendimento é extremamente necessário para o bom funcionamento da obra, razão pela qual a forma de pensar e elaborar um projeto apresenta grande influência na obtenção da qualidade dos produtos fornecidos e, conseqüente, triunfo da obra.

Desta forma, o presente trabalho tem como finalidade proceder com o projeto de mezanino metálico de perfil W laminado fabricado em aço ASTM A 572 grau 50 nas dimensões 18 x 10 x 3 metros para uma carga de 500 kgf/m<sup>2</sup>, incluindo o seu piso *wall*, mediante a base de perfis da empresa Gerdau, com o uso do *software* comercial SCIA Engineer, sob a devida licença disponível para estudantes, analisando os impactos do projeto priorizando pela sua segurança de acordo com as normas regulamentadoras.

## 1.2 PROBLEMA

Com os constantes avanços tecnológicos da siderurgia, a engenharia estrutural é um importante setor de consumo de aço em todo o mundo, razão pela qual requer-se projetos bem desenvolvidos e detalhados. Desse modo, se faz indispensável a adoção das normas estabelecidas para que os dimensionamentos possuem a utilização de trabalho adequada, assim como não tenham uma massa excessiva.

Partindo dessas ponderações, e levando em consideração a grande variedade de perfis metálicos disponíveis no mercado, a presente pesquisa visa o planejamento mediante a base disponibilizada pela empresa Gerdau no intuito de responder ao problema de pesquisa: Como proceder com o adequado projeto de um mezanino metálico em perfil W laminado fabricado em aço ASTM A 572 grau 50 nas dimensões 18 x 10 x 3 metros para uma carga de 500 kgf/m<sup>2</sup>, incluindo o seu piso *wall*, priorizando pela sua segurança de acordo com as normas regulamentadoras?

## 1.3 HIPÓTESES

Tendo o presente trabalho a proposta do adequado projeto de um mezanino metálico em perfil W laminado fabricado em aço ASTM A572 grau 50 nas dimensões 18 x 10 x 3 metros para uma carga de 500 kgf/m<sup>2</sup>, incluindo o seu piso *wall*, com base nos perfis disponibilizados pela empresa Gerdau Açominas, com o uso do *software* comercial SCIA Engineer, sob a devida licença disponível para estudantes, priorizando pela segurança do projeto, acredita-se na suscitação dos seguintes fatores:

a) A necessidade de compreensão básica de um tipo de estrutura metálica disponibilizada no mercado, assim como suas especificidades ao aplicar em um projeto.

b) A introdução da modelagem 3D com *software* comercial de cálculo estrutural para o correto e eficaz projeto de um mezanino como solução para o êxito do caso simulado.

c) O emprego do dimensionamento de base estrutural de perfis W laminados conforme catalogo disponibilizado pela empresa Gerdau Açominas, incluindo o seu piso *wall*.

d) A ampliação do conhecimento e particularidades da legislação aplicada nos projetos estruturais no âmbito nacional.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo geral demonstrar e definir o processo de elaboração de um projeto de um mezanino metálico em perfil W laminado fabricado em aço ASTM A 572 grau 50 nas dimensões 18 x 10 x 3 metros para uma carga de 500 kgf/m<sup>2</sup>, incluindo o seu piso *wall*, com base nos perfis disponibilizados pela empresa Gerdau Açominas, com o uso do *software* comercial SCIA Engineer, sob a devida licença disponível para estudantes.

### 1.4.2 Objetivos específicos

O presente trabalho tem por objetivos específicos:

a) Estabelecer o estudo do projeto de mezanino metálico, que foi seguido pessoal e virtualmente pelo autor desse trabalho, partindo da área ocupada e do carregamento solicitado, de acordo com as diretrizes das normas regulamentadoras;

b) Dimensionar o mezanino do caso proposto com base nos perfis disponibilizados pela empresa Gerdau Açominas, mediante comparação do cálculo manual e o uso do *software* de modelagem computacional e estrutural, SCIA Engineer, sob a devida licença disponível para estudantes;

c) Demonstrar os resultados práticos obtidos de um extenso estudo do projeto de mezanino metálico.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

A existência de diversas obras compostas por estruturas metálicas que são produzidas no Brasil, torna essencial a busca por mecanismos de aperfeiçoamento de projetos visando o entendimento do processo de desenvolvimento de um adequado planejamento que atenda a relação comercial, as normas técnicas e a boa prática de engenharia.

Neste sentido, o gerenciamento e planejamento de projetos em acordo com a legislação vigente, além dos aspectos competitivos de um empreendimento é indispensável para o bom funcionamento da obra, razão pela qual o modo de elaborá-lo exibe grande influência na obtenção da qualidade dos produtos fornecidos e êxito. Desta forma, a pesquisa promove a difusão do tema, estabelecendo os critérios básicos definidos na engenharia estrutural para o melhor entendimento quanto ao comportamento da estrutura através do projeto de mezanino metálico.

Em tempos de constantes mudanças, torna-se essencial compreender o desenvolvimento de projetos para além da ampla compreensão e administração, mas, inclusive, para contribuir ao desenvolvimento e amadurecimento das empresas o que será demonstrado neste trabalho, mediante um estudo de caso sobre a construção de um mezanino metálico.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

É necessário esclarecer que o referencial teórico do presente projeto foi estruturado em cinco tópicos, a saber: uma breve introdução aos “conceitos básicos da Engenharia Estrutural”, os “critérios de dimensionamento”, o progresso do “projeto” elaborado e o “condições gerais do projeto” a ser aplicada, assim como do “procedimento de cálculo” adotado.

### 2.1 CONCEITOS BÁSICOS DA ENGENHARIA ESTRUTURAL

Convém pontuar que a Engenharia Estrutural, mediante teorias científicas, possibilita que “os engenheiros estabeleçam as forças e solicitações que podem atuar com segurança nas estruturas ou em seus componentes” (MARTHA, 2010), além da definição dos materiais adequados e as dimensões necessárias da estrutura e dos componentes para que não sofram efeitos prejudiciais ao seu bom funcionamento (MARTHA, 2010).

Desta forma, visando o melhor esclarecimento e contextualização da problemática levantada pela presente pesquisa, importante se faz apresentar, preliminarmente, algumas de suas palavras-chave. Para tanto, o presente capítulo está subdividido em quatro, a fim de que sejam aclarados os conceitos básicos da Engenharia Estrutural.

#### 2.1.1 O aço como material estrutural

“O primeiro material siderúrgico empregado na construção foi o ferro fundido” (PFEIL; PFEIL, 2009), ainda as primeiras obras em aço são datadas de 1750, época em que se descobriu a forma de produzi-lo industrialmente. No Brasil, a gênese da fabricação de ferro sucedeu-se por volta de 1812, sendo que em 1941 fundou-se a Companhia Siderúrgica Nacional, cuja finalidade era a produção de chapas, trilhos e perfis na bitolas américas, todavia o seu efetivo funcionamento passou a ocorrer a partir de 12 de outubro de 1946, (BELLEI, 2010).

Com o grande avanço do setor siderúrgico, incluindo a operação da Açominas para a produção de perfis laminados série américa, na década de 70, o Brasil passou a ser grande exportador de aço, razão pela qual a Companhia Siderúrgica Nacional viu a necessidade de criar, como um de seus departamentos, a FEM - Fábrica de

Estruturas Metálicas (criada em 1953 e desativada em 1998). À vista disso, iniciou-se a formação de mão de obra qualificada e do ciclo completo do aço no território nacional (BELLEI, 2010).

Dias (1997) define o aço como “uma liga metálica constituída basicamente de ferro e carbono, obtida pelo refino de ferro-gusa em equipamentos apropriados”, sendo considerado, em razão de suas específicas propriedades, um material versátil e, sobretudo, de resistência e de ductilidade utilizado largamente na construção moderna, inclusive, mediante a combinação com outros tipos de materiais, tais como concreto e madeira para construção civil.

Com base em sua importância, Pinheiro (2005) cita as seguintes vantagens do aço estrutural:

1. Fabricação das estruturas com precisão milimétrica, possibilitando um alto controle de qualidade do produto acabado;
2. Garantia das dimensões e propriedades dos materiais;
3. Material resistente a vibração e a choques;
4. Possibilidade de execução de obras mais rápidas e limpas;
5. Em caso de necessidade, possibilita a desmontagem das estruturas e sua posterior montagem em outro local;
6. Alta resistência estrutural, possibilitando a execução de estruturas leves para vencer grandes vãos;
7. Possibilidade de reaproveitamento dos materiais em estoque, ou mesmo, sobras de obra.

Bellei (2010), por sua vez, pontua como que “a pequena desvantagem dos elementos de aço carbono é a sua suscetibilidade à corrosão, o que requer que eles sejam cobertos com uma camada de tinta, ou outro método de proteção”.

Desta forma, para a utilização de estrutura metálica, faz-se necessária que as propriedades dos aços estruturais apresentem boa ductibilidade, homogeneidade, soldabilidade e resistência a corrosão (PFEIL; PEFEIL, 2009). Para tanto, utiliza-se os aços-carbono ou micro ligados, uma vez que estes apresentam baixo e médio teores de carbono, conforme será detalhado no subitem a seguir que esclarecerá as classificações dos aços.

### **2.1.1.1 Classificação dos aços**

Em resumo, “o aço é um composto que consiste quase totalmente de ferro (98%), com pequenas quantidades de carbono, silício, enxofre, fósforo, manganês,

etc.” (BELLEI, 2010), sendo o carbono o material que mais exerce efeito nas propriedades do aço.

De acordo com a sua composição química, os aços utilizados em estruturas são divididos em dois grupos que podem receber tratamentos térmicos que modificam suas propriedades mecânicas, sendo eles: aço-carbono e aço de baixa liga (PFEIL; PEFEIL, 2009).

Os aços-carbonos são os mais comuns, neles o aumento de resistência em relação ao ferro puro ocorre devido ao carbono e, em menor escala, pela adição de manganês (PFEIL; PEFEIL, 2009). Bellei (2010) enfatiza que para se permitir uma boa soldabilidade em estruturas usuais de aço é utilizado um teor de no máximo 0,45% de carbono, esclarecendo que quanto maior a porcentagem de carbono no aço, pior será sua soldabilidade, devido ao aumento de resistência e dureza do material.

Visando melhor esclarecer as porcentagens máximas de cada tipo de metal para os aços carbonos, apresenta-se a Tabela 1, além de que, na Tabela 2, mostra-se as propriedades mecânicas de aços-carbonos:

**Tabela 1 - Porcentagens máximas para aços-carbonos.**

| <b>Metal</b> | <b>Porcentagem máxima (%)</b> |
|--------------|-------------------------------|
| Carbono      | 2,00                          |
| Silício      | 0,60                          |
| Manganês     | 1,65                          |
| Cobre        | 0,35                          |

Fonte: Adaptado Pfeil e Pfeil (2009)

**Tabela 2 - Propriedades mecânicas de aços-carbono.**

| <b>Especificação</b> | <b>Teor de carbono (%)</b> | <b>Limite de escoamento <math>f_y</math> (MPa)</b> | <b>Resistência à ruptura <math>f_u</math> (MPa)</b> |
|----------------------|----------------------------|--|---|
| ABNT MR250           | baixo                      | 250  | 400   |
| ASTM A7              |                            | 240  | 370-500   |
| ASTM A36             | 0,25-0,29                  | 250 (36 ksi)                                       | 400-500   |
| ASTM A307 (parafuso) | baixo                      | -  | 415   |
| ASTM A325 (parafuso) | médio                      | 635 (min)  | 825 (min)   |
| EM S235              | baixo                      | 235  | 360   |

Fonte: Adaptado Pfeil e Pfeil (2009)

Já os aços de baixa liga são acrescidos de elementos de liga em pequena quantidade, exemplificando-se com o cromo, cobre, manganês, molibdênio silício, níquel, fósforo, vanádio, zircônio, entre outros, cuja finalidade é proporcionar a melhoria de algumas propriedades mecânicas. Bellei (2010) aclara a possibilidade de



“obter resistência elevada com teor de carbono da ordem de 0,20%, permitindo, ainda assim, uma boa soldabilidade”. Nessa senda, apresenta-se as propriedades mecânicas de aços patináveis, conforme segue:

**Tabela 3** - Propriedades mecânicas de aços baixa liga.

| <b>Especificação</b> | <b>Principais elementos de liga</b> | <b>Limite de escoamento<br/><math>f_y</math> (MPa)</b> | <b>Resistência à ruptura<br/><math>f_a</math> (MPa)</b> |
|----------------------|-------------------------------------|--|---|
| ASTM 572 Gr. 50      | C < 0,23% Mn < 1,35%                | 345  | 450   |
| ASTM A588            | C < 0,17% Mn < 1,20% Cu < 0,50%     | 345  | 485   |
| ASTM A992            | C < 0,23% Mn < 1,50%                | 345  | 450   |

Fonte: Adaptado Pfeil e Pfeil (2009)

Há, ainda, a possibilidade de os aços-carbonos, assim como os de baixa liga terem suas resistências aumentadas pelo tratamento térmico, todavia, a soldagem desse tipo de material é mais difícil, tornando seu emprego pouco usual. Pfeil e Pfeil (2009) esclarecem que:

Os parafusos de alta resistência utilizados como conectores são fabricados com aço de médio carbono sujeito a tratamento térmico (especificação ASTM A325).

Os aços de baixa liga com tratamento térmico são empregados na fabricação de barras de aço para protensão e também de parafusos de alta resistência (especificação ASTM A490).

Portanto, as propriedades mecânicas do aço variam devido os diferentes materiais incorporados em sua liga, tornando-se necessária a padronização dos valores de referência para fins de cálculo. Neste sentido, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) mediante a Norma Brasileira (NBR) 8.800 de 2008 define os seguintes valores para as propriedades mecânicas gerais do aço para fins estruturais:

- a) Módulo de Elasticidade = 200 000 MPa;
- b) Coeficiente de Poisson = 0,3;
- c) Módulo de Elasticidade Transversal = 77 000 MPa;
- d) Coeficiente de Dilatação Térmica =  $1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;
- e) Massa específica = 7 850 Kg/m<sup>3</sup>.

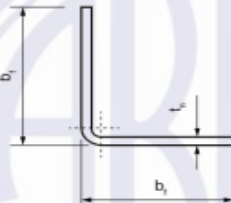
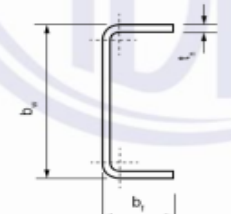
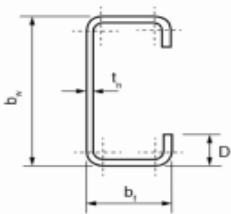
Com base em toda a contextualização exposta, no subitem a seguir serão apresentados os perfis metálicos disponíveis no mercado, assim como especificado o que será abordado no projeto proposto.

## 2.1.2 Perfis metálicos

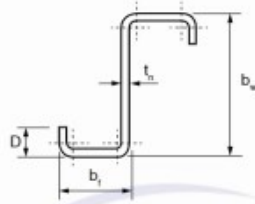
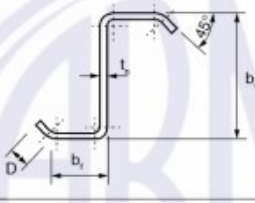
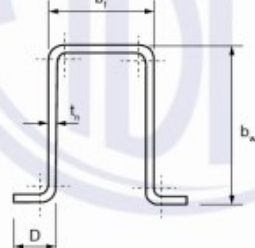
Como visto anteriormente, o aço é considerado um material extremamente leve e resistente, sendo perfeito para as construções civis, uma vez que suas características possibilitam a aplicação em diversos meios. Em consequência, os perfis metálicos podem ser classificados como laminados, soldados ou formados a frio.

Em suma, os perfis formados a frio ou perfis de chapa dobrada são formados por chapas finas de aço conformadas por meios de roletes, tendo como principal vantagem a gama ilimitada de dimensões e bitolas possíveis, assim como sua leveza e facilidade de manuseio e carregamento (PFEIL; PEFEIL, 2009). Ainda, na Figura 1, tem-se os perfis padronizados pela ABNT NBR 6355:2003, assim como as suas nomenclaturas.

Figura 1 - Os perfis padronizados pela norma ABNT NBR 6355:2003 e suas nomenclaturas:

| Série                     | Seção transversal   | Designação <sup>a</sup>  |
|---------------------------|---|--|
| Cantoneira de abas iguais |  | L $b_f \times t_n$<br>Exemplo: L 50 $\times$ 3,00  |
| U simples                 |  | U $b_w \times b_f \times t_n$<br>Exemplo: U 150 $\times$ 50 $\times$ 2,65                        |
| U enrijecido              |  | Ue $b_w \times b_f \times D \times t_n$<br>Exemplo: Ue 150 $\times$ 60 $\times$ 20 $\times$ 2,65 |

**Tabela 1 (continuação)**

| Série              | Seção transversal   | Designação <sup>a</sup>  |
|--------------------|---|--|
| Z enrijecido a 90° |  | $Z_{90} b_w \times b_f \times D \times t_f$<br>Exemplo: $Z_{90} 200 \times 75 \times 20 \times 2,25$ |
| Z enrijecido a 45° |  | $Z_{45} b_w \times b_f \times D \times t_f$<br>Exemplo: $Z_{45} 200 \times 75 \times 20 \times 2,25$ |
| Cartola            |  | $Cr b_w \times b_f \times D \times t_f$<br>Exemplo: $Cr 100 \times 50 \times 20 \times 3,35$         |

<sup>a</sup> As dimensões devem ser apresentadas em milímetros.

Fonte: Perfis formados a frio padronizados - ABNT NBR 6255:2003 (adaptado).

Em relação aos perfis soldados, estes são formados a partir da associação da solda de chapas de aço ou perfis laminados, cujos segmentos mais comuns são em forma de “I” e “T”, apresentando como vantagem a não limitação às bitolas comerciais, além de possibilitarem vigas esbeltas com enrijecedores de alma a fim de combater as flambagens nos casos de altas tensões cisalhantes (BELLEI, 2010). Igualmente, os produtos de aço são divididos em duas categorias, de acordo com a Tabela 4 a seguir:

**Tabela 4** - Propriedades mecânicas de ligas padrão ASTM conforme NBR 8800/2008.

| Classificação                                  | Denominação | Produto         | Grupo/grau                        | Limite de escoamento $f_y$ (MPa) | Resistência à ruptura $f_a$ (MPa) |     |
|--|-------------|-----------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----|
| Aços-carbono                                   | A-36        | Perfis          | 1, 2 e 3                          | 250                              | 400 a 500                         |     |
|  |             | Chapas e barras | $t < 200\text{mm}$                |                                  |                                   |     |
|  | A-500       | Perfis          | Grupo 4                           | Grau A<br>230<br>Grau B<br>290   | 310<br>400                        |     |
| Aços de baixa liga e alta resistência mecânica | A-572       | Perfis          | Grupos 1, 2 e 3                   | Grau 42                          | 290                               | 415 |
|  |             |                 |                                   | Grau 50                          | 345                               | 450 |
|  |             | Chapas e barras | Grau 42 ( $t \leq 150\text{mm}$ ) | 290                              | 415                               |     |
| Grau 50 ( $t \leq 100\text{mm}$ )              | 345         |                 | 450                               |                                  |                                   |     |

(conclusão)

| Classificação   | Denominação                        | Produto               | Grupo/grau        | Limite de escoamento $f_y$ (MPa) | Resistência à ruptura $f_a$ (MPa) |
|---|------------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Aços de baixa liga e alta resistência mecânica resistentes à corrosão atmosférica | A-242                              | Perfis                | Grupo 1           | 345                              | 485                               |
|   |                                    |                       | Grupo 2           | 315                              | 460                               |
|   |                                    | Chapas e barras       | $t < 19\text{mm}$ | 345                              | 480                               |
|   | $19\text{mm} < t < 37,5\text{mm}$  |                       | 315               | 460                              |                                   |
|   | $37,5\text{mm} < t < 100\text{mm}$ |                       | 290               | 435                              |                                   |
|   | A-588                              | Perfis                | Grupos 1 e 2      | 345                              | 485                               |
| Chapas e barras   |                                    | $t \leq 100\text{mm}$ | 345               | 480                              |                                   |

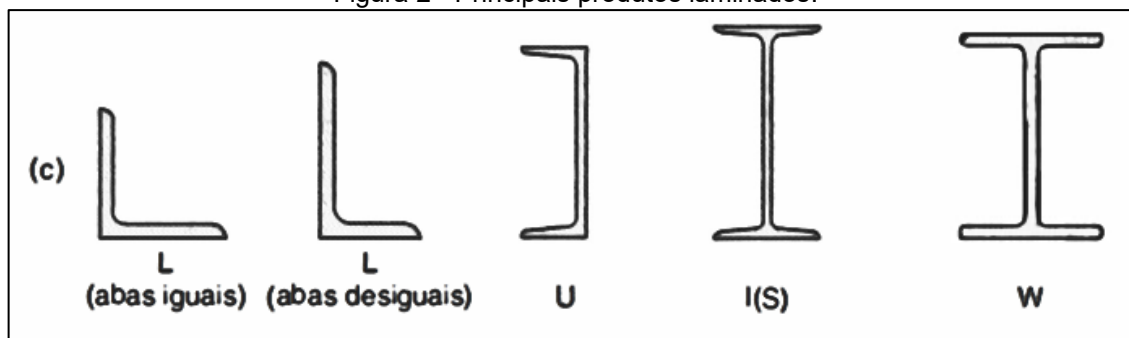
Fonte: Adaptado Pfeil e Pfeil (2009)

Desta forma, tendo em vista que o projeto a ser elaborado no presente trabalho tem como principal característica o perfil laminado, no subitem a seguir este perfil estrutural será abordado detalhadamente.

### 2.1.2.1 Perfis laminados

Na linha de pensamento de Pfeil e Pfeil (2009), os perfis laminados possuem grande eficiência estrutural, podendo ser produzidos mediante a laminação de blocos de aço nas formas H, I, C e L, conforme ilustra a Figura 2:

Figura 2 - Principais produtos laminados:



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

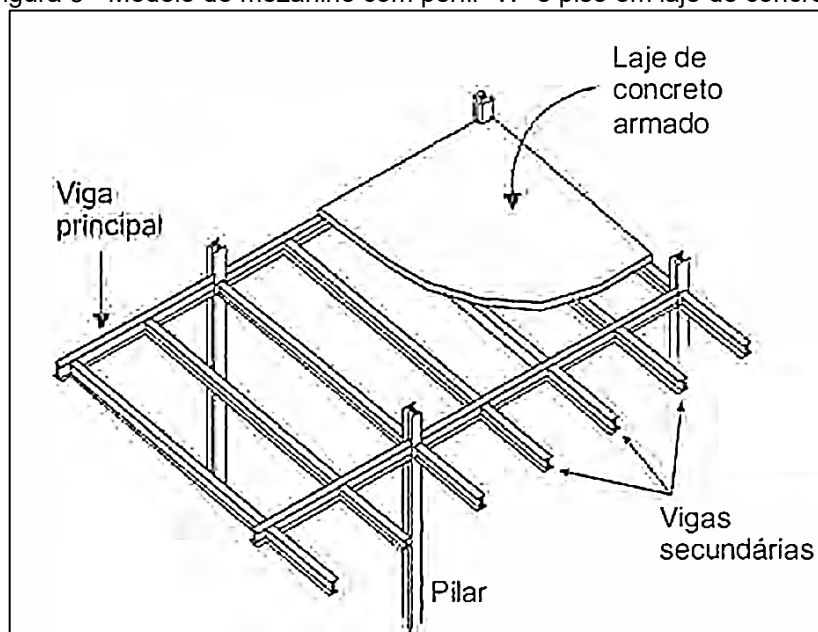
Ademais, a vantagem do uso deste tipo de perfil se dá pelo alto controle de pureza e imperfeições, além da fabricação com aços de maior resistência. Do mesmo modo, cita-se como desvantagem deste produto a limitação às bitolas padronizadas em razão do método de fabricação em larga escala.

### 2.1.3 Mezanino metálico

Considerando que um mezanino se trata de um pavimento intermediário encaixado entre dois andares, sendo que o piso ocupa apenas uma parte da construção, sua principal finalidade é aumentar a área útil de um determinado imóvel.

Com efeito, tem-se que sua estrutura é composta por pilares de sustentação, vigas principais e secundárias aliados aos painéis de laje de concreto armado, em piso metálico ou em madeira. Ainda, de acordo com o subitem 2.1.2.1, assim como o objeto do presente trabalho, o perfil laminado mais utilizado é o “I” ou “W”, neste sentido, ilustra-se com a Figura 3 a seguir:

Figura 3 - Modelo de mezanino com perfil “W” e piso em laje de concreto:



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009).

Cuida-se ressaltar que, geralmente, utiliza-se este tipo de estrutura em consultórios, academias, restaurantes, suporte para grandes máquinas, bibliotecas, *shoppings centers*, dentre outras possibilidades, tendo em vista a grande facilidade e agilidade na montagem.

Igualmente, tem-se que a carga aplicada na estrutura desta estrutura metálica tende a variar de acordo com a utilização, sendo definida pela NBR 6120:2019. Portanto, na Tabela 5 segue demonstrado os valores utilizados para algumas situações.

**Tabela 5** - Valores mínimos das cargas verticais.

| Utilização                   | Carga aplicada (kN/m <sup>2</sup> ) |
|------------------------------|-------------------------------------|
| Escritórios                  | 2,0                                 |
| Refeitórios                  | 3,0                                 |
| Áreas de práticas esportivas | 5,0                                 |
| Garagens e estacionamentos   | 3,0                                 |
| Lojas                        | 4,0                                 |
| Restaurantes                 | 3,0                                 |

Fonte: Adaptado da NBR 6120 de 1980.

#### 2.1.4 Piso *wall*

O sistema de piso *wall* ou laje seca é compreendido por placas constituídas por miolo de madeira maciça, laminada ou sarrafeada, contraplacando em suas faces por lâminas de madeiras e externamente por placas cimentícias reforçado com fio sintético prensado.

Dentre suas vantagens, tem-se que a placa *wall* evita o desperdício e a geração de lixo ou entulhos, uma vez que otimiza a definição do projeto. Neste sentido, Pessarello (2008) assim exemplifica:

Para confecção de 1 m<sup>3</sup> de concreto em central dosadora consomem em média 211 litros de água. As atividades de concretagem apontaram como sendo uma grande vilã de água nas obras, os serviços de concretagem corresponderam entre 39.15 e 68.63% do consumo final.

Assim, conclui-se que o piso *wall* elimina em 100% a necessidade do uso de recursos hídricos em uma obra, especialmente por haver um maior foco nesta diminuição já que em alguns lugares há muita escassez (PASSARELLO, 2008).

Levando em conta que o piso *wall* possui o seu tamanho padronizado no mercado, o projeto de um mezanino metálico é elaborado para o melhor aproveitamento das placas, a fim de evitar desperdícios, razão pela qual apresenta-se na Tabela 6 o peso e as dimensões catalogadas pela fabricante Eternit.

**Tabela 6** – Características padrões de piso *wall*.

| Largura (mm) | Comprimento (mm) | Espessura (mm) | Área (m <sup>2</sup> ) | Peso (kg) | Peso/m <sup>2</sup> (kg/m <sup>2</sup> ) |
|--------------|------------------|----------------|------------------------|-----------|--|
| 1,20         | 2,10             | 40             | 2,52                   | 80,6      | 32,00                                    |
| 1,20         | 2,50             | 40             | 3,00                   | 96,0      | 32,00                                    |
| 1,20         | 2,75             | 40             | 3,30                   | 105,6     | 32,00                                    |
| 1,20         | 3,05             | 40             | 3,66                   | 117,1     | 32,00                                    |
| 1,20         | 2,10             | 55             | 2,52                   | 94,5      | 37,51                                    |
| 1,20         | 2,50             | 55             | 3,00                   | 112,5     | 37,51                                    |
| 1,20         | 2,75             | 55             | 3,30                   | 123,8     | 37,51                                    |
| 1,20         | 3,05             | 55             | 3,66                   | 137,3     | 37,51                                    |

Fonte: Adaptado da Eternit (2021).

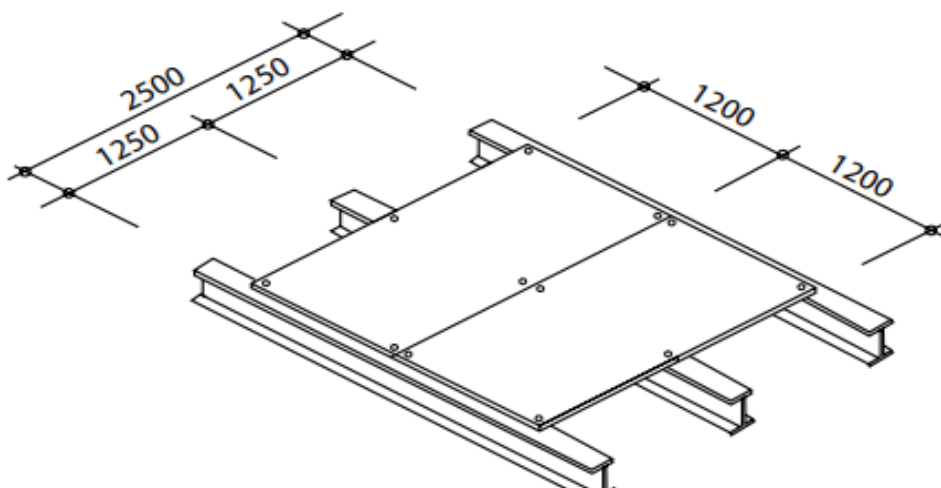
Ademais, tem-se que para a instalação das placas de painel *wall*, ilustrado na Figura 4, não se faz necessária a soldagem de conectores, bastando a fixação das chapas aos perfis por parafusos, conforme demonstrado nas Figuras 5 e 6:

Figura 4 – Ilustração do painel *wall* Eternit:



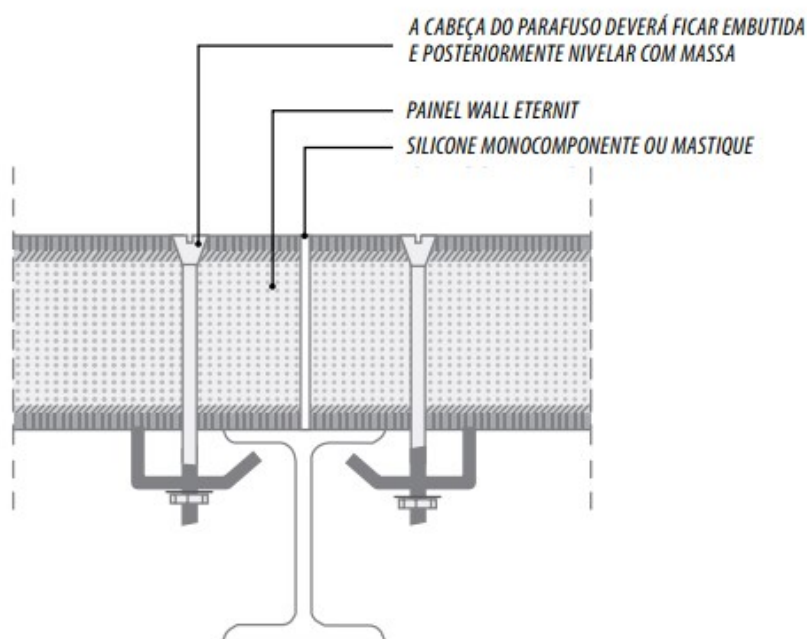
Fonte: Eternit (2022).

Figura 5 – Instalação do painel *wall* Eternit na estrutura:



Fonte: Eternit (2021).

Figura 6 – Fixação em viga “I”/perfil:



Fonte: Eternit (2021).

Após compreender estes conceitos básicos, a seguir serão abordados os critérios de dimensionamento e do projeto a ser desenvolvido no presente trabalho.

## 2.2 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Tendo em vista a contextualização apresentada no capítulo anterior, o presente capítulo possui um subcapítulo o qual subdivide-se em quatro, a fim de que sejam apresentados os critérios normatizados para a definição e combinação das ações, assim como o dimensionamento no estado limite último de um mezanino metálico.

### 2.2.1 Ações

De modo geral, a análise das ações atuantes na estrutura caracteriza por ser uma das partes iniciais do projeto, além de uma das de maior importância e complexidade, de forma que uma estrutura deve suportar as cargas e suas combinações no pior caso, mantendo as condições dentro dos limites de estabilidade.

Neste sentido, a ABNT NBR 8800:2008 estabelece as ações, os limites de estabilidade e suas combinações, considerando os estados limites últimos e de



utilização. Ainda, segundo a norma, as ações são classificadas em três categorias, veja-se:

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

Nos subitens a seguir, serão abordadas detalhadamente cada ação prevista na ABNT NBR 8800 de 2008.

### **2.2.1.1 Ações permanentes**

A ABNT NBR 8800:2008 assim determina:

Ações permanentes são as que ocorrem com valores praticamente constantes durante toda a vida útil da construção. Também são consideradas permanentes as ações que crescem com o tempo, tendo um valor limite constante.

Desta forma, conclui-se que os pesos dos elementos da própria estrutura, assim como os construtivos associados à estrutura (laje, cobertura, piso do mezanino) constituem algumas das ações atuantes em estrutura usuais.

Aliás, os pesos específicos dos materiais geralmente utilizados nas construções são sugeridos pela ABNT NBR 6120:2019, ainda, na falta desses, os valores podem ser alcançados dos catálogos de fabricantes.

### **2.2.1.2 Ações variáveis**

Ainda, em conformidade com a ABNT NBR 8800:2008, as ações variáveis correspondem aos valores que apresentam variações significativas durante a vida útil da construção. Constitui-se a hipótese de, usualmente, ocorrem pelo uso e ocupação da edificação, exemplificando-se com sobrecargas em pisos e coberturas, a ação de equipamentos e divisórias móveis, além das ações do vento.

Para tanto, pode-se obter os valores de uso e ocupação da edificação pela ABNT NBR 6120:2019, mesmo que a ação dos ventos é determinada pela ABNT NBR 6123:1998.

### 2.2.1.3 Ações excepcionais

Em última análise, a ABNT NBR 8800:2008 define que:

As ações excepcionais são as que têm duração extremamente curta e probabilidade muito baixa de ocorrência durante a vida da construção [...]. São ações excepcionais aquelas decorrentes de causas como explosões, choques de veículos, enchentes e sismos excepcionais.

Assim, quando da ocorrência de projeto estrutural sujeito a situações excepcionais de carregamento em que não há como controlar os efeitos de suas ações, deve-se considerar valores definidos, em cada particular, por normas brasileiras específicas.

### 2.2.1.4 Combinações últimas normais

A ABNT NBR 8800:2008 estabelece que as combinações últimas normais decorrem do uso previsto para a edificação. Para tanto, devem ser consideradas tantas combinações de ações quantas forem necessárias para verificação das condições de segurança em relação a todos os estados-limites últimos aplicáveis.

Ainda, em cada combinação devem estar incluídas as ações permanentes, a ação variável principal e as demais ações variáveis, todas elas com seus respectivos coeficientes de ponderações ( $\gamma$ ) atribuídos.

Diante do exposto, tem-se que para cada combinação é aplicada a seguinte expressão (Equação 1):

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

Equação 1:

Onde:

$F_d$  é a combinação última normal;

$F_{Gi,k}$  representa os valores característicos das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$  é o valor característico da ação variável considerada principal para a combinação;

$F_{Qj,k}$  representa os valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal;

$\gamma_g$  coeficiente de ponderação para a ação permanente;

$\gamma_q$  coeficiente de ponderação para as ações variáveis;

$\psi_0$  coeficiente dos fatores de combinação para as ações variáveis.

Se esclarece que esses coeficientes são encontrados nas Tabelas 1 e 2 da ABNT NBR 8800:2008, bem como nos anexos B e C do presente trabalho.

### 2.2.1.5 Combinações de serviço quase permanente

De acordo com a ABNT NBR 8800:2008, as combinações de ações devem ser elaboradas de forma a determinar os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura. Oportunamente, se esclarece que podem ser classificadas como quase permanentes, frequentes e raras.

Neste sentido, detalha-se as combinações de serviços quase permanente, já que são as que a atuação se dá ao longo de grande parte da vida útil da estrutura, além de serem utilizadas para efeitos de longa duração e avaliação de deslocamentos excessivos.

Desta forma, considera-se os valores de ações permanentes com seus valores característicos e ações variáveis com seus valores quase permanentes, em conformidade a seguinte expressão da ABNT NBR 8800 de 2008 (Equação 2):

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} F_{Qj,k}$$

Equação 2:

Onde:

$F_{ser}$  é a combinação de serviço quase permanente;

$\psi_{2j}$  é o fator adimensional de redução das ações variáveis, encontrado na Tabela 2 da norma e anexo C deste trabalho.

## 2.3 PROJETO

Após compreender os conceitos apresentados nos capítulos anteriores, aprofunda-se a problemática levantada no presente trabalho, especialmente dos critérios e a concepção estrutural do projeto que será elaborado. Assim, este capítulo possui dois subcapítulos visando demonstrar os critérios e limitações do projeto elaborado, assim como sua elaboração estrutural.

### 2.3.1 Critérios e elementos construtivos

Considerando os elementos que usualmente compõem uma estrutura metálica, em observância a ABNT NBR 8800:2008, assim como satisfação das

necessidades deste projeto serão elementos de aço ASTM A 572 grau 50 em perfil W laminado nas dimensões 18 x 10 x 3 metros para carga de 500 kgf/m<sup>2</sup>, mediante a base de perfis da empresa Gerdau. Estes podem ser identificados por sua:

- Geometria definida (perfil, barra, chapa);
- Composição química;
- Propriedades mecânicas.

### **2.3.2 Concepção estrutural**

Pfeil e Pfeil (2009) esclarecem que um projeto estrutural deve evitar o colapso da estrutura ou deslocamentos, vibrações e danos locais excessivos, a fim de garantir a segurança e o bom desempenho do empreendimento. Desta forma, os engenheiros se orientam com base nos documentos normativos, confeccionados por regras e orientações que determinam as bases para o dimensionamento e prováveis verificações estruturais.

Ainda, levando em consideração que as estruturas metálicas são produzidas na fábrica e no canteiro de obras, visando que, ao final de todos os processos, a estrutura mantenha-se estável, segura e capaz de absorver os esforços existentes, é indispensável o exame de diversos fatores.

Desta forma, apresenta-se as principais propriedades mecânicas, vantagens e desvantagens das estruturas de aço, além dos princípios apresentados nas normativas pertinentes ao estudo e projeto dessas estruturas, assim como os elementos estruturais, como os produtos a serem utilizados, e os critérios para definição de carga e dimensionamento.

O sistema estrutural do dimensionamento é definido, inicialmente, pelo carregamento (sobrecargas, massa) e, posteriormente, pelo projeto das vigas secundárias que aportam a modulação das placas dos painéis *wall*. Convém esclarecer que as reações destas vigas transferem os esforços para as vigas principais, onde as mesmas transferem para o pilar, cujo dimensionamento é realizado na sequência.

A partir da avaliação do projeto, poderão ser definidos as adequadas escolhas para trazer benefícios para o conjunto da obra, tais como menor peso da estrutura, rapidez de montagem, menor curso e facilidade na fabricação.

Como resultado, a definição do sistema estrutural equivale na concepção do modelo a ser dimensionado, sendo que, nas palavras de Pfeil e Pfeil (2009), os elementos estruturais podem ser formados por modelos planos de elementos (colunas, tirantes, vigas) que foram pórticos ligados por solda, parafusos, etc., assim como são compostos por elementos secundários, ou seja, sistema de pisos para as edificações (vigas, chapas *steel deck*, piso *wall*, etc.).

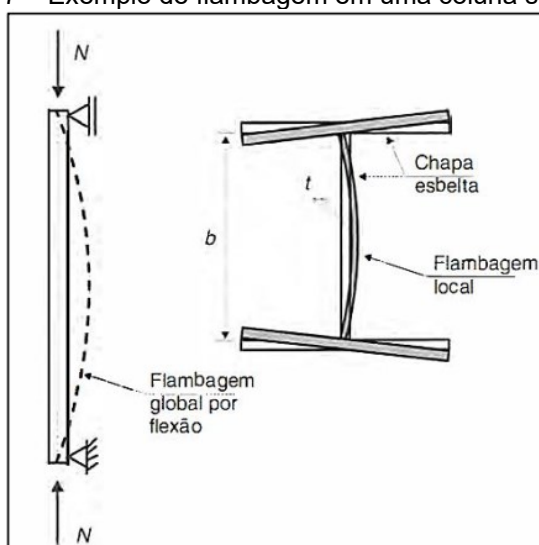
## 2.4 CONDIÇÕES GERAIS DO PROJETO

Com base nas contextualizações anteriores, assim como na problemática levantada neste projeto, o presente capítulo busca esclarecer o dimensionamento que será realizado no presente projeto, levando em consideração a necessidade da avaliação do tipo de carregamento que a peça irá sofrer, tais como compressão, flexão ou cisalhamento, para então determinar sua resistência.

### 2.4.1 Compressão

Pfeil e Pfeil (2009) esclarecem que o principal elemento de uma estrutura que sofre compressão vertical é denominado coluna, o qual gera um aumento de curvatura inicial da peça. Os deslocamentos laterais resultam um processo chamado de flambagem por flexão ocasionando uma redução na capacidade de carga em comparação a uma peça tracionada.

Figura 7 – Exemplo de flambagem em uma coluna simples:



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009).

De acordo com a ABNT NBR 8800:2008, é necessário considerar para o dimensionamento de peças comprimidas a seguinte disposição:

Equação 3:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$$

Onde:

$N_{c,Sd}$  é a força axial de compressão solicitante do cálculo;

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

Ainda, deve ser observada as condições pertinentes à limitação de esbeltez.

Do mesmo modo, a força axial de compressão resistente de cálculo de um componente ( $N_{c,Rd}$ ), relacionado aos estados limites últimos de instabilidade por flexão, torção ou flambagem local, deverão considerar a seguinte equação:

Equação 4:

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

Onde:

$\chi$  é o fator de redução associado à resistência à compressão, dado em Anexo A;

$Q$  é o fator de redução total associado a flambagem local, cujo valor deve ser obtido no Anexo F da NBR 8800:2008;

$A_g$  é a área bruta da seção transversal da barra;

$f_y$  é a resistência ao escoamento do aço;

$\gamma_{a1}$  é o coeficiente de ponderação relacionado ao escoamento, flambagem e instabilidade.

O fato de redução associado à resistência à compressão ( $\chi$ ) é dado por:

Equação 5:

$$\text{Para } \lambda_0 \leq 1,5: \chi = 0,658^{\lambda_0^2}$$

$$\text{Para } \lambda_0 > 1,5: \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$$

Onde:

$\lambda_0$  é o índice de esbeltez reduzido.

Neste sentido, o índice de esbeltez reduzido ( $\lambda_0$ ) é dado por:

Equação 6:

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

Onde:

$N_e$  é a força axial de flambagem elástica.

Pfeil e Pfeil (2009) destacam que a força axial de flambagem elástica é a máxima carga de compressão que o perfil pode suportar sem sofrer deslocamentos

laterais, para tanto, sua equação pode variar conforme geometria do perfil de acordo com as descrições das Equações 7 e 8 a seguir, nos casos de dupla simetria ou simétricas em relação a um ponto.

Flambagem por flexão:

Equação 7:

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$$

Flambagem por torção:

Equação 8:

$$N_e = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_2 L_2)^2} + GJ \right]$$

Onde:

$KL$  é o comprimento de flambagem por flexão em relação a um dos eixos principais de inércia;

$I$  é o momento de inércia da seção transversal em relação a um dos eixos principais;

$K_2 L_2$  são o comprimento da flambagem por torção;

$E$  é o módulo de elasticidade do aço;

$C_w$  é a constante de empenamento da seção transversal;

$G$  é o módulo de elasticidades transversal do aço;

$J$  é a constante de torção da seção transversal;

$r_0$  é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento.

Convém esclarecer que o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento ( $r_0$ ) é dado por:

Equação 9:

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2}$$

Onde:

$r_x$  é o raio de giração em relação ao eixo central x;

$r_y$  é o raio de giração em relação ao eixo central y;

$x_0$  é a coordenada do centro de cisalhamento na direção do eixo x em relação ao eixo geométrico da seção;

$y_0$  é a coordenada do centro de cisalhamento na direção do eixo y em relação ao eixo geométrico da seção.

Além disso, a flambagem elástica por flexão-torção para seções monossimétricas é dada por:

Equação 10:

$$N_{eyz} = \frac{N_{ey} + N_{ez}}{2[1 - (y_0/r_0)^2]} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ey}N_{ez}[1 - (y_0/r_0)^2]}{(N_{ey} + N_{ez})^2}} \right]$$





Onde:

$N_{ey}$  é a força axial de flambagem elástica em relação ao eixo y;

$N_{ez}$  é a força axial de flambagem elástica em relação ao eixo x.

A ABNT NBR 8800:2008 fornece o coeficiente de flambagem por flexão, definindo os valores para seis casos ideais de condições de contorno de elementos isolados, sendo a rotação e translação das extremidades totalmente livres ou fixas. Estes valores podem ser observados na Figura 8 que segue:

Figura 8 – Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados:

|  |   |      |     |     |     |     |
|--|---|------|-----|-----|-----|-----|
| A 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<br> Rotação livre, translação impedida<br> Rotação impedida, translação livre<br> Rotação e translação livres |      |     |     |     |     |

Fonte: NBR 8800 (2008).

A ABNT NBR 8800:08, igualmente, esclarece que o coeficiente de flambagem por torção ( $K_2$ ) deve ser determinado por análise estrutural considerando suas situações:

- a) 1,00 quando ambas as extremidades da barra possuírem rotação ao redor do eixo longitudinal impedida e empenamento livre;
- b) 2,00 quando uma das extremidades da barra possuir rotação ao redor do eixo longitudinal e empenamento livres e, a outra extremidade, rotação e empenamento impedidos. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).



Ainda, para efeito de flambagem, os elementos de seções transversais, exceção seções tubulares, são classificados como AA, nos casos que possuem duas bordas longitudinais vinculadas, e AL, quando possuem apenas uma borda longitudinal vinculada (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

A norma prevê que nas barras submetidas à força axial por compressão todos os elementos componentes da seção transversal possuem relações entre largura e espessura (relações  $b/t$ ) que não superem os valores de  $(b/t)_{lim}$ , bem como tem fator de redução total  $Q$  igual a 1,00, nesses casos:

Equação 11:

$$Q = Q_s Q_a$$

Onde:

$Q_s$  é o fator de redução se a seção possuir apenas elementos AL, calculado mediante o Anexo F da NRB 8800:2008;

$Q_a$  é o fator de redução se a seção possuir apenas elementos AA, calculado mediante o Anexo F da NRB 8800:2008.

#### 2.4.2 Flexão

Considerando que no estado limite último de vigas sujeitas a flexão simples é necessário o cálculo do momento e do esforço cortante resistentes para contrapô-los aos respectivos esforços solicitantes do projeto, a resistência à flexão das vigas pode ser afetada pela flambagem local e lateral. Assim, a flambagem local é considerada pela perda da estabilidade das chapas comprimidas do perfil, reduzindo o momento resistente da seção (PFEIL, PFEIL; 2009).

A doutrina esclarece que os tipos de geometrias mais adequadas para o esforço da flexão são as áreas mais afastadas do eixo neutro, ou seja, os perfis “I” ou “W” são os mais adequados para este carregamento (PFEIL, PFEIL; 2009).

Por consequência, a ABNT NBR 8800:2008 determina a observância, quando no dimensionamento de barras submetidas ao momento fletor e força cortante, das seguintes condições:

Equação 12:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}$$

Onde:

$M_{Sd}$  é o momento fletor solicitante de cálculo;

$M_{Rd}$  é o momento fletor resistente de cálculo.

Se esclarece que o momento fletor resistente de cálculo deve ser visto como os estados limites últimos de flambagem lateral com torção (FLT), flambagem local da mesa comprimida (FLM) e flambagem local da alma (FLA) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

Neste sentido, o momento fletor resistente para seções do tipo I, H, U, C, etc., é dado pelas seguintes equações:

Equação 13:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p$$

Equação 14:

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

Equação 15:

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r$$

Equação 16:

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

Onde:

$M_{pl}$  é o momento fletor de plastificação;

$\gamma_{a1}$  é o coeficiente de ponderação relacionado ao escoamento, flambagem e instabilidade;

$C_b$  é o fato de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme;

$M_r$  é o momento fletor correspondente ao início do escoamento, incluindo a influência das tensões residuais (exceto para flambagem local da mesa);

$\lambda$  é o parâmetro de esbeltez da seção transversal definido pelo Anexo G da NBR 8800:2008;

$\lambda_p$  é o parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação definido pelo Anexo G da NBR 8800:2008;

$\lambda_r$  é o parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento definido pelo Anexo G da NBR 8800:2008;

$M_{max}$  é o momento fletor máximo solicitando de cálculo, em módulo, no comprimento destravado;

$M_A$  é o momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda;

$M_B$  é o momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção centra do comprimento;

$M_C$  é o momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a três quartos do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda.

### 2.4.3 Cisalhamento

Consoante a ABNT NBR 8800:2008, no dimensionamento das barras submetidas a força cortante, é necessária a observância das seguintes condições:

Equação 17:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}$$

Onde:

$V_{Sd}$  é a força cortante solicitante de cálculo;

$V_{Rd}$  é a força cortante resistente de cálculo.

Neste sentido, para seções I, H e U fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma, a força cortante resistente de cálculo ( $V_{Rd}$ ) é dada por:

Equação 18:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda \leq \lambda_p$$

Equação 19:

$$V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$$

Equação 20:

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

Equação 21:

$$\lambda = \frac{h}{t_w}$$

Equação 22:

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}}$$

Equação 23:

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}}$$

Onde:

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

$\gamma_{a1}$  é o coeficiente de ponderação relacionado ao escoamento, flambagem e instabilidade;

$E$  é o módulo de elasticidade do aço;

$f_y$  é resistência ao escoamento do aço;

$\lambda$  é o parâmetro de esbeltez da seção transversal;  
 $\lambda_p$  é o parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação;  
 $\lambda_r$  é o parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento;  
 $h$  é a altura da alma;  
 $t_w$  é a espessura da alma;  
 $k_v$  é definido 5,0 para almas se enrijecedores transversais, para  $\frac{a}{h} > 3$  ou para  $\frac{a}{h} > \left[\frac{260}{h/t_w}\right]^2$  e  $5 + \frac{5}{(a/h)^2}$  para todos os outros casos;  
 $a$  é a distância entre enrijecedores transversais adjacentes.

A força cortante ( $V_{pl}$ ), por sua vez, é dada por:

Equação 24:

$$V_{pl} = 0,60A_w f_y$$

Equação 25:

$$A_w = dt_w$$

Onde:

$A_w$  é a área efetiva de cisalhamento, definida para seções I, H, U e T fletidas em relação ao eixo perpendicular a alma;  
 $d$  é a altura total da seção transversal;  
 $h$  é a altura da alma;  
 $t_w$  é a espessura da alma.

## 2.5 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

Considerando todas as informações apresentadas anteriormente, neste capítulo, se esclarece que para obter o resultado no projeto a ser dimensionado, será utilizado o *software* SCIA Engineer, sob a devida licença disponível para estudantes, como primeira metodologia de análise estrutural, tendo em vista que a segunda será realizada de forma mista (cálculo analítico em conjunto do Ftool), tudo em conformidade com as normas legais estabelecidas.

### 3 METODOLOGIA

Partindo da problemática levantada no presente trabalho, adotou-se uma pesquisa descritiva segundo os objetivos, uma bibliográfica com relação aos procedimentos de coleta e outra quantitativa no que concerne à natureza dos dados (GONSALVES, 2011).

Sendo, assim, no presente capítulo, apresenta-se a metodologia adotada no projeto proposto, incluindo, as etapas de dimensionamento, as ações pertinentes, a localização do projeto para dados normativos e a apresentação do *software* que será utilizado no dimensionamento da estrutura metálica.

#### 3.1 APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE UTILIZADO

Este trabalho tem como propósito específico calcular e dimensionar um mezanino metálico de acordo com a ABNT NBR 8800:2008, logo utiliza-se o método dos estados limites, demonstrando as variáveis relevantes em um projeto de estrutura metálica, apresentando os principais detalhes construtivos, cotas dos componentes estruturais, detalhes dos perfis de ligação e especificação dos conectores.

O *software* que será utilizado para a análise e o dimensionamento do mezanino metálico é o SCIA *Engineer*, considerado um programa completo para o cálculo de estruturas metálicas, incluindo análise por elementos finitos, mediante amplo avanço de funcionalidades para múltiplos materiais, sendo que em sua biblioteca existem os principais perfis estruturais utilizados na indústria, seções do tipo T, L, U e I com todas as suas informações geométricas.

Para este trabalho, o SCIA *Engineer* desenvolve um papel importante na determinação dos esforços de compressão, cisalhamento e flexão, em conformidade com o tipo de ligação utilizada, além de apresentar o deslocamento vertical máximo para as vigas de projeto fornecendo as informações iniciais para a comparação com os valores resistentes.

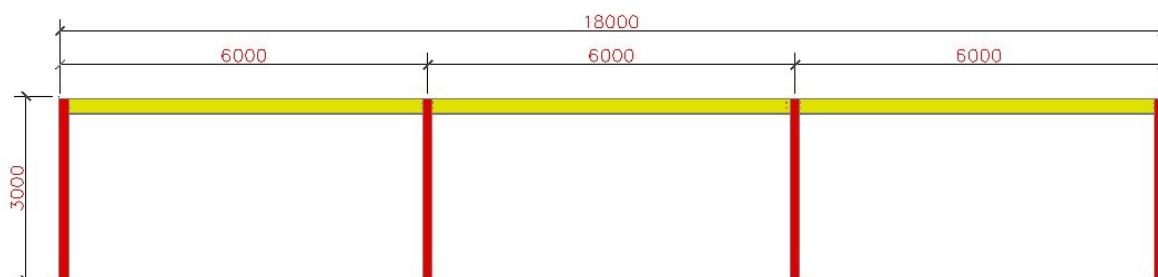
#### 3.2 CONSIDERAÇÕES DO MEZANINO

O desenvolvimento do mezanino foi baseado em sua utilização de forma genérica para a indústria, desta forma, foi estabelecido as dimensões de perfis

padronizados que facilitassem a aquisição no comércio e evitasse o desperdício de material da estrutura a analisada.

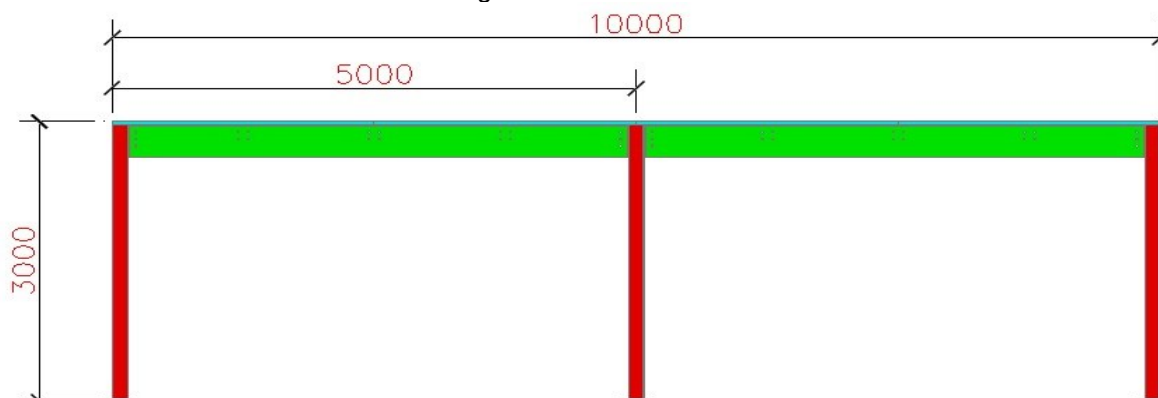
Nas Figuras 9 a 12 pode-se visualizar o detalhamento do mezanino para uma maior contextualização do presente projeto.

Figura 9 – Vista frontal:



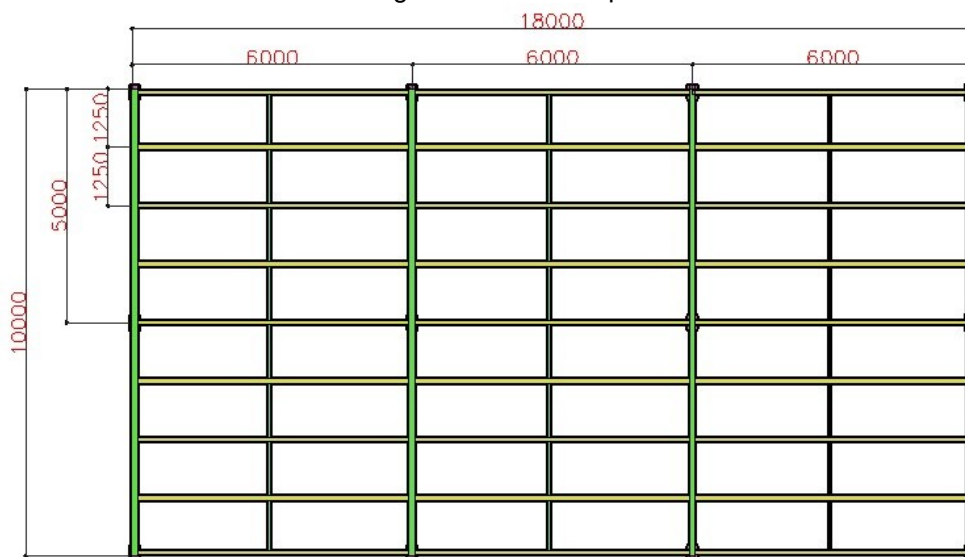
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 10 – Vista lateral:



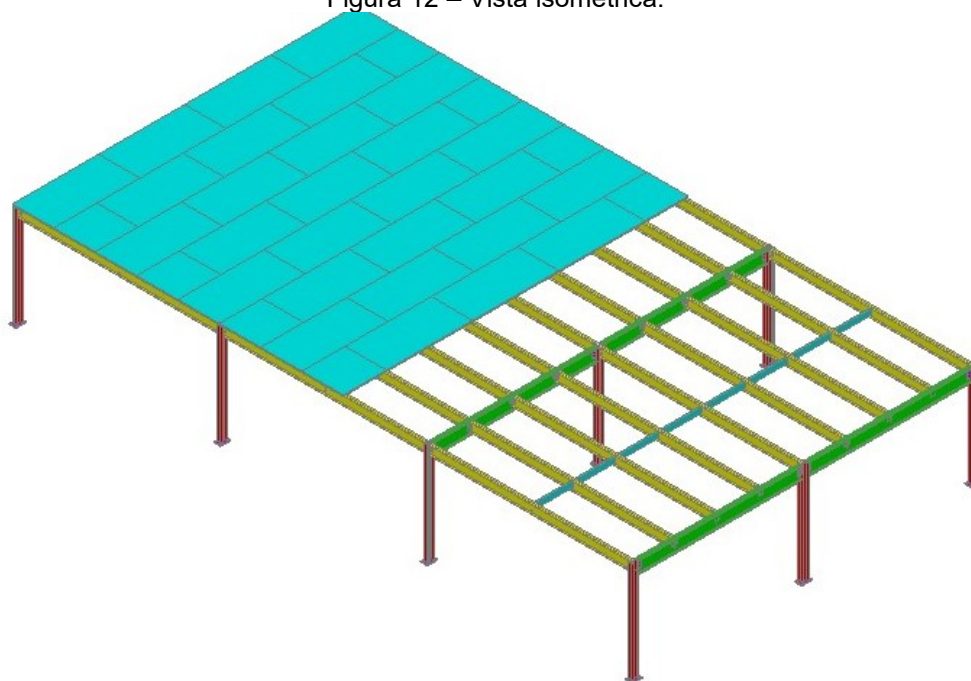
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 11 – Vista superior:



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 12 – Vista isométrica:



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

### 3.3 APRESENTAÇÃO DOS DADOS PARA O DIMENSIONAMENTO

#### 3.3.1 Ações permanentes

Para as ações permanentes considerou-se o peso próprio da estrutura metálica e o das placas do piso *wall*. Para o peso próprio da estrutura utilizou-se o catálogo de perfis da empresa Gerdau Açominas. Já o peso das placas do piso *wall*, aplicou-se as medidas tabeladas pelo fabricante Eternit.

#### 3.3.2 Ações variáveis

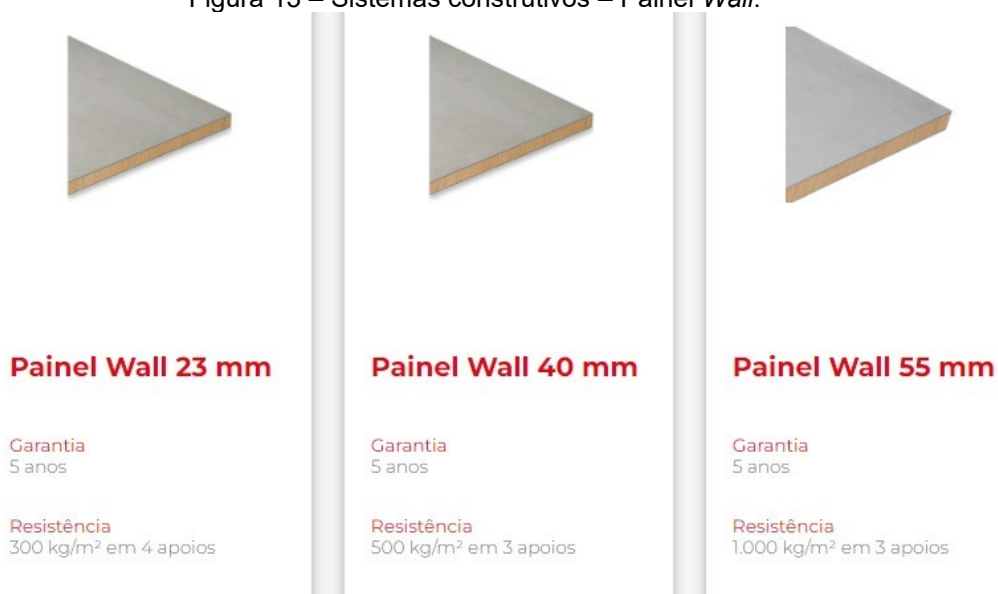
Para as ações variáveis considerou-se a sobrecarga de projeto de  $500 \text{ kgf/m}^2$ , visando o êxito e a boa funcionalidade da estrutura analisada.

### 3.4 DEFINIÇÃO DO ARRANJO

#### 3.4.1 Piso *wall*

Considerando que o presente projeto do mezanino metálico inclui o seu piso *wall*, adotou-se as placas de painel *wall* 40mm que suportam a sobrecarga de 500 kgf/m<sup>2</sup>, de acordo com as recomendações da fabricante Eternit.

Figura 13 – Sistemas construtivos – Painel *Wall*:



Fonte: Eternit (2022).

Figura 14 – Sistemas construtivos – Painel *Wall*:

Resistência: 500 kg/m<sup>2</sup> em 3 apoios

#### Aplicações:

- Mezaninos
- Paredes/divisórias técnicas
- Paredes duplas
- Paredes elétricas e hidráulicas
- Passarelas
- Laje técnica
- Divisórias sanitárias
- Portas corta-fogo
- Portas acústicas

| Espessura (mm) | Largura (m) | Comprimento (m) | Área (m <sup>2</sup> ) | Peso/m <sup>2</sup> (kg/m <sup>2</sup> ) |
|----------------|-------------|-----------------|------------------------|--|
| 40             | 1,20        | 2,50            | 3,00                   | 32,00                                    |
|                |             | 2,75            | 3,30                   |  |
|                |             | 3,05            | 3,66                   |  |

Fonte: Eternit (2022).

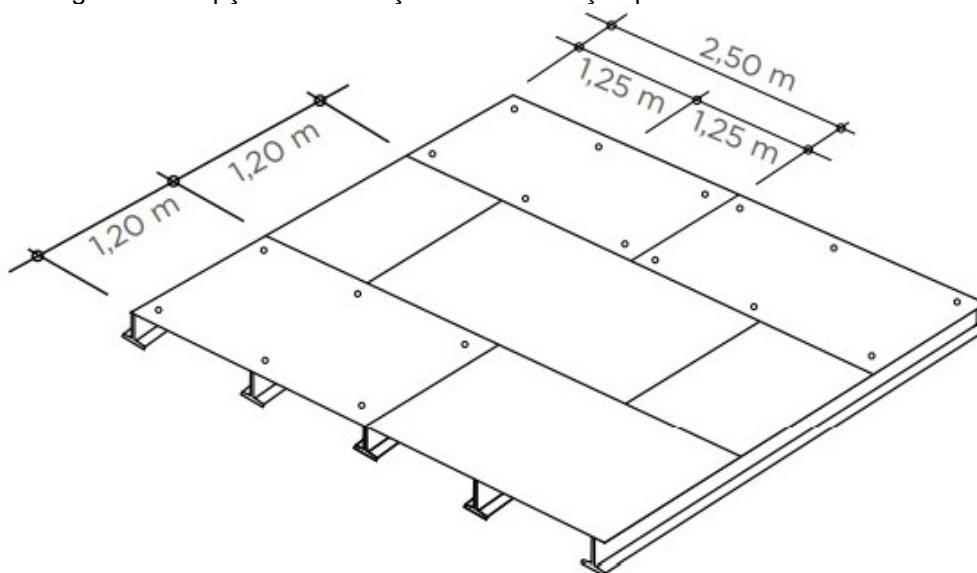


Desta forma, considerou-se a facilidade da comercialização deste material, bem como de sua montagem estrutural as placas adotadas foram de 1,20 x 2,50 metros.

### 3.4.2 Vigas

Em uma estrutura metálica existem as vigas secundárias e as vigas principais. No presente caso, posicionou-se as vigas secundarias de acordo com a orientação de montagem e instalação da fabricante do piso *wall* para melhor travamento da estrutura, conforme Figura 15.

Figura 15 – Opção de instalação com amarração para melhor travamento:



Fonte: Eternit (2022).

Ainda, para uma melhor concepção estrutural, para as vigas principais, adotou-se quatro pórticos de travamento divididos entre os dezoito metros da extensão do mezanino dimensionado (Figura 12).

### 3.4.3 Pilares

Partindo da premissa de que o objetivo deste trabalho é o dimensionamento do mezanino metálico em perfil W laminado e não havendo restrição quanto a quantidade e localização dos pilares, adotou-se três pilares para o pórtico principal, visando a concepção e estabilidade estrutural mediante a viabilidade econômica, caso contrário outra solução poderia ter sido adotado, como exemplo um mezanino treliçado.

### 3.4 DESCRIÇÃO DO MATERIAL ADOTADO

No presente projeto, serão adotados perfis W laminados fabricados em aço ASTM A 572 grau 50, sendo que para os elementos de ligação e as placas de base serão fabricados em aço ASTM A36 (Tabela 4), conforme o catálogo da empresa Gerdau Açominas (Anexo F).

Já as placas de piso *wall* serão compostas por miolo de madeira laminada ou sarrafeada, contraplacando em ambas as faces por lâminas de madeira e externamente por placas cimentícias em CRFS (Cimento Reforçado com Fio Sintético) prensadas.

Por fim, os parafusos serão fabricados em aço ASTM A325 e os chumbadores em aço ASTM A36.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Apresenta-se o desenvolvimento aplicado no projeto de análise e dimensionamento de mezanino metálico, o qual foi separado em três partes, quais sejam: viga secundária, a viga principal e os pilares. Após, considerou-se as chapas de ligações e a placa de base.

Ainda, iniciou-se os cálculos no *software* comercial SCIA *Engineer*, sendo que após procedeu-se com o cálculo misto (analítico em conjunto com o Ftool). Assim, este capítulo encontra-se dividido entre o cálculo via *software* e analítico misto.

### 4.1 COMBINAÇÕES DAS AÇÕES

Para criar as combinações das ações da estrutura metálica, sejam favoráveis ou não, considerou-se os fatores de ponderações de acordo com o que estabelece a norma ABNT NBR 8800:2008, conforme disposto nas tabelas 1 e 2 da referida norma, ou, ainda, anexos B e C.

Neste sentido, adotou-se para cada ação, seja ela permanente ou variável, diferentes fatores de ponderação.

#### 4.1.1 Estado Limite de Serviço (ELS)

Considerando o objetivo do presente projeto estrutural, adotou-se a combinação quase permanente de serviço, regida pela Equação 1, sendo que os valores atribuídos para os carregamentos permanentes, referem-se aos valores característicos de carregamento.

E para a ação variável causada pelo uso e ocupação, em locais onde há predominância de pesos e equipamentos que permanecem fixos por longo período de tempo, utilizou-se o coeficiente de redução de  $\psi_2 = 0,4$ , de acordo com a Figura 16.

Figura 16 – Valores dos fatores de combinação  $\psi_0$  e de redução  $\psi_1$  e  $\psi_2$  para ações variáveis:

| Ações |   | $\gamma_{\Omega}^a$ |            |            |
|-------|---|---------------------|------------|------------|
|       |   | $\psi_0$            | $\psi_1^d$ | $\psi_2^e$ |
| Ações | 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 <sup>b)</sup> | 0,5                 | 0,4        | 0,3        |

|                              |   |     |     |     |
|------------------------------|---|-----|-----|-----|
| causadas pelo uso e ocupação | Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas <sup>c</sup> | 0,7 | 0,6 | 0,4 |
|                              | Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas (ver B.5.1)   | 0,8 | 0,7 | 0,6 |

Fonte: NBR 8800 (2008).

#### 4.1.1.1 Deslocamentos máximos

Para a validação do ELS, utilizou-se a tabela C.1 da ABNT NBR 8800:2008, anexo A deste trabalho, que representa os valores dos deslocamentos máximos requeridos para situações usuais nas construções. Tendo em mente que estes deslocamentos devem ser entendidos como valores práticos a serem utilizados para verificação do estado-limite de serviço de deslocamentos excessivos da estrutura.

Sendo, assim, na Figura 17, verifica-se a equação aplicada.

Figura 17 – Tabela C.1 – Deslocamentos máximos:

| Descrição                           | $\delta^a$    |
|-------------------------------------|---------------|
| - Travessas de fechamento           | $L/180^b$     |
|                                     | $L/120^{c,d}$ |
| - Terças de cobertura <sup>g)</sup> | $L/180^e$     |
|                                     | $L/120^f$     |
| - Vigas de cobertura <sup>g)</sup>  | $L/250^h$     |
| - Vigas de piso                     | $L/350^h$     |

Fonte: NBR 8800 (2008).

#### 4.1.2 Estado Limite Último (ELU)

Em relação ao ELU, adotou-se a combinação última normal, uma vez que decorre do uso previsto para a estrutura, regida pela Equação 2. Para a ação permanente equivalente ao peso próprio da estrutura metálica do mezanino, utilizou-se o valor de  $\gamma_g = 1,25$ , e, para as placas do piso *wall* considerou-se o valor de  $\gamma_g = 1,35$ . Quanto a ação variável da sobrecarga de 500kgf/m<sup>2</sup>, ou seja, decorrentes do uso e ocupação, adotou-se o valor de  $\gamma_q = 1,50$ , conforme disposto na Figura 18.

Figura 18 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações  $\gamma_f = \gamma_{f1}\gamma_{f3}$ :

| Ações permanentes ( $\gamma_g$ ) <sup>a,c</sup> |         |
|---|---------|
|   | Diretas |

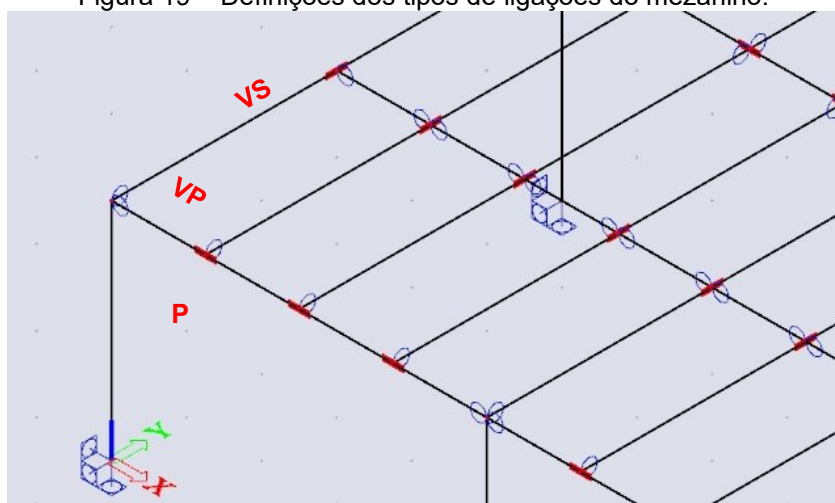
| Combinações                | Peso próprio de estruturas metálicas                         | Peso próprio de estruturas pré-moldadas | Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes | Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i> | Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos | Indiretas   |
|----------------------------|--|---|---|--|--|-------------|
| Normais                    | 1,25<br>(1,00)   | 1,30<br>(1,00)                          | 1,35<br>(1,00)  | 1,40<br>(1,00)   | 1,50<br>(1,00)   | 1,20<br>(0) |
| Especiais ou de construção | 1,15<br>(1,00)   | 1,20<br>(1,00)                          | 1,25<br>(1,00)  | 1,30<br>(1,00)   | 1,40<br>(1,00)   | 1,20<br>(0) |
| Excepcionais               | 1,10<br>(1,00)   | 1,15<br>(1,00)                          | 1,15<br>(1,00)  | 1,20<br>(1,00)   | 1,30<br>(1,00)   | 0<br>(0)    |
|                            | <b>Ações variáveis (<math>\gamma_q</math>)<sup>a d</sup></b> |   |   |  |  |             |
|                            | <b>Efeito da temperatura<sup>b</sup></b>                     | <b>Ação do vento</b>                    | <b>Ações truncadas<sup>e</sup></b>  | <b>Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação</b>          |  |             |
| Normais                    | 1,20   | 1,40                                    | 1,20  | 1,50   |  |             |
| Especiais ou de construção | 1,00   | 1,20                                    | 1,10  | 1,30   |  |             |
| Excepcionais               | 1,00   | 1,00                                    | 1,00  | 1,00   |  |             |

Fonte: NBR 8800 (2008).

## 4.2 DEFINIÇÃO DAS LIGAÇÕES DAS VIGAS

Para as definições de ligações das vigas principais e secundárias do mezanino, adotou-se ligações articuladas, quanto a fixação dos pilares no solo, considerou-se uma ligação rígida, ou seja, engastada (Figura 19).

Figura 19 – Definições dos tipos de ligações do mezanino:



Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

### 4.3 CÁLCULO VIA SOFTWARE

Inicia-se o presente item, destacando que no *software* SCIA Engineer as informações de carregamentos estão em  $\text{kN/m}^2$ , entretanto procedeu-se com a devida conversão ( $\text{kgf/m}^2$ ) para o objetivo do presente projeto.

#### 4.3.1 Disposição dos carregamentos

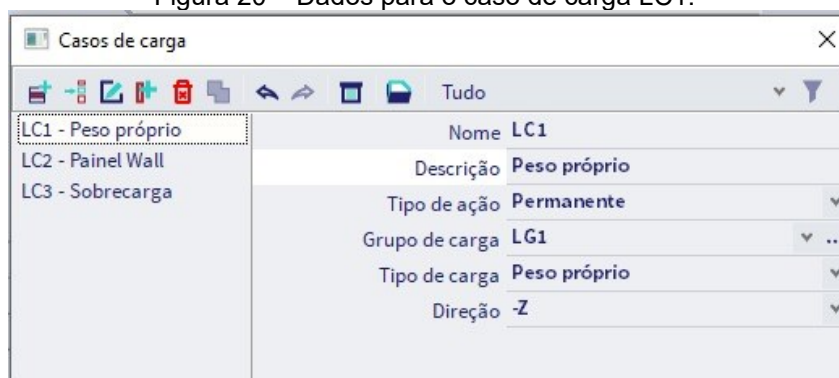
Criou-se três casos de carga para a inserção das ações dos carregamentos permanentes e variáveis da estrutura, sendo LC1 para o peso próprio da estrutura metálica, LC2 para o peso próprio das placas de piso *wall* e LC3 para a sobrecarga de  $500\text{kgf/m}^2$ .

Esclarece-se que LC corresponde a caso de carga, nomenclatura genérica dada pelo próprio *software*.

##### 4.3.1.1 LC1 – Peso próprio da estrutura metálica

Para a ação permanente referente ao peso próprio da estrutura metálica, não foi necessário inserir o carregamento no *software*, pois é feito automaticamente. Sendo, assim, na Figura 20 constam os dados referente ao caso de carga LC1.

Figura 20 – Dados para o caso de carga LC1:



Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

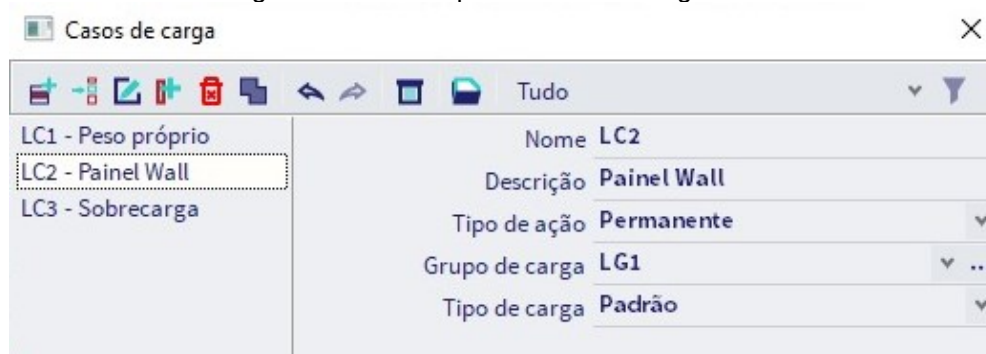
##### 4.3.1.2 LC2 – Peso próprio das placas de piso *wall*

Quanto a ação permanente do peso próprio das placas de piso *wall*, utilizou-se um painel de carga para colocar o carregamento distribuído de  $32\text{kgf/m}^2$ ,

correspondente ao peso por  $m^2$  da placa de 40mm de espessura da empresa Eternit, conforme dados constates na Figura 14.

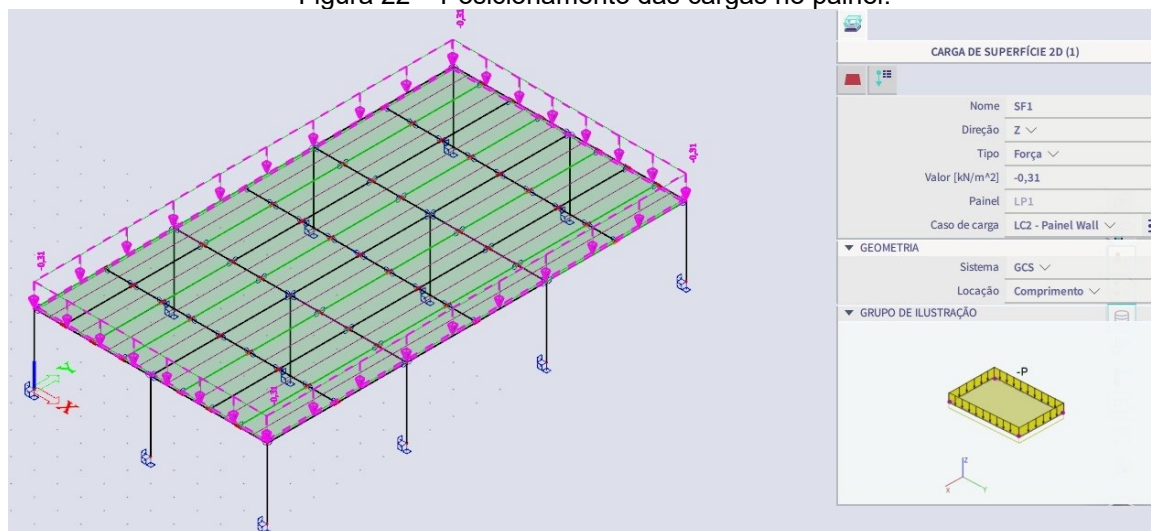
Na Figura 21, verifica-se os dados inseridos no sistema, bem como na Figura 22, nota-se o posicionamento das cargas no painel.

Figura 21 – Dados para o caso de carga LC2:



Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

Figura 22 – Posicionamento das cargas no painel:

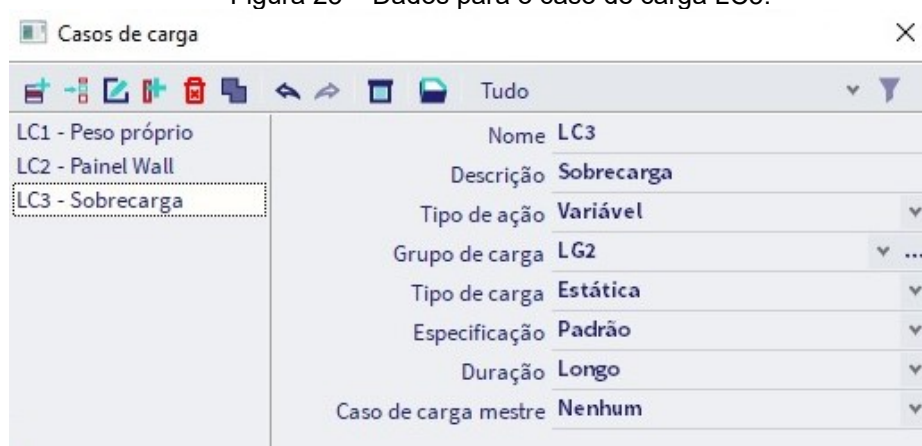


Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

#### 4.3.1.3 LC3 – Sobrecarga de 500kgf/m<sup>2</sup>

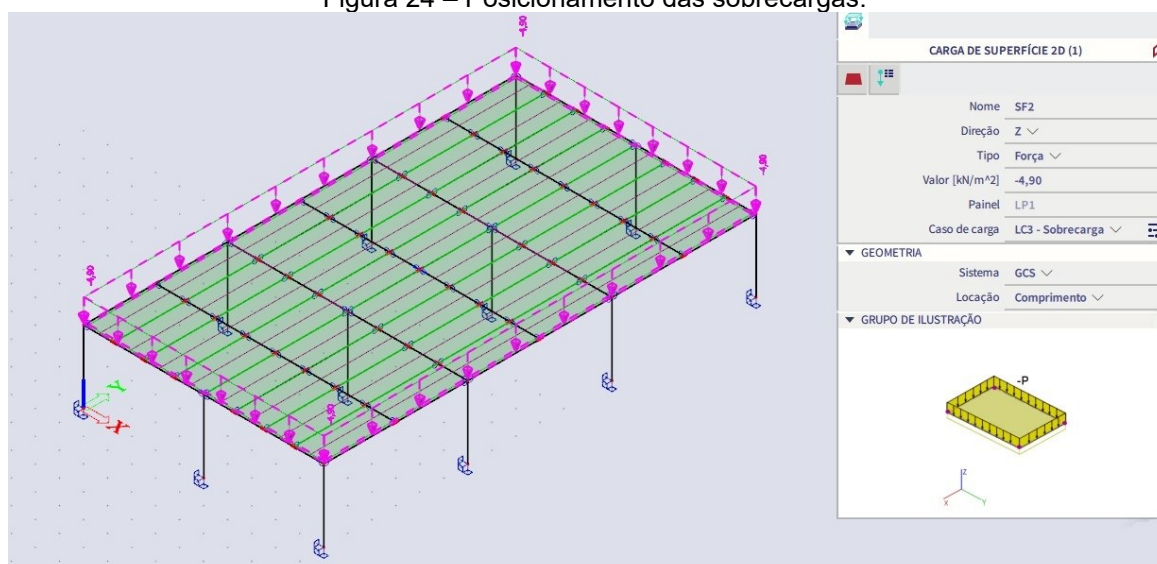
Em relação a ação variável referente a sobrecarga de 500kgf/m<sup>2</sup>, adotou-se o mesmo sistema de posicionamento das cargas do piso *wall* mediante um painel. Neste sentido, na Figura 23, verifica-se os dados inseridos no sistema, bem como na Figura 24, nota-se o posicionamento das cargas no painel.

Figura 23 – Dados para o caso de carga LC3:



Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

Figura 24 – Posicionamento das sobrecargas:

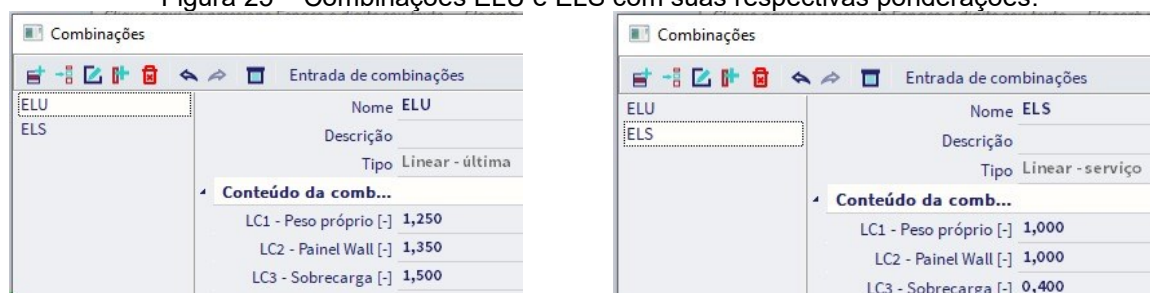


Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

#### 4.3.1.4 Combinação ELU e ELS

Diante das considerações acima, demonstra-se a adequada aplicação dos coeficientes propostos no subitem anterior com a Figura 25.

Figura 25 – Combinações ELU e ELS com suas respectivas ponderações:



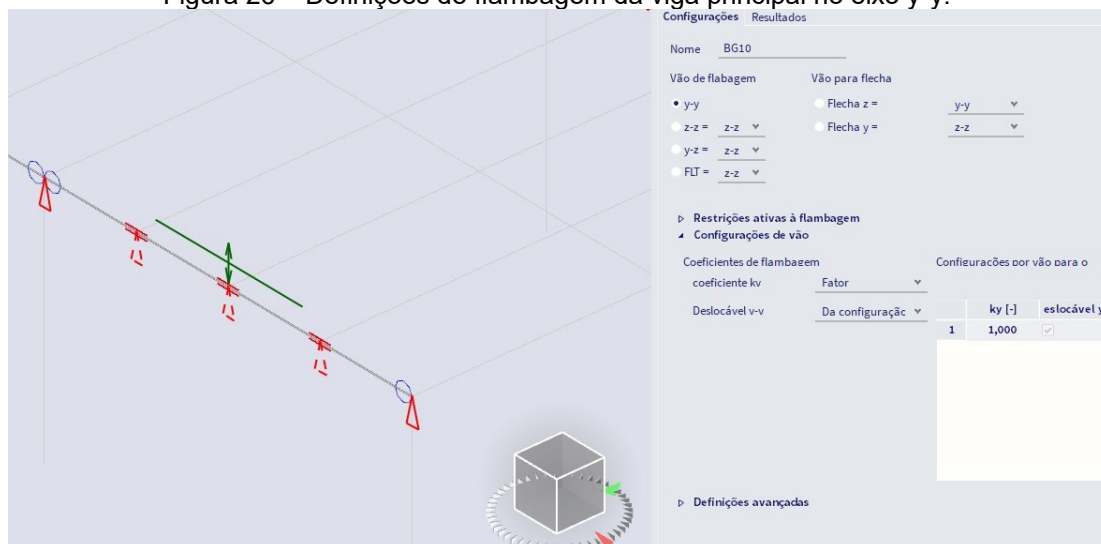
Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).



### 4.3.2 Definição dos comprimentos e configuração de flambagem

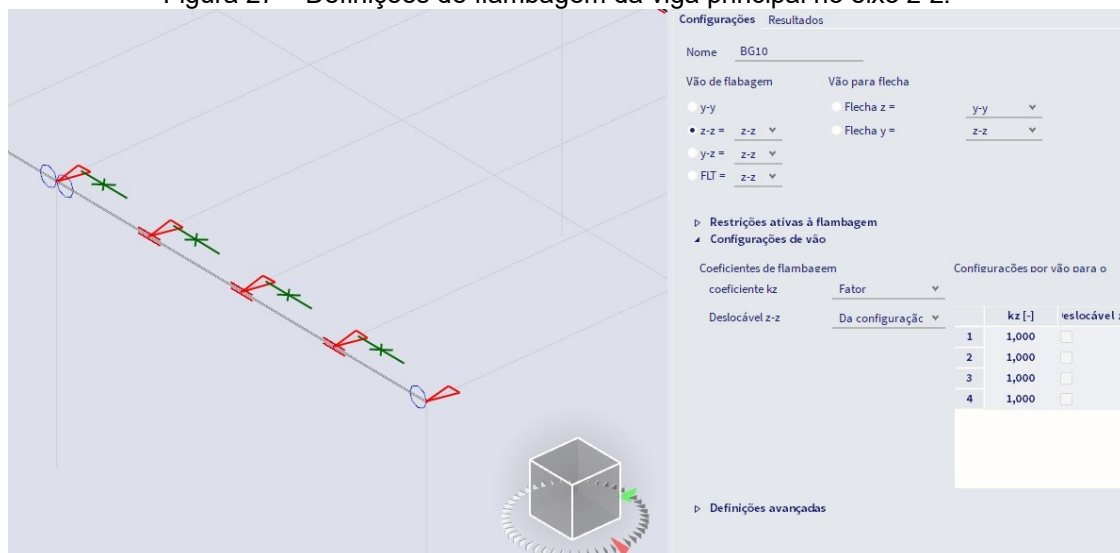
Nas Figuras a seguir (26 a 31), nota-se a definição dos valores recomendados para os coeficientes de flambagem por flexão adotados para a viga principal, secundária e pilares, em seus respectivos eixos de atuação.

Figura 26 – Definições de flambagem da viga principal no eixo y-y:



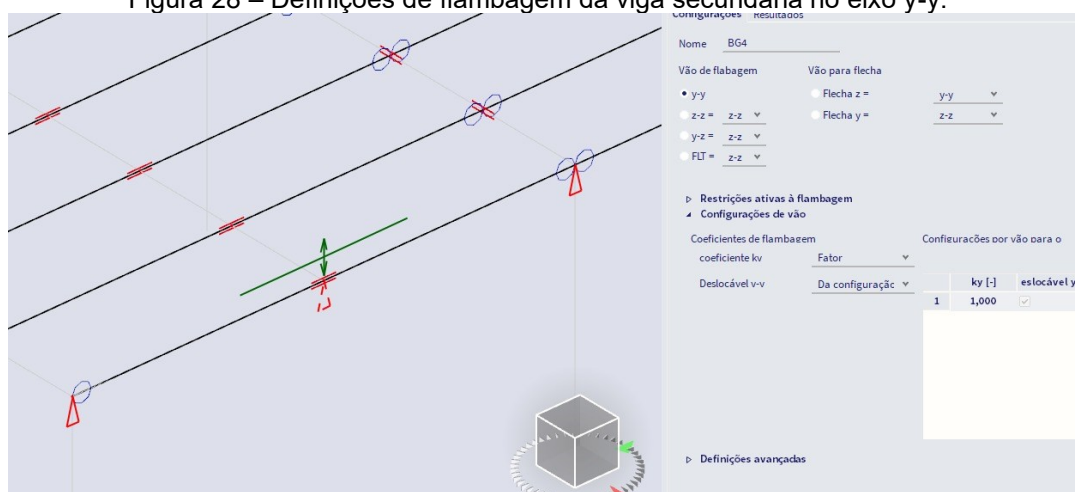
Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

Figura 27 – Definições de flambagem da viga principal no eixo z-z:



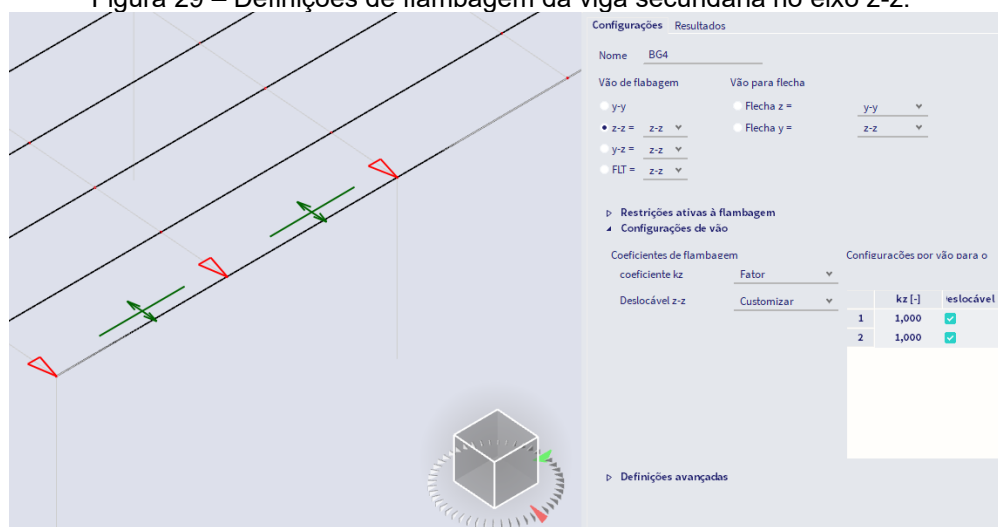
Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

Figura 28 – Definições de flambagem da viga secundária no eixo y-y:



Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

Figura 29 – Definições de flambagem da viga secundária no eixo z-z:



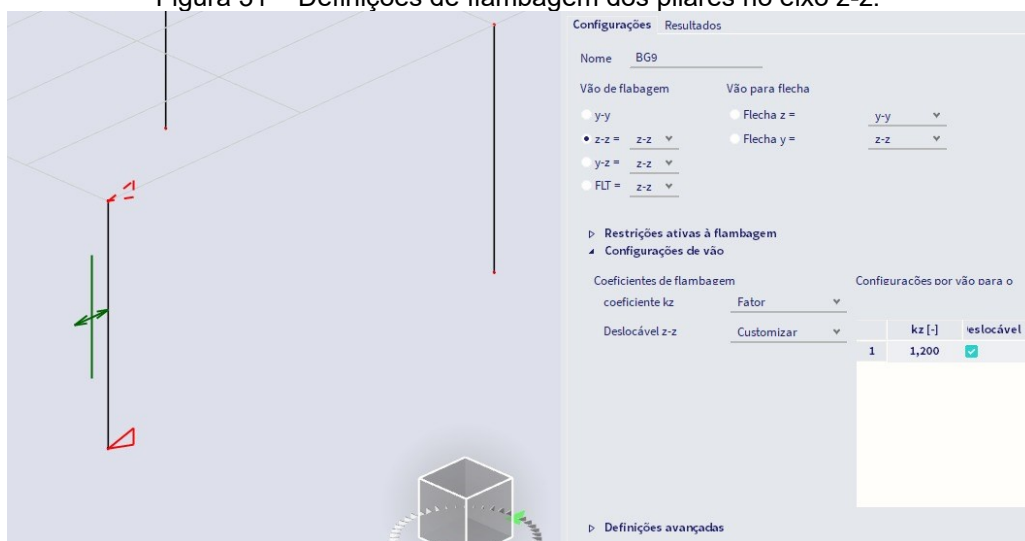
Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

Figura 30 – Definições de flambagem dos pilares no eixo y-y:



Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

Figura 31 – Definições de flambagem dos pilares no eixo z-z:

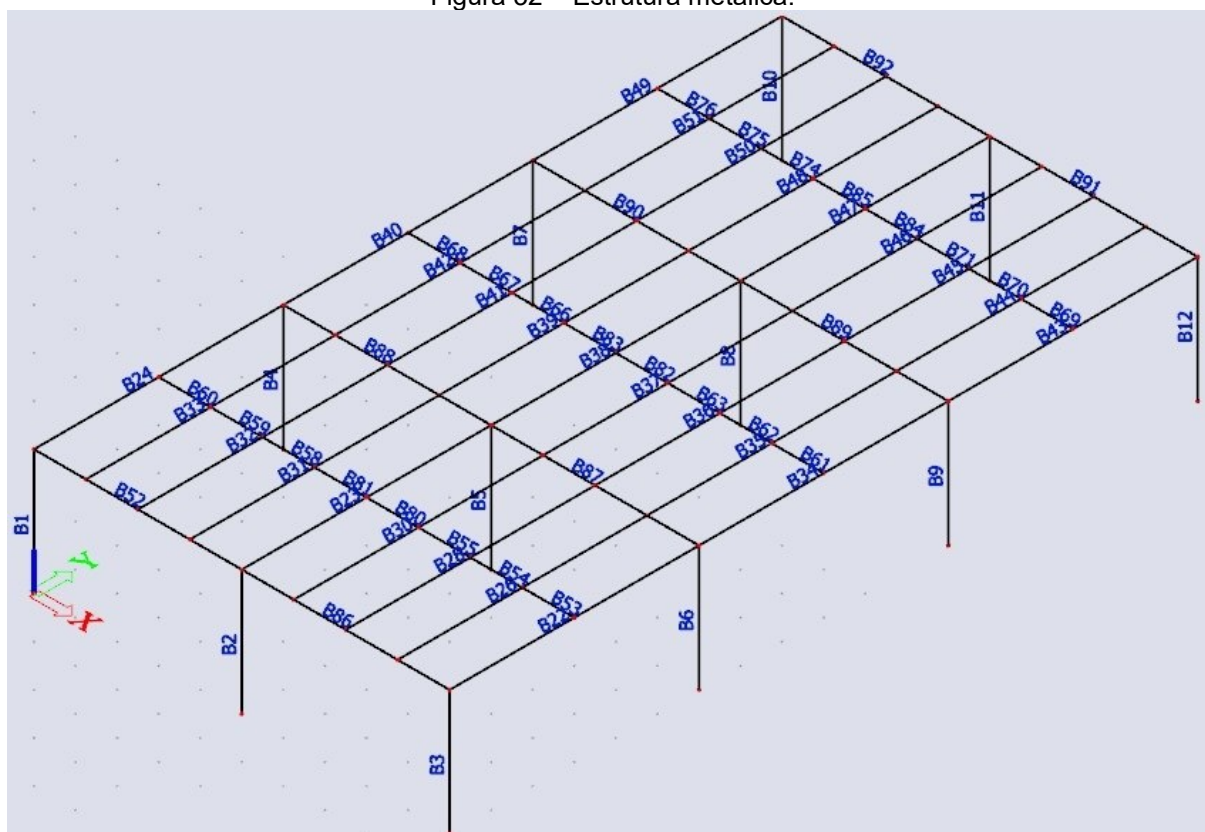


Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

### 4.3.3 Resultados

Para melhor esclarecer os subitens que seguem, a Figura 32 demonstra as barras com sua respectiva nomenclatura que constituem a presente estrutura metálica, isto é, as vigas principais, secundárias e os pilares.

Figura 32 – Estrutura metálica:



Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

Para o início das verificações das vigas e pilares do modelo unifilar do SCIA Engineer, atribui-se diferentes perfis para cada tipo de barra, gerando as devidas análises de verificação para ELU e ELS, até que fosse encontrado um perfil que atendesse a solicitação de cálculo apresentada.

Tendo em vista essas informações, procede-se com o detalhamento da análise realizada pelo cálculo via *software* SCIA Engineer.

#### **4.3.3.1 Vigas secundárias**

Através da análise de cálculo via *software*, constatou-se que o perfil laminado, disponibilizado na tabela da empresa Gerdau Açominas, que melhor se enquadra no dimensionamento é o W 250x25,3, no material ASTM A 572 Grau 50, considerando o pior caso entre as vigas secundárias.

Para o cálculo da viga secundária utilizou-se um perfil de travamento intermediário, perfil C 120x50x13x1,50 formado a frio (perfil utilizado como corrente rígida de terça no catálogo da Meincol), reduzindo pela metade o comprimento destravado. Poderia ser considerado o travamento do piso *wall* para tal função, porém para efeito de aprendizado e uma melhor estabilização, adotou o perfil acima informado. Como o perfil é utilizado apenas para travamento, ao invés de carregamento, e suas solicitações no *software* deram baixas não foram realizadas as análises de dimensionamento deste perfil neste trabalho.

Abaixo segue as demais considerações referentes ao ELU e ELS.

##### **4.3.3.1.1 Estado Limite de Último (ELU)**

Diante das definições das ligações das vigas, onde a ligação da viga secundária é articulada, a mesma sofre esforços apenas de momento fletor e de cisalhante. Desta forma, para a sua aprovação, é necessário que a razão entre os esforços solicitantes e os esforços resistentes sejam menores do que 1, conforme Equação 12 e 17, bem como a combinação de ELU disposta na Figura 25.

A Figura a seguir (33) demonstra os valores de solicitação e resistência de cálculo das vigas secundárias do presente projeto.

Figura 33 – Verificação ELU região central viga secundária:

**Verificação pela Norma Brasileira de Aço**

Cálculo linear

Combinação: ELU

Sistema de coordenadas: Principal

Extremo 1D: Global

Seleção: B38

Filtro: Seção Transversal = CS23 - W250x25.3

**Verificação pela Norma Brasileira de Aço - ABNT - NBR-8800:2008**

| Dados da barra |             |                 |
|----------------|-------------|-----------------|
| Barra          | Posição [m] | Perfil          |
| B38            | 3           | W(GERD)250x25.3 |

Seção:

Seção: W(GERD)250x25.3



| Dados do aço  |                          |                          |                         |                         |
|---------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Aço           | Fy [kN/cm <sup>2</sup> ] | Fu [kN/cm <sup>2</sup> ] | E [kN/cm <sup>2</sup> ] | G [kN/cm <sup>2</sup> ] |
| A572 grade 50 | 34.5                     | 44.8                     | 20000                   | 7692                    |

| Esforços* |             |             |          |          |            |
|-----------|-------------|-------------|----------|----------|------------|
| Nd [kN]   | Mdx [kN.cm] | Mdy [kN.cm] | Vdx [kN] | Vdy [kN] | Td [kN.cm] |
| 0         | 4522        | 0           | 0        | 0.0213   | 0          |

\*Combinação: ELU

**Verificação ao Momento Fletor****Verificação ao momento: Maior inércia (X-X)**

Mesa superior em compressão

| Parâmetros de cálculo |     |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------|-----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Lb [m]                | Cb  | Cw [cm <sup>6</sup> ] | Iy [cm <sup>4</sup> ] | Wx [cm <sup>3</sup> ] | Zx [cm <sup>3</sup> ] |
| 3                     | 1.3 | 22955                 | 149                   | 270                   | 311                   |

| Classificação da seção |             |           |             |             |           |               |
|------------------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|---------------|
| Mesa                   |             |           | Alma        |             |           | Classificação |
| $\lambda_p$            | $\lambda_r$ | $\lambda$ | $\lambda_p$ | $\lambda_r$ | $\lambda$ |               |
| 9.15                   | 23.9        | 6.07      | 90.5        | 137         | 36.1      | Compacta      |

| Resultados  |             |             |             |                         |         |        |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------|---------|--------|
| FLA [kN.cm] | FLM [kN.cm] | FLT [kN.cm] | Mp! [kN.cm] | M <sub>Rc</sub> [kN.cm] | Scl/Fld | Status |
| 9758        | 9758        | 6921        | 10734       | 6921                    | 0.653   | OK     |

**Verificação do Cortante: Menor inércia (Y-Y)**

| Parâmetros de cálculo |       |    |
|-----------------------|-------|----|
| Lv [m]                | a [m] | Kv |
| 0                     | 6000  | 5  |

| Verificação da esbelteza |             |           |
|--------------------------|-------------|-----------|
| $\lambda_p$              | $\lambda_r$ | $\lambda$ |
| 59.2                     | 73.8        | 36.1      |

| Resultados |         |                      |        |
|------------|---------|----------------------|--------|
| Vpl[kN]    | VRd[kN] | Sd/Rd                | Status |
| 325        | 295     | $72.2 \cdot 10^{-6}$ | OK     |

## RESUMO DAS VERIFICAÇÕES

| Resumo dos resultados |                      |        |
|-----------------------|----------------------|--------|
| Tipo de verificação   | Sd/Rd                | Status |
| Força Normal          | 0                    | OK     |
| Momento X-X           | 0.653                | OK     |
| Momento Y-Y           | 0                    | OK     |
| Cisalhamento X-X      | $72.2 \cdot 10^{-6}$ | OK     |
| Cisalhamento Y-Y      | 0                    | OK     |
| Torção                | 0                    | OK     |
| Esforços combinados   | 0                    | OK     |

**Fator máximo = 0.653**

Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

Figura 34 – Verificação ELU pontos extremos viga secundária:

### Verificação pela Norma Brasileira de Aço

Cálculo linear  
 Combinação: ELU  
 Sistema de coordenadas: Principal  
 Extremo 1D: Global  
 Seleção: B36  
 Filtro: Seção Transversal = CS23 - W250x25.3  
 Selecionar seções: Extremos

### Verificação pela Norma Brasileira de Aço - ABNT - NBR-8800:2008

| Dados da barra |            |                 |
|----------------|------------|-----------------|
| Barra          | Posição[m] | Perfil          |
| B36            | 0          | W(GERD)250x25.3 |

#### Seção:

Seção: W(GERD)250x25.3



| Dados do aço  |                         |                         |                        |                        |
|---------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Aço           | Fy[kN/cm <sup>2</sup> ] | Fu[kN/cm <sup>2</sup> ] | E[kN/cm <sup>2</sup> ] | G[kN/cm <sup>2</sup> ] |
| A572 grade 50 | 34.5                    | 44.8                    | 20000                  | 7692                   |

| Esforços* |            |            |         |         |           |
|-----------|------------|------------|---------|---------|-----------|
| Nd[kN]    | Mdx[kN.cm] | Mdy[kN.cm] | Vdx[kN] | Vdy[kN] | Td[kN.cm] |
| 0         | 0          | 0          | 0       | 30.1    | 0         |

\*Combinação: ELU

### Verificação do Cortante: Menor inércia (Y-Y)

| Parâmetros de cálculo |      |    |
|-----------------------|------|----|
| Lv[m]                 | a[m] | Kv |
| 0                     | 6000 | 5  |

| Verificação da esbeltez |             |           |
|-------------------------|-------------|-----------|
| $\lambda_p$             | $\lambda_r$ | $\lambda$ |
| 59.2                    | 73.8        | 36.1      |

| Resultados |         |       |        |
|------------|---------|-------|--------|
| Vpl[kN]    | VRd[kN] | Sd/Rd | Status |
| 325        | 295     | 0.102 | OK     |

### RESUMO DAS VERIFICAÇÕES

| Resumo dos resultados |       |        |
|-----------------------|-------|--------|
| Tipo de verificação   | Sd/Rd | Status |
| Força Normal          | 0     | OK     |
| Momento X-X           | 0     | OK     |
| Momento Y-Y           | 0     | OK     |
| Cisalhamento X-X      | 0.102 | OK     |
| Cisalhamento Y-Y      | 0     | OK     |
| Torção                | 0     | OK     |
| Esforços combinados   | 0     | OK     |

**Fator máximo = 0.102**

Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

Observa-se na Figura 33 a verificação para o momento resistente máximo na região central da viga que é a principal solicitação que governa o dimensionamento do perfil, já na Figura 34, onde é demonstrado o ponto de extremidade da viga como momento fletor igual a zero, tem-se o valor de cisalhante máximo.

Sendo, assim, nota-se que a verificação para o momento fletor é o esforço mais solicitado pela viga, portanto esta que governará o dimensionamento, tendo a razão entre o esforço solicitante e o esforço resistente foi menor que 1, especificamente 0,653, a viga encontra-se aprovada para ELU.

#### 4.3.3.1.2 Estado Limite de Serviço (ELS)

A validação do estado limite de serviço é feita conforme a equação da Figura 18, ou seja,  $Deslocamento\ Limite = L/350$ , desta forma, o deslocamento máximo atuante deve ser menor que este valor, considerando, ainda, a combinação de ELS disposta na Figura 25.

Na Figura a seguir (35), pode-se observar os valores de deformações encontrados nas vigas secundárias.

Figura 35 – Vigas secundárias com as maiores deformações:

**Deformações 1D**  
 Cálculo linear  
 Combinação: ELS  
 Sistema de coordenadas: Principal  
 Extremo 1D: Global  
 Seleção: Tudo  
 Filtro: Seção Transversal = CS23 - W250x25.3  
**Deformações**

| Nome | dx [m] | Caso  | Seção Transversal | u <sub>x</sub> [mm] | u <sub>y</sub> [mm] | u <sub>z</sub> [mm] | φ <sub>x</sub> [mrad] | φ <sub>y</sub> [mrad] | φ <sub>z</sub> [mrad] | U total [mm] |
|------|--------|-------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| B36  | 3,00   | ELS/1 | CS23 - W250x25.3  | 0,0                 | 0,0                 | -15,3               | 0,0                   | 0,0                   | 0,0                   | 15,3         |
| B26  | 6,00   | ELS/1 | CS23 - W250x25.3  | 0,0                 | 0,0                 | -5,5                | -3,2                  | -3,6                  | 0,0                   | 5,5          |
| B33  | 6,00   | ELS/1 | CS23 - W250x25.3  | 0,0                 | 0,0                 | -5,5                | 3,2                   | -3,6                  | 0,0                   | 5,5          |
| B45  | 6,00   | ELS/1 | CS23 - W250x25.3  | 0,0                 | 0,0                 | -3,9                | 0,0                   | -4,6                  | 0,0                   | 3,9          |
| B28  | 0,00   | ELS/1 | CS23 - W250x25.3  | 0,0                 | 0,0                 | -3,9                | 0,0                   | 4,6                   | 0,0                   | 3,9          |
| B22  | 0,00   | ELS/1 | CS23 - W250x25.3  | 0,0                 | 0,0                 | -0,1                | 0,0                   | 2,2                   | 0,0                   | 0,1          |

| Nome  | Chave de combinação  |
|-------|----------------------|
| ELS/1 | LC1 + LC2 + 0.40*LC3 |

Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

Por fim, destaca-se que o comprimento das vigas secundárias é 6.000mm, sendo, assim, pode-se ter um deslocamento máximo de 17.14mm. Como o deslocamento máximo da viga secundária, via *software*, foi de 15,3mm, tem-se que a viga está aprovada para o ELS.

#### 4.3.3.2 Vigas principais

Considerando a análise de cálculo via *software*, observou-se que o perfil laminado, disponibilizado na tabela da empresa Gerdau Açominas, que melhor se enquadra no dimensionamento é o W 360x32,9, no material ASTM A 572 Grau 50, considerando o pior caso entre as vigas principais.

A seguir apresenta-se considerações referentes ao ELU e ELS.



#### 4.3.3.2.1 Estado Limite de Último (ELU)

Como as definições das ligações das vigas principais é articulada, a mesma sofre esforços apenas de momento fletor e de cisalhante, sendo, assim, para a sua aprovação, é necessário que a razão entre os esforços solicitantes e os esforços resistentes sejam menores do que 1, conforme Equação 12 e 17, bem como a combinação de ELU disposta na Figura 25.

A Figura a seguir (36) mostra os valores de solicitação e resistência de cálculo das vigas principais deste projeto.

Figura 36 – Verificação ELU região central da viga principal:

#### Verificação pela Norma Brasileira de Aço

Cálculo linear  
 Combinação: ELU  
 Sistema de coordenadas: Principal  
 Extremo 1D: Global  
 Seleção: Tudo  
 Filtro: Seção Transversal = CS22 - W360x32.9

#### Verificação pela Norma Brasileira de Aço - ABNT - NBR-8800:2008

| Dados da barra |            |                 |
|----------------|------------|-----------------|
| Barra          | Posição[m] | Perfil          |
| B87            | 2.5        | W(GERD)360x32.9 |

Seção:

Seção: W(GERD)360x32.9



| Dados do aço  |                         |                         |                        |                        |
|---------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Aço           | Fy[kN/cm <sup>2</sup> ] | Fu[kN/cm <sup>2</sup> ] | E[kN/cm <sup>2</sup> ] | G[kN/cm <sup>2</sup> ] |
| A572 grade 50 | 34.5                    | 44.8                    | 20000                  | 7692                   |

| Esforços* |            |            |         |         |           |
|-----------|------------|------------|---------|---------|-----------|
| Nd[kN]    | Mdx[kN.cm] | Mdy[kN.cm] | Vdx[kN] | Vdy[kN] | Td[kN.cm] |
| 0         | 15190      | 0          | 0       | 30.1    | 0         |

\*Combinação: ELU

#### Verificação ao Momento Fletor

#### Verificação ao momento: Maior inércia (X-X)

Mesa superior em compressão

| Parâmetros de cálculo |      |                      |                      |                      |                      |
|-----------------------|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Lb[m]                 | Cb   | Cw[cm <sup>6</sup> ] | Iy[cm <sup>4</sup> ] | Wx[cm <sup>3</sup> ] | Zx[cm <sup>3</sup> ] |
| 1.25                  | 1.73 | 84111                | 291                  | 479                  | 548                  |

| Classificação da seção |             |           |             |             |           |               |
|------------------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|---------------|
| Mesa                   |             |           | Alma        |             |           | Classificação |
| $\lambda_p$            | $\lambda_r$ | $\lambda$ | $\lambda_p$ | $\lambda_r$ | $\lambda$ |               |
| 9.15                   | 23.9        | 7.47      | 90.5        | 137         | 53.1      | Compacta      |

| Resultados |            |            |             |                         |       |        |
|------------|------------|------------|-------------|-------------------------|-------|--------|
| FLA[kN.cm] | FLM[kN.cm] | FLT[kN.cm] | Mpl [kN.cm] | M <sub>Rc</sub> [kN.cm] | Sd/Rd | Status |
| 17175      | 17175      | 17175      | 18893       | 17175                   | 0,884 | OK     |

### Verificação do Cortante: Menor inércia (Y-Y)

| Parâmetros de cálculo |      |    |
|-----------------------|------|----|
| Lv[m]                 | a[m] | Kv |
| 0                     | 5000 | 5  |

| Verificação da esbeltez |             |           |
|-------------------------|-------------|-----------|
| $\lambda_p$             | $\lambda_r$ | $\lambda$ |
| 59.2                    | 73.8        | 53.1      |

| Resultados |         |        |        |
|------------|---------|--------|--------|
| Vpl[kN]    | VRd[kN] | Sd/Rd  | Status |
| 419        | 381     | 0.0791 | OK     |

### RESUMO DAS VERIFICAÇÕES

| Resumo dos resultados |        |        |
|-----------------------|--------|--------|
| Tipo de verificação   | Sd/Rd  | Status |
| Força Normal          | 0      | OK     |
| Momento X-X           | 0.884  | OK     |
| Momento Y-Y           | 0      | OK     |
| Cisalhamento X-X      | 0.0791 | OK     |
| Cisalhamento Y-Y      | 0      | OK     |
| Torção                | 0      | OK     |
| Esforços combinados   | 0      | OK     |

**Fator máximo = 0.884**

Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

Figura 37 – Verificação ELU pontos extremos da viga principal:

### Verificação pela Norma Brasileira de Aço

Cálculo linear  
 Combinação: ELU  
 Sistema de coordenadas: Principal  
 Extremo 1D: Global  
 Seleção: B87  
 Filtro: Seção Transversal = CS22 - W360x32.9  
 Selecionar seções: Extremos

### Verificação pela Norma Brasileira de Aço - ABNT - NBR-8800:2008

| Dados da barra |            |                 |
|----------------|------------|-----------------|
| Barra          | Posição[m] | Perfil          |
| B87            | 5          | W(GERD)360x32.9 |

Seção:

Seção: W(GERD)360x32.9



| Dados do aço  |                         |                         |                        |                        |
|---------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Aço           | Fy[kN/cm <sup>2</sup> ] | Fu[kN/cm <sup>2</sup> ] | E[kN/cm <sup>2</sup> ] | G[kN/cm <sup>2</sup> ] |
| A572 grade 50 | 34.5                    | 44.8                    | 20000                  | 7692                   |

| Esforços* |            |            |         |         |           |
|-----------|------------|------------|---------|---------|-----------|
| Nd[kN]    | Mdx[kN.cm] | Mdy[kN.cm] | Vdx[kN] | Vdy[kN] | Td[kN.cm] |
| 0         | 0          | 0          | 0       | -91.4   | 0         |

\*Combinação: ELU

### Verificação do Cortante: Menor inércia (Y-Y)

| Parâmetros de cálculo |      |    |
|-----------------------|------|----|
| Lv[m]                 | a[m] | Kv |
| 0                     | 5000 | 5  |

| Verificação da esbeltez |             |           |
|-------------------------|-------------|-----------|
| $\lambda_p$             | $\lambda_r$ | $\lambda$ |
| 59.2                    | 73.8        | 53.1      |

| Resultados |         |       |        |
|------------|---------|-------|--------|
| Vpl[kN]    | VRd[kN] | Sd/Rd | Status |
| 419        | 381     | 0.24  | OK     |

### RESUMO DAS VERIFICAÇÕES

| Resumo dos resultados |       |        |
|-----------------------|-------|--------|
| Tipo de verificação   | Sd/Rd | Status |
| Força Normal          | 0     | OK     |
| Momento X-X           | 0     | OK     |
| Momento Y-Y           | 0     | OK     |
| Cisalhamento X-X      | 0.24  | OK     |
| Cisalhamento Y-Y      | 0     | OK     |
| Torção                | 0     | OK     |
| Esforços combinados   | 0     | OK     |

**Fator máximo = 0.24**

Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

Observa-se na Figura 36 a verificação para o momento resistente máximo na região central da viga que é a principal solicitação que governa o dimensionamento

do perfil, já na Figura 37, onde é demonstrado o ponto de extremidade da viga como o momento fletor é igual a zero, tem-se o valor de cisalhante máximo.

Diante disso, nota-se que a verificação para o momento fletor é o esforço mais solicitado pela viga, portanto esta que governará o dimensionamento. Tendo a razão entre o esforço solicitante e o esforço resistente menor que 1, especificamente 0,884, a viga encontra-se aprovada para ELU.

#### 4.3.3.2.2 Estado Limite de Serviço (ELS)

Considerando que a validação do estado limite de serviço é feita conforme a equação da Figura 18, ou seja,  $Deslocamento\ Limite = L/350$ , o deslocamento máximo atuante deve ser menor que este valor, considerando, ainda, a combinação de ELS disposta na Figura 25.

Na Figura a seguir (38), nota-se os valores de deformações encontrados nas vigas principais.

Figura 38 – Vigas principais com as maiores deformações:

#### Deformações 1D

Cálculo linear

Combinação: ELS

Sistema de coordenadas: Principal

Extremo 1D: Global

Seleção: Tudo

Filtro: Seção Transversal = CS22 - W360x32.9

Deformações

| Nome | dx [m] | Caso  | Seção Transversal | u <sub>x</sub> [mm] | u <sub>y</sub> [mm] | u <sub>z</sub> [mm] | φ <sub>x</sub> [mrad] | φ <sub>y</sub> [mrad] | φ <sub>z</sub> [mrad] | U <sub>total</sub> [mm] |
|------|--------|-------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| B87  | 2,50   | ELS/1 | CS22 - W360x32.9  | 0,0                 | 0,0                 | -7,6                | 0,0                   | 0,0                   | 0,0                   | 7,6                     |
| B87  | 5,00   | ELS/1 | CS22 - W360x32.9  | 0,0                 | 0,0                 | -0,2                | 0,0                   | -4,5                  | 0,0                   | 0,2                     |
| B88  | 0,00   | ELS/1 | CS22 - W360x32.9  | 0,0                 | 0,0                 | -0,2                | 0,0                   | 4,5                   | 0,0                   | 0,2                     |
| B52  | 0,00   | ELS/1 | CS22 - W360x32.9  | 0,0                 | 0,0                 | -0,1                | 0,0                   | 2,3                   | 0,0                   | 0,1                     |

| Nome  | Chave de combinação  |
|-------|----------------------|
| ELS/1 | LC1 + LC2 + 0.40*LC3 |

Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

Tendo em vista que o comprimento das vigas principais é 5.000mm, pode-se ter um deslocamento máximo de 14.29mm. Como o deslocamento máximo da viga principal, via *software*, foi de 7,6mm, tem-se que a viga está aprovada para o ELS.

### 4.3.3.3 Pilares

De acordo com a análise de cálculo via *software*, constatou-se que o perfil laminado, disponibilizado na tabela da empresa Gerdau Açominas, que melhor se enquadra no dimensionamento do pilar é o W 150x22,5(H), no material ASTM A 572 Grau 50, considerando o pior caso entre os pilares.

Abaixo segue as demais considerações referentes ao ELU e ELS.

#### 4.3.3.3.2 Estado Limite de Último (ELU)

Devido a ligações dos pilares com as vigas principais e secundárias ser do tipo articulada e o mezanino possuir dimensões simétricas, o pilar receberá apenas o esforço normal de compressão.

Desta forma, para a sua aprovação, é necessário que a razão entre os esforços solicitantes e os esforços resistentes sejam menores do que 1, conforme Equação 12 e 17, bem como a combinação de ELU disposta na Figura 25.

A Figura a seguir (39) demonstra os valores de solicitação e resistência de cálculo dos pilares deste projeto.

Figura 39 – Verificação ELU nos pilares:

#### Verificação pela Norma Brasileira de Aço

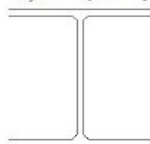
Cálculo linear  
 Combinação: ELU  
 Sistema de coordenadas: Principal  
 Extremo 1D: Global  
 Seleção: Tudo  
 Filtro: Seção Transversal = CS26 - W150x22.5

#### Verificação pela Norma Brasileira de Aço - ABNT - NBR-8800:2008

| Dados da barra |            |                 |
|----------------|------------|-----------------|
| Barra          | Posição[m] | Perfil          |
| B5             | 0          | W(GERD)150x22.5 |

Seção:

Seção: W(GERD)150x22.5



| Dados do aço  |                         |                         |                        |                        |
|---------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Aço           | Fy[kN/cm <sup>2</sup> ] | Fu[kN/cm <sup>2</sup> ] | E[kN/cm <sup>2</sup> ] | G[kN/cm <sup>2</sup> ] |
| A572 grade 50 | 34.5                    | 44.8                    | 20000                  | 7692                   |

| Esforços* |            |            |         |         |           |
|-----------|------------|------------|---------|---------|-----------|
| Nd[kN]    | Mdx[kN.cm] | Mdy[kN.cm] | Vdx[kN] | Vdy[kN] | Td[kN.cm] |
| -244      | 0          | 0          | 0       | 0       | 0         |

\*Combinação: ELU

### Verificação ao Esforço Normal

| Verificação da esbeltez* |                      |             |             |        |
|--------------------------|----------------------|-------------|-------------|--------|
| Lbf <sub>x</sub> [m]     | Lbf <sub>y</sub> [m] | $\lambda_x$ | $\lambda_y$ | Status |
| 3.6                      | 3.6                  | 55.3        | 98.5        | OK     |

\*Item 5.3.4 - Verificação da esbeltez

### Definição da carga de flambagem elástica - ANEXO E

Anexo E - Força axial de flambagem elástica

Item E.1.1 - Seções com dupla simetria

| Carga de flambagem elástica* |         |         |          |        |
|------------------------------|---------|---------|----------|--------|
| Nex[kN]                      | Ney[kN] | Nez[kN] | Neyz[kN] | Ne[kN] |
| 1872                         | 589     | 1458    | N/A      | 589    |

| Flambagem local* |           |             |           |               |
|------------------|-----------|-------------|-----------|---------------|
| Mesas            |           | Almas       |           | Classificação |
| $\lambda_p$      | $\lambda$ | $\lambda_p$ | $\lambda$ |               |
| 13.5             | 11.5      | 35.9        | 20.5      | Compacta      |

| Resistência à compressão |        |   |                      |         |       |        |
|--------------------------|--------|---|----------------------|---------|-------|--------|
| $\lambda_0$              | $\chi$ | Q | Ag[cm <sup>2</sup> ] | NRd[kN] | Sd/Rd | Status |
| 1.3                      | 0.492  | 1 | 29                   | 447     | 0.546 | OK     |

### RESUMO DAS VERIFICAÇÕES

| Resumo dos resultados |       |        |
|-----------------------|-------|--------|
| Tipo de verificação   | Sd/Rd | Status |
| Força Normal          | 0.546 | OK     |
| Momento X-X           | 0     | OK     |
| Momento Y-Y           | 0     | OK     |
| Cisalhamento X-X      | 0     | OK     |
| Cisalhamento Y-Y      | 0     | OK     |
| Torção                | 0     | OK     |
| Esforços combinados   | 0     | OK     |

**Fator máximo = 0.546**

Fonte: Elaborado pelo autor via SCIA Engineer (2022).

Como a razão entre o esforço solicitante e o esforço resistente foi menor que 1, especificamente 0,546, o pilar encontra-se aprovada para ELU.

#### 4.3.3.3.1 Estado Limite de Serviço (ELS)

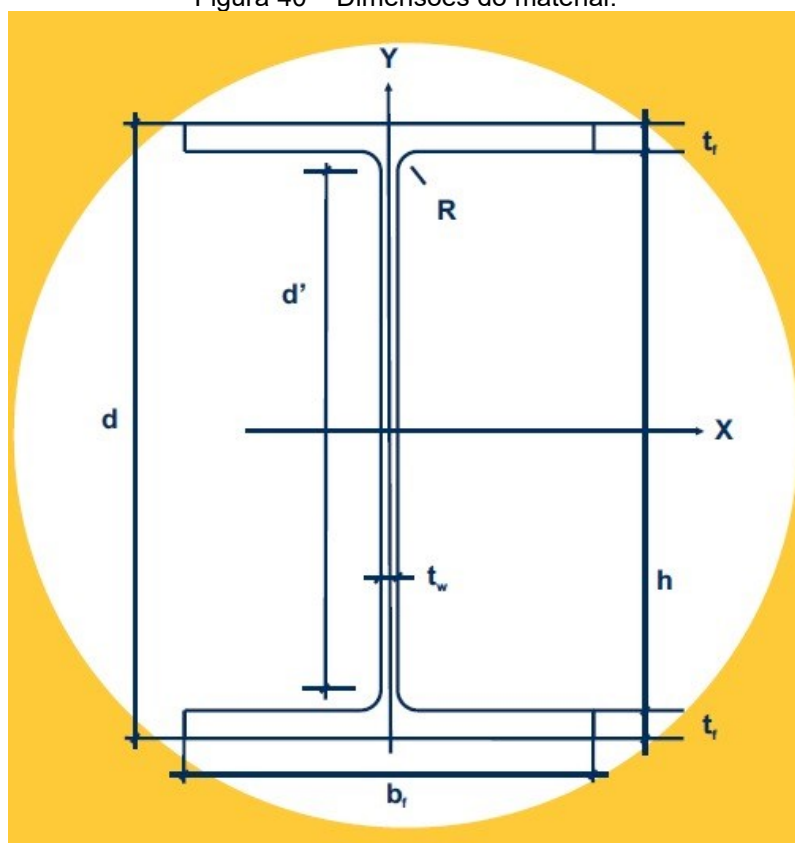
Para a validação da deslocabilidade da estrutura, não foram feitas análises muito profundas, porém as avaliações não lineares do SCIA Engineer constataram que a estrutura possui pequena deslocabilidade, estando em conformidade com a ANBT NBR 8800:2008.

#### 4.4 CÁLCULO MISTO

Após a realização do cálculo via *software*, procedeu-se com o cálculo misto, que é constituído pelo cálculo analítico do dimensionamento das vigas para esforços resistentes com o auxílio do *software* Ftool para extração dos esforços solicitantes, a fim de ter um comparativo dos resultados obtidos.

Para o cálculo misto, os esforços solicitantes serão encontrados através do método das áreas de influência, para tanto, na presente apuração, utilizou-se as dimensões da seção transversal da tabela de perfis da empresa Gerdau Açominas, de acordo com a estrutura definida na Figura 40.

Figura 40 – Dimensões do material:



Fonte: Gerdau Açominas (2022).

##### 4.4.1 Vigas secundárias

Após a análise de cálculo via *software* ter dado como resultado o perfil laminado W 250x25,3, no material ASTM A 572 Grau 50 como adequado para a validação dos resultados, manteve-se tais elementos para a presente apuração.

Desta forma, seguem os dados referentes ao procedimento de cálculo realizado:

- $f_y = 345$  MPa
- Peso do painel  $w_{all} = 0,313$  kN/m<sup>2</sup>
- Sobrecarga de  $500$  kgf/m<sup>2</sup> =  $4,903$  kN/m<sup>2</sup>
- Comprimento da viga =  $6$  m
- Área de influência =  $1,25$  m<sup>2</sup>

Diante desses elementos, nos subitens a seguir, aborda-se considerações específicas sobre ELU e ELS.

#### 4.4.1.1 Estado Limite de Último (ELU)

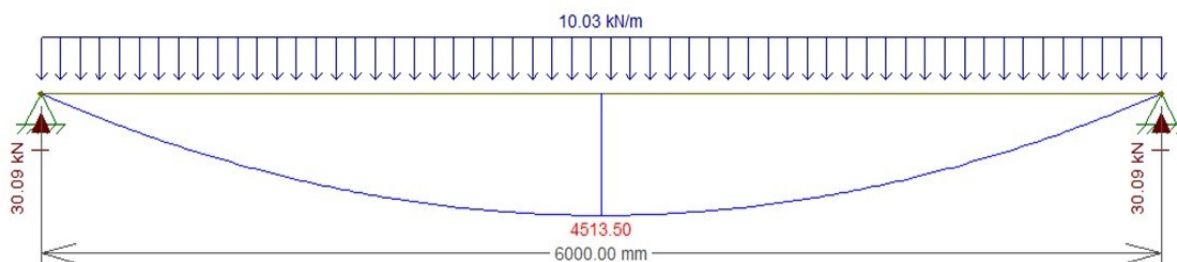
##### 4.4.1.1.1 Esforço solicitante de cálculo

Considerando a necessidade de encontrar o esforço solicitante de cálculo, calculou-se a combinação para ELU, conforme Equação 2.

$$F_d = 1,25 \cdot 0,248 + 1,35 \cdot 0,313 \cdot 1,25 + 1,5 \cdot 4,903 \cdot 1,25$$

$$F_d = 10,03 \text{ kN/m}$$

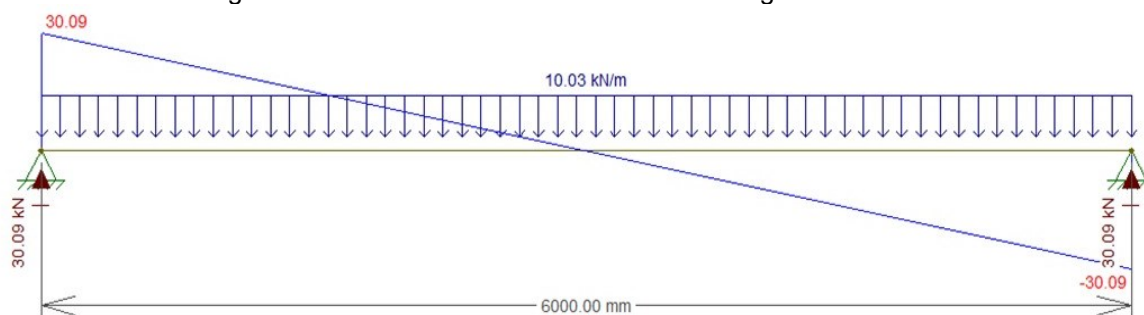
Figura 41 – Momento solicitante atuante na viga secundária:



Fonte: Elaborado pelo autor via *software* Ftool (2022).



Figura 42 – Cisalhante solicitante atuante na viga secundária:



Fonte: Elaborado pelo autor via *software* Ftool (2022).

#### 4.4.1.1.2 Esforço resistente de cálculo

##### 4.4.1.1.2.1 Momento resistente

Esclarece-se, inicialmente, que todos os cálculos para o momento resistente de cálculo foram realizados conforme orientação do anexo G da ABNT NBR 8800:2008. Neste sentido, segue abaixo os valores encontrados para o índice de esbeltez e do parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação.

##### 4.4.1.1.2.1.1 Flambagem Local da Alma (FLA)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{d'}{t_w} = \frac{220}{6,1} = 36,07$$

$$\lambda_p = 3,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,76 \cdot \sqrt{\frac{200e9}{345e6}} = 90,53$$

Diante dos dados obtidos, aplicou-se a Equação 13 para o momento fletor resistente, já que o  $\lambda \leq \lambda_p$ .

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{al}} = \frac{Z_x f_y}{\gamma_{al}} = \frac{311,1 \cdot 34,5}{1,1} = 9757,23 \text{ kN.cm}$$

##### 4.4.1.1.2.1.2 Flambagem Local da Mesa (FLM)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f/2}{t_f} = \frac{102/2}{8,4} = 6,07$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{200e9}{345e6}} = 9,15$$

Diante dos dados obtidos, aplicou-se a Equação 13 para o momento fletor resistente, já que o  $\lambda \leq \lambda_p$ , razão pela qual o momento resistente fica igual para o FLA.

#### 4.4.1.1.2.1.3 Flambagem Lateral com Torção (FLT)

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} = \frac{300}{2,14} = 140,19$$

$$\lambda_p = 1,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,76 \cdot \sqrt{\frac{200e9}{345e6}} = 42,37$$

Considerando que o  $\lambda \geq \lambda_p$ , deve-se calcular o parâmetro de esbeltez correspondente ao início de escoamento ( $\lambda_r$ ), de acordo com a orientação da nota um da norma 8800:08.

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

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W_x}{E J}, \text{ onde } \sigma_r = 30\% \cdot f_y$$

$$\beta_1 = \frac{(34,5 - 0,3 \cdot 34,5) 270,2}{20000 \cdot 7,06} = 0,046$$

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{149 \cdot 7,06}}{2,14 \cdot 7,06 \cdot 0,046} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \cdot 22955 \cdot 0,046^2}{149}}} = 130,93$$

Desta forma, como o  $\lambda \geq \lambda_r$ , aplica-se a Equação 15.

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

Visando encontrar o  $C_b$ , aplicou-se a Equação 16, sendo:

$$C_b = \frac{12,5 \cdot 4513,5}{2,5 \cdot 4513,5 + 3 \cdot 1974,66 + 4 \cdot 3385,12 + 3 \cdot 4231,41} = 1,30$$

$$M_{cr} = \frac{1,3 \cdot \pi^2 \cdot 149}{300^2} \sqrt{\frac{22995}{149} \left(1 + 0,039 \frac{7,06 \cdot 300^2}{22955}\right)} = 7607,23 \text{ kN.cm}$$

Diante dos dados obtidos, aplicou-se na Equação 15, conforme segue.

$$M_{Rd} = \frac{7607,23}{1,1} = 6915,67 \text{ kN.cm}$$

Dos valores dos três momentos encontrados para FLA, FLM e FLT o menor foi de FLT, sendo, assim, esse será o momento resistente de cálculo, afinal, o  $M_{sd} \leq M_{Rd}$ , ou seja,  $4513,50 \leq 6915,67$ .

#### 4.4.1.1.2.2 Esforço cisalhante

Para o cálculo do esforço cisalhante resistente de cálculo, seguiu-se o item 5.4.3.1 da ABNT NBR 8800:2008. Desta forma, abaixo encontram-se os valores obtidos para o índice de esbeltez e do parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação.

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{d'}{t_w} = \frac{220}{6,1} = 36,07$$

$$\lambda_p = 1,1 \cdot \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} = 1,1 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 200e9}{345e6}} = 59,22$$

Diante dos dados obtidos, verificou-se que o  $\lambda \leq \lambda_p$ , sendo, assim, o esforço cisalhante resistente de cálculo é dado pela Equação 18.

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{0,60 A_w f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,60 d t_w f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,60 \cdot 257 \cdot 6,1 \cdot 34,5}{1,1} = 295,01 \text{ kN}$$

Do exposto, conclui-se que o  $V_{sd} \leq V_{Rd}$ , ou seja,  $30,09 \leq 295,01$ .

#### 4.4.1.2 Estado Limite de Serviço (ELS)

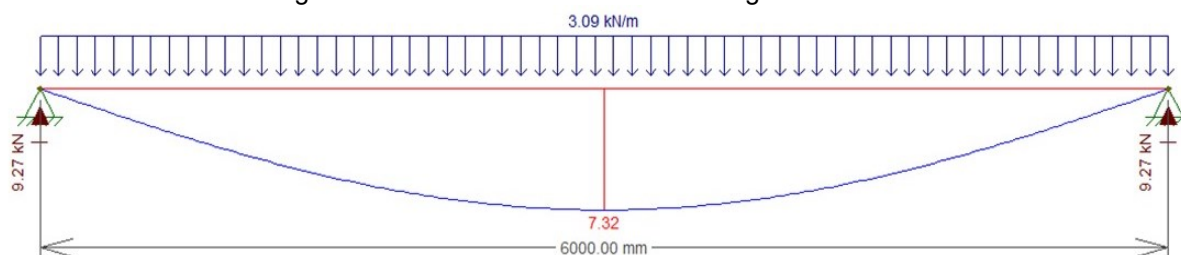
Sabendo a necessidade de encontrar a combinação de ELS a fim de verificar o carregamento atuante da viga, bem como do deslocamento máximo permitido, aplicou-se os dados para o procedimento do cálculo na Equação 1, visando obter a deformação limite do mezanino.

Tendo em vista o disposto no subitem 4.3.3.1.2, o deslocamento máximo permitido é 17,14mm, sendo, assim, procedeu-se com a apuração do deslocamento atuante.

$$F_{ser} = 1 \cdot 0,248 + 1 \cdot 0,313 \cdot 1,25 + 0,4 \cdot 4,903 \cdot 1,25$$

$$F_{ser} = 3,09 \text{ kN/m}$$

Figura 43 – Deslocamento atuante na viga secundária:



Fonte: Elaborado pelo autor via *software* Ftool (2022).

Desta forma, nota-se que deformação atuante é menor que a limite, encontrando-se aprovada para o ELS.

#### 4.4.2 Vigas principais

Considerando a análise de cálculo via *software* ter dado como resultado o perfil laminado W 360x32,9, considerando o pórtico central, que é o pior caso, no material ASTM A 572 Grau 50 como adequado para a validação dos resultados, manteve-se tais elementos para a presente apuração.

Neste sentido, seguem os dados referentes ao procedimento de cálculo realizado:

- $f_y = 345 \text{ MPa}$
- Peso do painel  $w_{all} = 0,313 \text{ kN/m}^2$
- Sobrecarga de  $500 \text{ kgf/m}^2 = 4,903 \text{ kN/m}^2$

- Comprimento da viga = 5 m
- Área de influência = 6 m<sup>2</sup>

Diante disso, nos subitens a seguir, aborda-se considerações específicas sobre ELU e ELS.

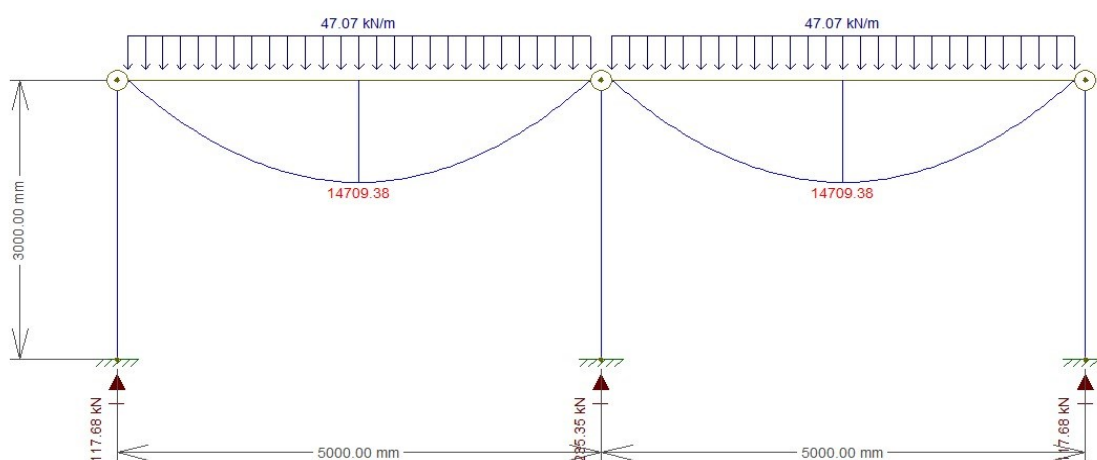
#### 4.4.2.1 Estado Limite de Último (ELU)

##### 4.4.2.1.1 Esforço solicitante de cálculo

Em vista da necessidade de encontrar o esforço solicitante de cálculo, aferiu-se a combinação para ELU, de acordo com a Equação 2.

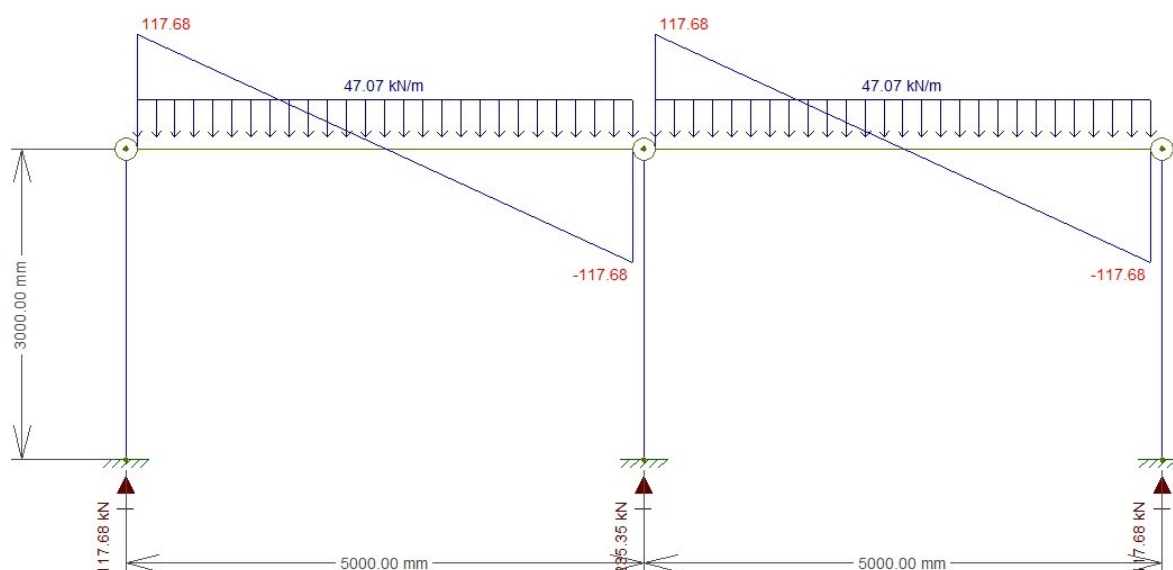
$$F_d = 1,25 \cdot 0,3226 + 1,35 \cdot 0,313 \cdot 6 + 1,5 \cdot 4,903 \cdot 6$$
$$F_d = 47,07 \text{ kN/m}$$

Figura 44 – Momento solicitante atuante na viga principal:



Fonte: Elaborado pelo autor via *software* Ftool (2022).

Figura 45 – Cisalhante solicitante atuante na viga principal:



Fonte: Elaborado pelo autor via *software* Ftool (2022).

#### 4.4.2.1.2 Esforço resistente de cálculo

##### 4.4.2.1.2.1 Momento resistente

Primeiro, explica-se que todos os cálculos para o momento resistente de cálculo foram realizados conforme orientação do anexo G da ABNT NBR 8800:2008, sendo, assim, segue abaixo os valores encontrados para o índice de esbeltez e do parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação.

##### 4.4.2.1.2.1.1 Flambagem Local da Alma (FLA)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{d'}{t_w} = \frac{308}{5,8} = 53,1$$

$$\lambda_p = 3,76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,76 \cdot \sqrt{\frac{200e9}{345e6}} = 90,53$$

Como resultado, aplicou-se a Equação 13 para o momento fletor resistente, visto que o  $\lambda \leq \lambda_p$ .

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{al}} = \frac{Z_x f_y}{\gamma_{al}} = \frac{547,6 \cdot 34,5}{1,1} = 17174,7 \text{ kN.cm}$$

#### 4.4.2.1.2.1.2 Flambagem Local da Mesa (FLM)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f/2}{t_f} = \frac{127/2}{8,5} = 7,43$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{200e9}{345e6}} = 9,15$$

Com base nos dados obtidos, aplicou-se a Equação 13 para o momento fletor resistente, uma vez que o  $\lambda \leq \lambda_p$ , razão pela qual o momento resistente ficou o mesmo que o FLA.

#### 4.4.2.1.2.1.3 Flambagem Lateral com Torção (FLT)

Como a avaliação de ELU feita via *software*, conforme Figura 36, mostrou-se que o momento causado pela flambagem lateral por torção não é o ponto crítico do dimensionamento e também pelo fato da viga principal estar contida lateralmente pelas vigas secundárias a cada 1250mm, logo, não foi feito o cálculo misto para FLT, razão pela qual o valor do momento resistente de cálculo será o próprio valor de FLA/FLM.

Sendo, assim, tem-se  $M_{sd} \leq M_{Rd}$ , ou seja,  $14709,37 \leq 17174,7$ .

#### 4.4.2.1.2.2 Esforço cisalhante

Para o cálculo do esforço cisalhante resistente de cálculo, seguiu-se o item 5.4.3.1 da ABNT NBR 8800:2008, assim, abaixo encontram-se os valores obtidos para o índice de esbeltez e do parâmetro de esbeltez correspondente a plastificação.

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{d'}{t_w} = \frac{308}{5,8} = 53,10$$

$$\lambda_p = 1,1 \cdot \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} = 1,1 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 200e9}{345e6}} = 59,22$$

Diante dos dados obtidos, verificou-se que o  $\lambda \leq \lambda_p$ , sendo, assim, o esforço cisalhante resistente de cálculo é dado pela Equação 18.

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{0,60 A_w f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,60 dt_w f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{0,60 \cdot 349 \cdot 5,8 \cdot 34,5}{1,1} = 380,91 \text{ kN}$$

Do exposto, nota-se que o  $V_{sd} \leq V_{Rd}$ , ou seja,  $117,68 \leq 380,91$ .

#### 4.4.2.2 Estado Limite de Serviço (ELS)

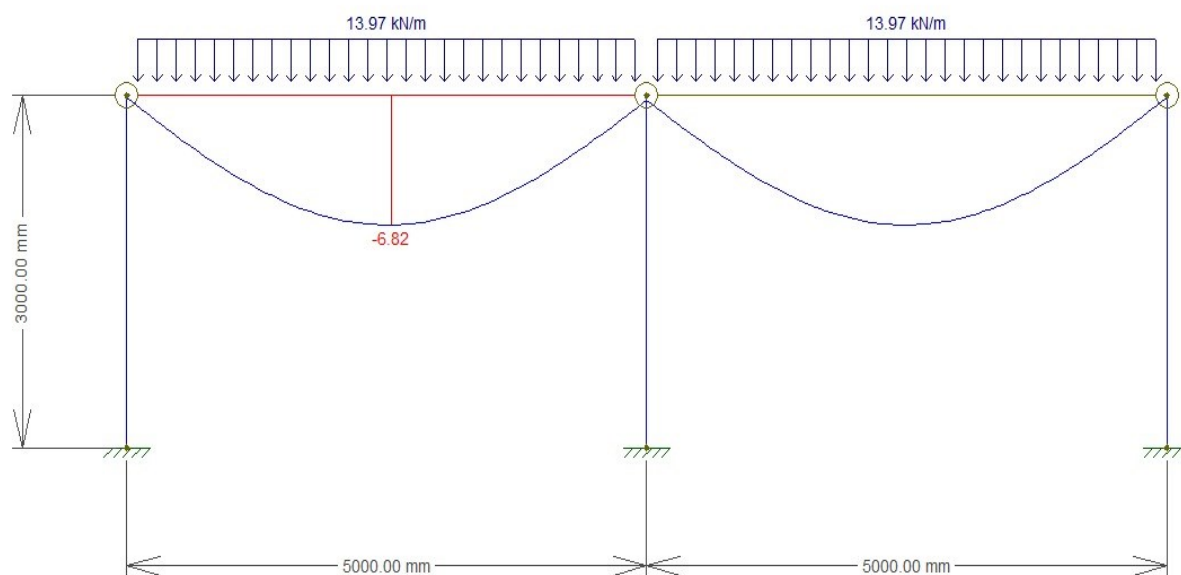
Tendo em vista a necessidade de encontrar a combinação de ELS a fim de verificar o carregamento atuante da viga, bem como do deslocamento máximo permitido, aplicou-se os dados para o procedimento do cálculo na Equação 1, visando obter a deformação limite do mezanino.

Ainda, considerando o disposto no subitem 4.3.3.1.2, o deslocamento máximo permitido é 17,28mm, razão pela qual procedeu-se com a apuração do deslocamento atuante.

$$F_{ser} = 1 \cdot 0,3226 + 1 \cdot 0,313 \cdot 6 + 0,4 \cdot 4,903 \cdot 6$$

$$F_{ser} = 13,97 \text{ kN/m}$$

Figura 46 – Deslocamento atuante na viga principal:



Fonte: Elaborado pelo autor via *software* Ftool (2022).



Portanto, observa-se que deformação atuante é menor que a limite, encontrando-se aprovada para o ELS.

#### 4.4.3 Pilares

Com base na análise de cálculo via *software*, procedeu-se com dimensionamento no perfil laminado W 150x22,5(H), considerando o pilar central, que é o pior caso, no material ASTM A 572 Grau 50, uma vez que os resultados obtidos se mostraram adequados para o objetivo deste projeto.

Neste sentido, seguem os dados referentes ao procedimento de cálculo realizado:

- $f_y = 345$  MPa
- Peso do painel  $w_{all} = 0,313$  kN/m<sup>2</sup>
- Sobrecarga de 500 kgf/m<sup>2</sup> = 4,903 kN/m<sup>2</sup>
- Comprimento da viga = 5 m
- Área de influência = 6 m<sup>2</sup>

Diante desses elementos, nos subitens a seguir, aborda-se considerações específicas sobre ELU e ELS.

##### 4.4.3.1 Estado Limite de Último (ELU)

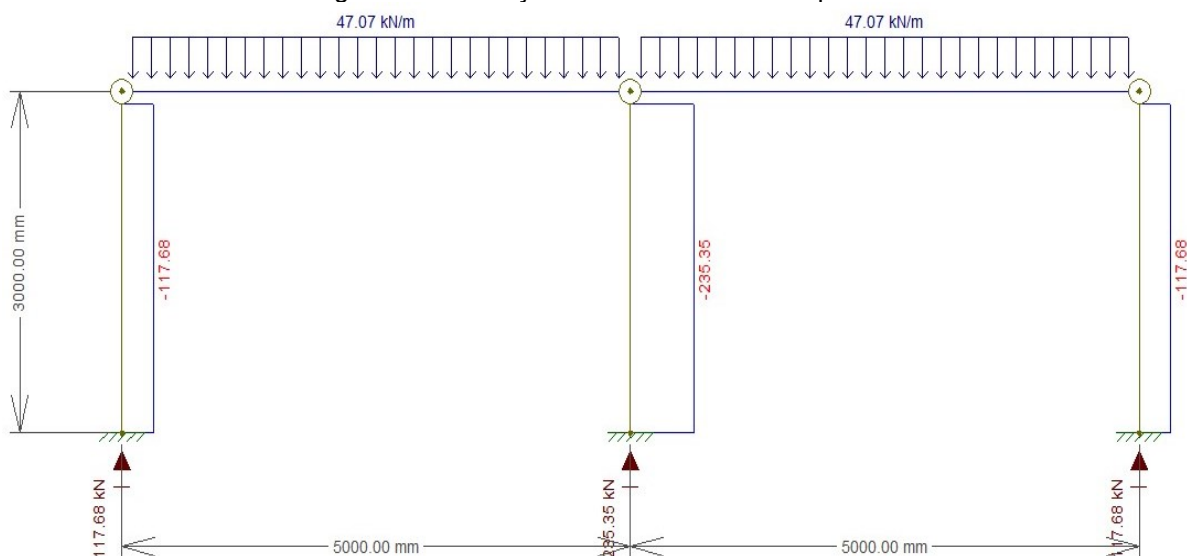
###### 4.4.3.1.1 Esforço solicitante de cálculo

Para a combinação de ELU dos pilares, considerou-se a mesma que a viga principal, na medida em que configura o pórtico principal da estrutura, porém avaliou-se, apenas, o esforço normal do pilar porque é o único solicitado. Desta forma, diante da necessidade de encontrar o esforço solicitante de cálculo, aferiu-se a combinação de acordo com a Equação 2.

$$F_d = 1,25 \cdot 0,3226 + 1,35 \cdot 0,313 \cdot 6 + 1,5 \cdot 4,903 \cdot 6$$

$$F_d = 47,07 \text{ kN/m}$$

Figura 47 – Esforço normal solicitante nos pilares:



Fonte: Elaborado pelo autor via *software* Ftool (2022).

#### 4.4.3.1.2 Esforço resistente de cálculo

##### 4.4.3.1.2.1 Compressão

###### 4.4.3.1.2.1.1 Limitação do índice de esbeltez

Inicialmente, calculou-se a limitação do índice de esbeltez, considerando o coeficiente de flambagem recomendado de 1,2.

$$\lambda_x = \frac{k_x L_b}{r_x} = \frac{1,2 \cdot 300}{6,51} = 55,3$$

$$\lambda_y = \frac{k_y L_b}{r_y} = \frac{1,2 \cdot 300}{3,65} = 91,6$$

Como o valor do índice de esbeltez deu menor do que 200, o pilar encontra-se validado para este quesito.

###### 4.4.3.1.2.1.2 Verificação dos elementos compridos AL e AA

Para o cálculo do fator de redução total associado a flambagem local que se usou a equação  $Q = Q_a \cdot Q_s$ . Partindo dessas considerações, abaixo apresenta-se os valores obtidos para  $Q_a$  e  $Q_s$ .

#### 4.4.3.1.2.1.2.1 Verificação da mesa (AL)

Para o cálculo do índice de esbeltez e do índice de esbeltez limite será utilizado os dados do anexo F deste trabalho (aplicado neste subitem e no seguir).

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f/2}{t_f} = \frac{152/2}{6,6} = 11,52$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,56 \cdot \sqrt{\frac{200e9}{345e6}} = 13,48$$

Como resultado de  $\frac{b}{t} \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{lim}$ , não ocorre flambagem local da mesa, sendo, assim,  $Q_s = 1$ .

#### 4.4.3.1.2.1.2.2 Verificação da alma (AA)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{d'}{t_w} = \frac{119}{5,8} = 20,52$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 1,49 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,49 \cdot \sqrt{\frac{200e9}{345e6}} = 35,87$$

Considerando que  $\frac{b}{t} \leq \left(\frac{b}{t}\right)_{lim}$ , não ocorre flambagem local da mesa, sendo, assim,  $Q_a = 1$ .

Como o valor de  $Q_a$  e  $Q_s$  deu igual a 1, o que caracteriza uma parede compacta, o valor de  $Q$  é igual a 1, conforme a equação disposta no subitem 4.4.3.2.2.1.2.

#### 4.4.3.1.2.1.3 Força axial de flambagem elásticas

Neste ponto, aplicou-se a Equação 7, a fim de obter os dados necessários referente ao eixo x, y e z.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 1229}{(1,2 \cdot 300)^2} = 1871,87$$

$$N_{eY} = \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 387}{(1,2 \cdot 300)^2} = 589,43$$

Do mesmo modo, conforme a Equação 9, calculou-se o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento ( $r_0$ ).

$$r_0^2 = 6,51^2 + 3,65^2 = 55,7026$$

Como o perfil adotado é simétrico em relação aos seus eixos, o valor de  $x_0$  e  $y_0$  é igual a zero.

Ainda, aplicou-se a Equação 8 para obter os dados necessários do eixo z, conforme segue.

$$N_{eZ} = \frac{1}{55,7026} \left[ \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 20417}{(1,2 \cdot 300)^2} + 7700 \cdot 4,75 \right] = 1214,88$$

Para o cálculo do índice de esbeltez reduzido, utilizou-se o menor valor da força axial de flambagem elástica, que, neste caso, é o  $N_{eY}$ .

#### 4.4.3.1.2.1.4 Índice de esbeltez reduzido ( $\lambda_0$ )

Calculou-se o índice de esbeltez reduzido, conforme a Equação 6, onde tem-se:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{1 \cdot 29 \cdot 34,5}{589,49}} = 1,30$$

De acordo com a Equação 5, o fator de redução associado a resistência de compressão é definido como  $\lambda_0 \leq 1,5$ :  $\chi = 0,658^{\lambda_0^2} = 0,658^{1,30^2} = 0,493$ .

#### 4.4.3.1.2.1.5 Força axial de compressão resistente de cálculo ( $N_{c,Rd}$ )

Com a definição de todos os parâmetros que compõem a Equação 4, calculou-se a força axial de compressão resistente de cálculo.

$$N_{c,Rd} = \frac{0,493 \cdot 1 \cdot 29 \cdot 34,5}{1,1} = 448,41 \text{ kN}$$

Do exposto, conclui-se que o  $N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$ , ou seja,  $235,35 \leq 448,41$ .

#### 4.4.3.2 Estado Limite de Serviço (ELS)

Para o cálculo analítico não foi avaliado o ELS do pilar, uma vez que o mesmo apresentou valor irrisório via *software*, ou seja, um deslocamento menor que 1 mm (tal deslocamento sequer consta no sistema Ftool).

Neste sentido, tem-se que o seu deslocamento máximo seria 8,57 mm.

### 4.5 LIGAÇÕES

As ligações utilizadas neste projeto, tiveram como base o manual de ligações para estrutura de aço com perfis laminados da empresa Gerdau Açominas, onde encontram-se diversos tipos de ligações, sendo rígidas ou articuladas, para suas respectivas solicitações máximas de cálculo.

#### 4.5.1 Ligações viga secundária com viga principal

A ligação da viga secundária com a viga principal é uma ligação articulada, com duas cantoneiras parafusadas nas duas abas (LCPP). Neste sentido, observa-se que a Figura 48 constam as orientações de montagem e cálculo da empresa fabricante, enquanto que na Figura 49, a aplicação neste projeto.

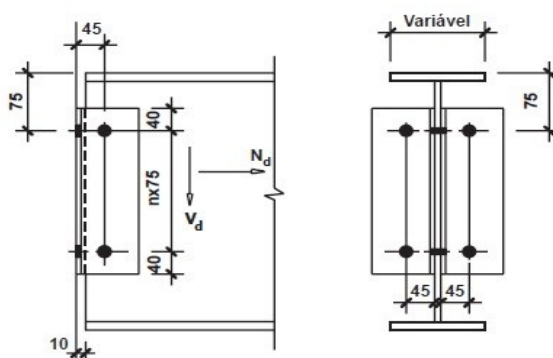
Figura 48 – Orientação de montagem e cálculo da empresa Gerdau Açominas:

LIGAÇÃO: LCPP

**PERFIS:** W 250 x 17,9  
W 250 x 22,3  
W 250 x 25,3  
W 250 x 28,4  
W 250 x 32,7  
W 250 x 38,5  
W 250 x 44,8

**CANTONEIRA:** L 76 x 76 x 6,4 x 155

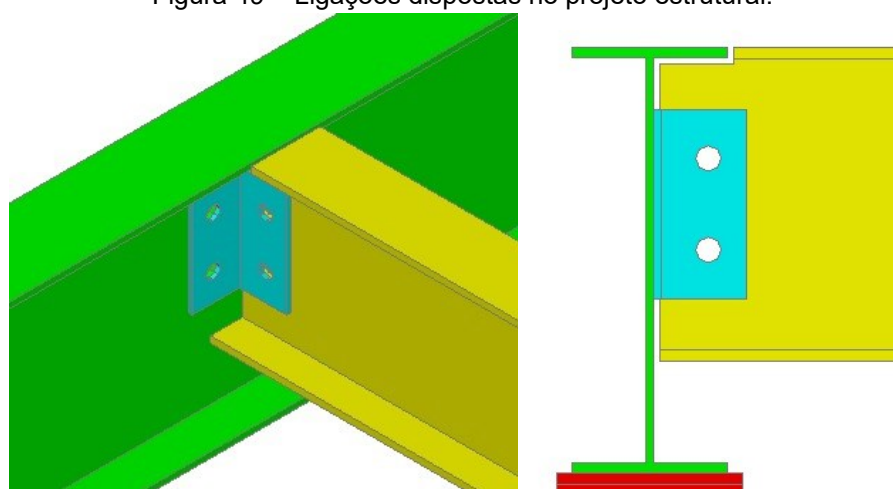
**PARAFUSOS:** 2 ø 3/4" A325N  
4 ø 3/4" A325N



|   |              |                  | LCPP 20-B        | LCPP 21-B                         | LCPP 22-B                         |     |                   |
|---|--------------|------------------|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----|-------------------|
| <b>NOTAS:</b><br>1 - Dimensões em mm.<br>2 - Os valores tabelados são referentes às resistências de cálculo das ligações, conforme NBR 8800:2008.<br>3 - Verificar obrigatoriamente o elemento suporte.<br>4 - As vigas devem ser verificadas à flambagem lateral considerando obrigatoriamente os recortes na região da ligação. |              |                  |                  |                                   |                                   |     |                   |
|   |              |                  |                  | $L_v(\text{max}) = 30 \text{ mm}$ | $L_v(\text{max}) = 25 \text{ mm}$ |     |                   |
|   |              |                  | $V_d(\text{kN})$ |                                   |                                   |     |                   |
| n   | Perfis       | $N_d(\text{kN})$ | Sem recortes     | $L_h(\text{max})$                 |                                   |     | $L_h(\text{max})$ |
|   |              |                  |                  | 80                                | 130                               | 170 | 80                |
| 1   | W 250 x 17,9 | 0                | 146              | 134                               | 134                               | 109 | 126               |
|   |              | 39               | 73               | -                                 | -                                 | -   | -                 |
|   | W 250 x 22,3 | 0                | 177              | 160                               | 160                               | 135 | 157               |
|   |              | 38               | 88               | -                                 | -                                 | -   | -                 |
|   | W 250 x 25,3 | 0                | 186              | 166                               | 166                               | 148 | 166               |
|   |              | 37               | 93               | -                                 | -                                 | -   | -                 |
|   | W 250 x 28,4 | 0                | 195              | 172                               | 172                               | 161 | 172               |
|   |              | 37               | 97               | -                                 | -                                 | -   | -                 |
|   | W 250 x 32,7 | 0                | 186              | 165                               | 165                               | 159 | 165               |
|   |              | 37               | 93               | -                                 | -                                 | -   | -                 |

Fonte: Gerdau Açoaminas (2022).

Figura 49 – Ligações dispostas no projeto estrutural:



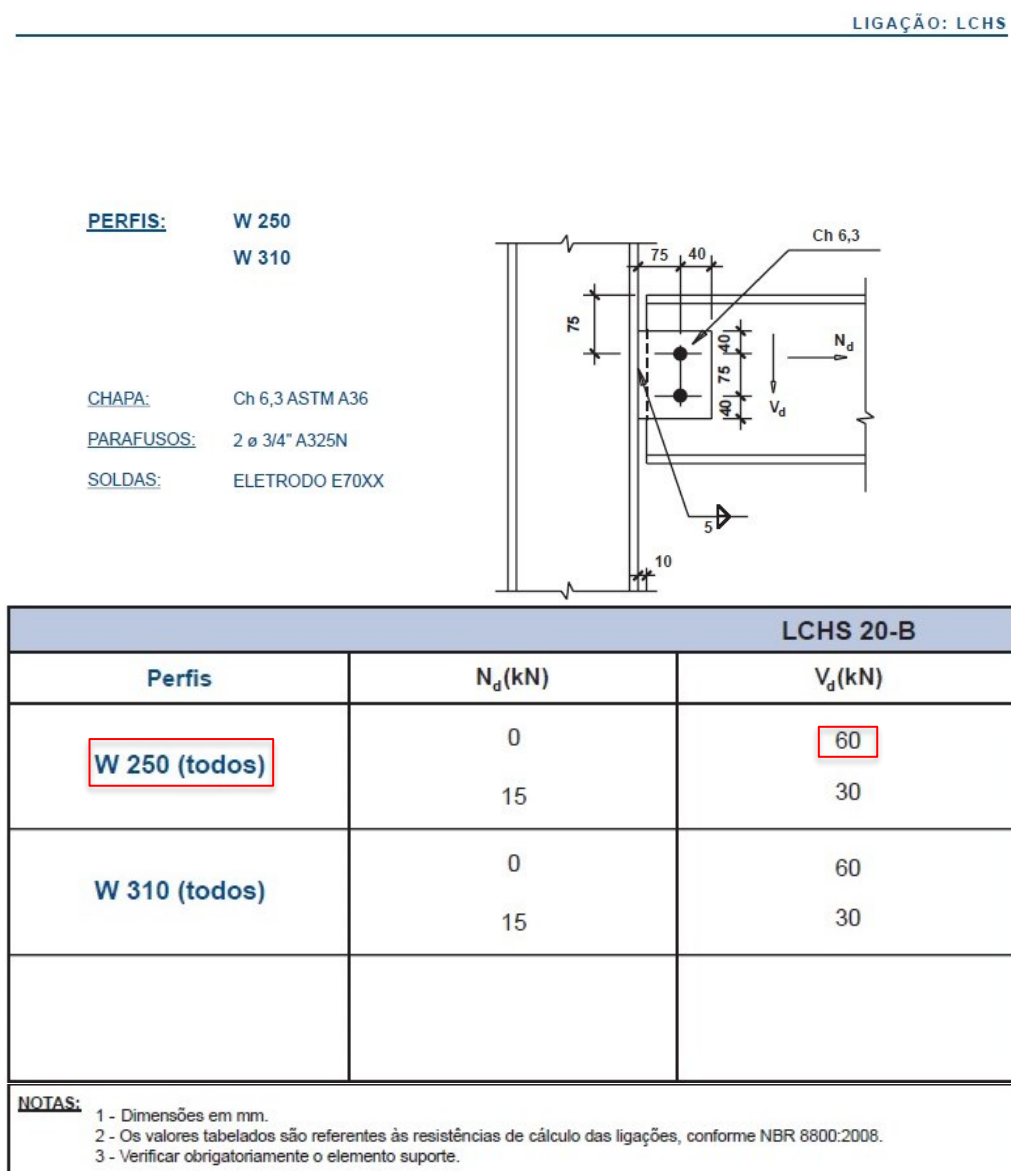
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O esforço cisalhante solicitante de cálculo foi dado na Figura 47, onde  $V_{Sd} = 30,09 \text{ kN}$  e a  $V_{Rd} = 166 \text{ kN}$ , desta forma, a ligação encontra-se aprovada para o objetivo proposto.

#### 4.5.2 Ligações viga secundária com pilar

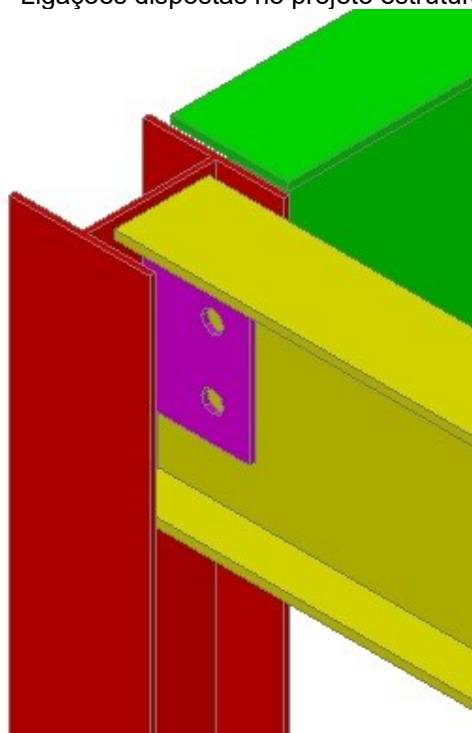
A ligação da viga secundária com o pilar é uma ligação articulada com chapas simples (LCHS), porém, a mesma é soldada no pilar e parafusada na viga secundária. Diante disso, nota-se que consta na Figura 50 as orientações de montagem e cálculo da empresa fabricante, enquanto que na Figura 51, a aplicação neste projeto.

Figura 50 – Orientação de montagem e cálculo da empresa Gerdau Açominas:



Fonte: Gerdau Açominas (2022).

Figura 51 – Ligações dispostas no projeto estrutural:



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Considerando que o esforço cisalhante solicitante de cálculo foi dado na Figura 47, onde  $V_{Sd} = 30,09 \text{ kN}$  e a  $V_{Rd} = 60 \text{ kN}$ , desta forma, a ligação encontra-se aprovada para o objetivo proposto.

#### 4.5.3 Ligações viga principal com pilar

A ligação da viga principal com o pilar é uma ligação articulada com chapas simples (LCHS), onde, a mesma é soldada no pilar e parafusada na viga principal. Sendo, assim, observa-se que consta na Figura 52 as orientações de montagem e cálculo da empresa fabricante, enquanto que na Figura 53, a aplicação neste projeto.

Figura 52 – Orientação de montagem e cálculo da empresa Gerdau Açominas:

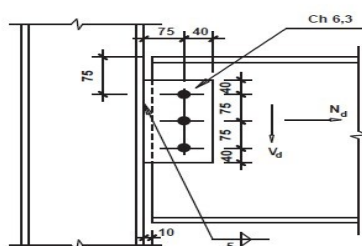
LIGAÇÃO: LCHS

**PERFIS:** W 310  
W 360  
W 410  
W 460

**CHAPA:** Ch 6,3 ASTM A36

**PARAFUSOS:** 3 ø 3/4" A325N

**SOLDAS:** ELETRODO E70XX





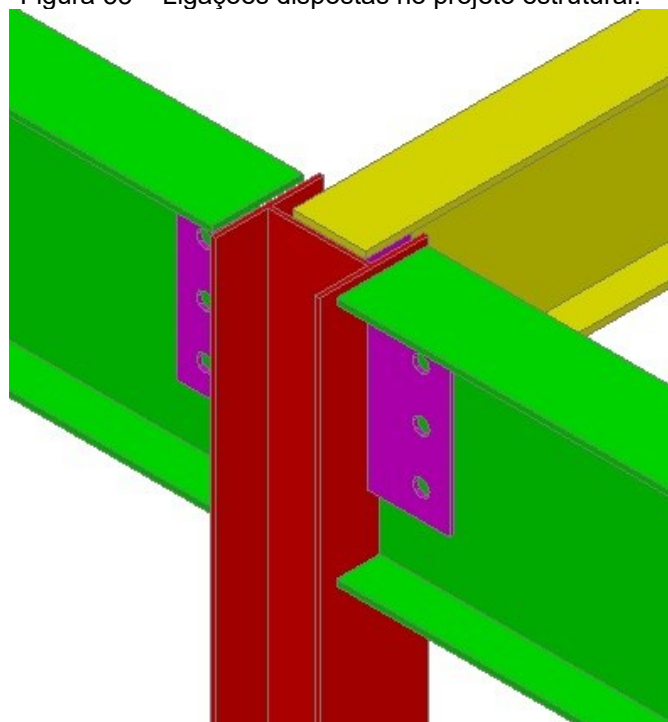
| LCHS 30-B     |            |            |
|---------------|------------|------------|
| Perfis        | $N_d$ (kN) | $V_d$ (kN) |
| W 310 (todos) | 0          | 120        |
|               | 30         | 60         |
| W 360 (todos) | 0          | 120        |
|               | 30         | 60         |
| W 410 (todos) | 0          | 120        |
|               | 30         | 60         |
| W 460 (todos) | 0          | 120        |
|               | 30         | 60         |

**NOTAS:**

- 1 - Dimensões em mm.
- 2 - Os valores tabelados são referentes às resistências de cálculo das ligações, conforme NBR 8800:2008.
- 3 - Verificar obrigatoriamente o elemento suporte.

Fonte: Gerdau Açominas (2022).

Figura 53 – Ligações dispostas no projeto estrutural:



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

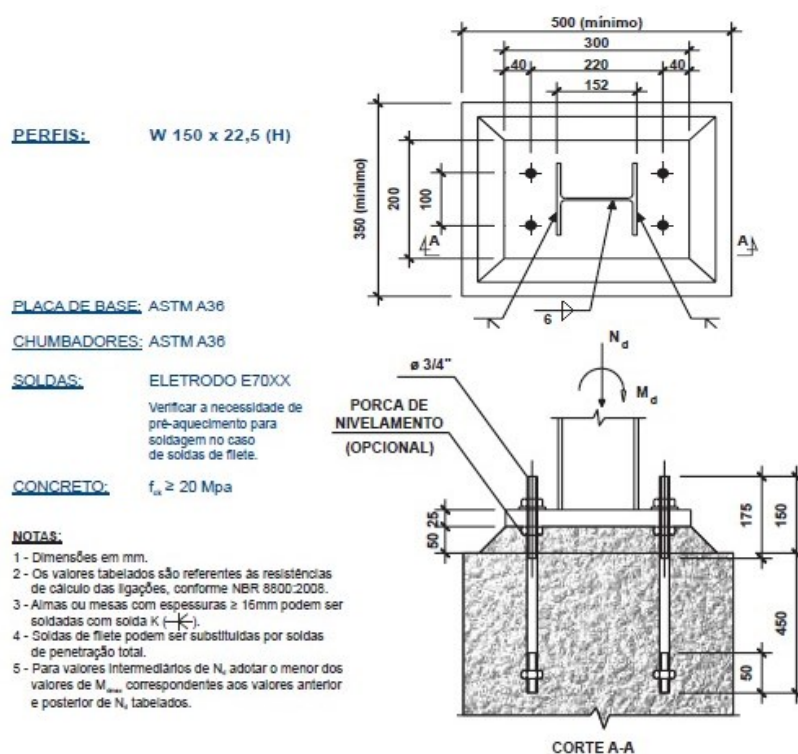
Tendo em vista que o esforço cisalhante solicitante de cálculo foi dado na Figura 44, onde  $V_{Sd} = 117,68 \text{ kN}$  e a  $V_{Rd} = 120 \text{ kN}$ , desta forma, a ligação encontra-se aprovada para o objetivo proposto.

#### 4.5.4 Base do pilar

A base engastada do pilar em perfil estrutural da Gerdau Açominas (PBE) é uma ligação rígida, onde a ligação entre o perfil e a chapa é uma ligação soldada e entre a placa de base e o concreto é chumbado com quatro chumbadores de diâmetro de 3/4". Nas na Figura 54, observa-se as orientações de montagem e cálculo da empresa fabricante, enquanto que na Figura 55, a aplicação neste projeto.

Figura 54 – Orientação de montagem e cálculo da empresa Gerdau Açominas:

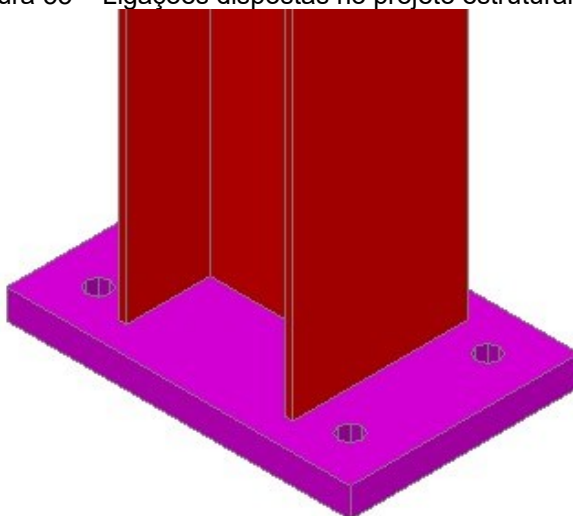
LIGAÇÃO: PBE



| $N_d$<br>(kN) | $M_{dmax}$<br>(kNm) | $N_d$<br>(kN) | $M_{dmax}$<br>(kNm) | $N_d$<br>(kN) | $M_{dmax}$<br>(kNm) |
|---------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|
| 586           | 0,0                 | 381           | 12,4                | 176           | 17,8                |
| 557           | 1,8                 | 352           | 14,2                | 147           | 21,0                |
| 527           | 3,6                 | 322           | 16,0                | 117           | 24,3                |
| 498           | 5,3                 | 293           | 17,4                | 88            | 27,5                |
| 469           | 7,1                 | 264           | 18,4                | 59            | 30,7                |
| 440           | 8,8                 | 234           | 18,7                | 29            | 27,7                |
| 410           | 10,6                | 205           | 18,5                | 0             | 24,8                |

Fonte: Gerdau Açominas (2022).

Figura 55 – Ligações dispostas no projeto estrutural:



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Levando em conta que o esforço normal de compressão é o único esforço solicitante no pilar, conforme Figura 48, onde  $N_{c,Sd} = 235,35 \text{ kN}$  e a  $N_{c,Rd} = 586 \text{ kN}$ , sendo, assim, a ligação encontra-se aprovada para o objetivo proposto.

## 5 RESULTADO MEDIANTE A COMPARAÇÃO DOS CÁLCULOS

Neste capítulo, apresenta-se a comparação dos resultados dos cálculos realizados, bem como demonstrado o percentual de variação de ambos.

**Tabela 7 – Viga principal (ELU).**

| <b>Esforços</b> | <b>Cálculo software</b> | <b>Cálculo misto</b> | <b>Variação</b> |
|-----------------|-------------------------|----------------------|-----------------|
| Msd (kNcm)      | 15190                   | 14709,38             | 3,27%           |
| Mrd (kNcm)      | 17175                   | 17174,7              | 0,002%          |
| Vsd (kN)        | 91,4                    | 117,68               | 22,33%          |
| Vrd (kN)        | 381                     | 380,91               | 0,02%           |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

**Tabela 8 – Viga principal (ELS).**

| <b>Deformações</b>     | <b>Cálculo software</b> | <b>Cálculo misto</b> | <b>Variação</b> |
|------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------|
| Deformação limite (mm) | 14,29                   | 14,29                | -               |
| Flexa atuante (mm)     | 7,6                     | 6,82                 | 11,44%          |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

**Tabela 9 – Viga secundária (ELU).**

| <b>Esforços</b> | <b>Cálculo software</b> | <b>Cálculo misto</b> | <b>Variação</b> |
|-----------------|-------------------------|----------------------|-----------------|
| Msd (kNcm)      | 4522                    | 4513,5               | 0,19%           |
| Mrd (kNcm)      | 6921                    | 6912,67              | 0,08%           |
| Vsd (kN)        | 30,13                   | 30,09                | 0,13%           |
| Vrd (kN)        | 295                     | 295,01               | 0,003%          |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

**Tabela 10 – Viga secundária (ELS).**

| <b>Deformações</b>     | <b>Cálculo software</b> | <b>Cálculo misto</b> | <b>Variação</b> |
|------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------|
| Deformação limite (mm) | 17,14                   | 17,14                | -               |
| Flexa atuante (mm)     | 8,1                     | 7,32                 | 10,66%          |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

**Tabela 11 – Viga secundária (ELS).**

| <b>Deformações</b>     | <b>Cálculo software</b> | <b>Cálculo misto</b> | <b>Variação</b> |
|------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------|
| Deformação limite (mm) | 17,14                   | 17,14                | -               |
| Flexa atuante (mm)     | 15,3                    | 14,14                | 8,20%           |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Esclarece-se que os valores encontrados para deslocamento atuante na Tabela 10, levam em consideração a viga secundária isoladamente, ou seja, quando a mesma está ligada diretamente ao pilar, conforme ilustrado na Figura 51. Enquanto

que os valores encontrados na Tabela 11, levam em consideração a deformação da viga secundária mais a deformação da viga principal, conforme ilustrado na Figura 49.

**Tabela 12** – Pilar (ELU).

| <b>Esforços</b> | <b>Cálculo software</b> | <b>Cálculo misto</b> | <b>Variação</b> |
|-----------------|-------------------------|----------------------|-----------------|
| Nsd (kN)        | 244                     | 235,35               | 3,68%           |
| Nrd (kN)        | 447                     | 448,41               | 0,31%           |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Diante de todas essas análises, pode-se verificar que as variações encontradas entre o cálculo misto e o cálculo via *software* para os esforços solicitantes foi porque o cálculo misto foi calculado apenas pelo método das áreas de influencias, o que pode gerar uma pequena diferença de resultados.

Além disso, mesmo com algumas variações obtidas nos cálculos realizados, os perfis selecionados encontram-se aprovados tanto para ELS e ELU, demonstrando-se que a estrutura proposta está apta para suportar as cargas exigidas.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo demonstrar e definir o processo de elaboração de um projeto de um mezanino metálico em perfil W laminado fabricado em aço ASTM A 572 Grau 50, nas dimensões 18x10x3 metros, para uma carga de 500 kgf/m<sup>2</sup>, incluindo o seu piso *wall*, com base nos perfis disponibilizados pela empresa Gerdau Açominas.

Em suma, para obter a verificação da estrutura, utilizou-se o *software* SCIA Engineer, como primeira metodologia da análise estrutural, tendo em vista que a segunda foi realizada pelo autor com abordagem mista (manual e por *software* Ftool), tudo em conformidade com as diretrizes da ANBT NBR 8800:2008, podendo-se, desta forma, verificar e validar a eficácia da estrutura metálica proposta.

Após estas considerações, torna-se essencial compreender o desenvolvimento de projetos para além da ampla compreensão e administração, incluindo, contribuir ao desenvolvimento e amadurecimento das empresas.

## 7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6355**: Perfis estruturais de aço formados a frio - Padronização. Rio de Janeiro, 1979.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BELLEI, Ildony Hélio. **Edifícios industriais em aço**: projeto e cálculo. 6. Ed. São Paulo: Pini, 2010.

BRASIL, Instituto Aço. **Aço Brasil mantém projeções para 2022**, [S. l.], p. não paginado, 26 abr. 2022. Disponível em: [https://acobrasil.org.br/site/noticia/aco-brasil-mantem-projecoes-para-2022/#:~:text=No%201%C2%BA%20trimestre%20de%202022,Mt%20\(%2D17%2C7%25\)](https://acobrasil.org.br/site/noticia/aco-brasil-mantem-projecoes-para-2022/#:~:text=No%201%C2%BA%20trimestre%20de%202022,Mt%20(%2D17%2C7%25).). Acesso em: 30 abr. 2022.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Estruturas de aço**: conceitos, técnicas e linguagem. 9. Ed. São Paulo: Ziguarte, 1997.

FALEIROS, João Paulo Martin; JUNIOR, Job Rodrigues Teixeira; SANTANA, Bruno Marques Santana. **O crescimento da indústria brasileira de estruturas metálicas e o boom da construção civil**: um panorama do período 2001-2010. Rio de Janeiro: BNDES, 2012. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1517/1/A%20set.35\\_O%20crescimento%20da%20ind%20c3%20b%20a%20s%20t%20r%20u%20c%20t%20u%20r%20a%20b%20r%20a%20s%20e%20i%20n%20d%20u%20s%20t%20r%20u%20t%20u%20r%20a%20s%20m%20e%20t%20a%20l%20i%20c%20a%20s%20e%20o%20b%20o%20o%20m%20d%20a%20c%20o%20n%20s%20t%20r%20u%20c%20a%20o%20c%20i%20v%20i%20l%20.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1517/1/A%20set.35_O%20crescimento%20da%20ind%20c3%20b%20a%20s%20t%20r%20u%20c%20t%20u%20r%20a%20b%20r%20a%20s%20e%20i%20n%20d%20u%20s%20t%20r%20u%20t%20u%20r%20a%20s%20m%20e%20t%20a%20l%20i%20c%20a%20s%20e%20o%20b%20o%20o%20m%20d%20a%20c%20o%20n%20s%20t%20r%20u%20c%20a%20o%20c%20i%20v%20i%20l%20.pdf). Acesso em: 30 abr. 2022.

GONSALVES, Elisa Pereira. **Conversas sobre iniciação à pesquisa científica**. 5. ed. Campinas: Alínea, 2011.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MARTHA, Luiz Fernando. **Análise de Estruturas**: conceitos e métodos básicos. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

METALICA. **Mezaninos em estrutura metálica**. Disponível em: <https://metalica.com.br/mezaninos-em-estrutura-metalica-2/>. Acesso em: 01 mai. 2022.

PESSARELLO, Regiane Grigoli. **Estudo exploratório quanto ao consumo de água na produção de obras de edifícios**: avaliação e fatores influenciadores. 2008. 111 f. Monografia (MBA em Tecnologia e Gestão Na Produção De edifícios) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.



## ANEXO A – DESLOCAMENTOS MÁXIMOS

Tabela C.1 — Deslocamentos máximos

| Descrição  | $\delta^a$    |
|--|---------------|
| - Travessas de fechamento  | $L/180^b$     |
|  | $L/120^{c,d}$ |
| - Terças de cobertura <sup>g)</sup>  | $L/180^e$     |
|  | $L/120^f$     |
| - Vigas de cobertura <sup>g)</sup>   | $L/250^h$     |
| - Vigas de piso  | $L/350^h$     |
| - Vigas que suportam pilares   | $L/500^h$     |
| Vigas de rolamento: <sup>j)</sup>  |               |
| - Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 kN                                      | $L/600^i$     |
| - Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN, exceto pontes siderúrgicas | $L/800^i$     |
| - Deslocamento vertical para pontes rolantes siderúrgicas com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN                | $L/1000^i$    |
| - Deslocamento horizontal, exceto para pontes rolantes siderúrgicas  | $L/400$       |
| - Deslocamento horizontal para pontes rolantes siderúrgicas  | $L/600$       |
| Galpões em geral e edifícios de um pavimento:  |               |
| - Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base  | $H/300$       |
| - Deslocamento horizontal do nível da viga de rolamento em relação à base  | $H/400^{k,l}$ |
| Edifícios de dois ou mais pavimentos:  |               |
| - Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base  | $H/400$       |
| - Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos   | $h/500^m$     |
| Lajes mistas   | Ver Anexo Q   |

<sup>a</sup>  $L$  é o vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço,  $H$  é a altura total do pilar (distância do topo à base) ou a distância do nível da viga de rolamento à base,  $h$  é a altura do andar (distância entre centros das vigas de dois pisos consecutivos ou entre centros das vigas e a base no caso do primeiro andar).

<sup>b</sup> Deslocamento paralelo ao plano do fechamento (entre linhas de tirantes, caso estes existam).

<sup>c</sup> Deslocamento perpendicular ao plano do fechamento.

<sup>d</sup> Considerar apenas as ações variáveis perpendiculares ao plano de fechamento (vento no fechamento) com seu valor característico.

<sup>e</sup> Considerar combinações raras de serviço, utilizando-se as ações variáveis de mesmo sentido que o da ação permanente.

<sup>f</sup> Considerar apenas as ações variáveis de sentido oposto ao da ação permanente (vento de sucção) com seu valor característico.

<sup>g</sup> Deve-se também evitar a ocorrência de empoçamento, com atenção especial aos telhados de pequena declividade.

<sup>h</sup> Caso haja paredes de alvenaria sobre ou sob uma viga, solidarizadas com essa viga, o deslocamento vertical também não deve exceder a 15 mm.

<sup>i</sup> Valor não majorado pelo coeficiente de impacto.

<sup>j</sup> Considerar combinações raras de serviço.

<sup>k</sup> No caso de pontes rolantes siderúrgicas, o deslocamento também não pode ser superior a 50 mm.

<sup>l</sup> O diferencial do deslocamento horizontal entre pilares do pórtico que suportam as vigas de rolamento não pode superar 15 mm.

<sup>m</sup> Tomar apenas o deslocamento provocado pelas forças cortantes no andar considerado, desprezando-se os deslocamentos de corpo rígido provocados pelas deformações axiais dos pilares e vigas.

/ANEXO D

Fonte: NBR 8800 (2008).

## ANEXO B – COEFICIENTES DE PONDERAÇÕES DE AÇÕES

| Combinações                | Ações permanentes ( $\gamma_g$ ) <sup>a,c</sup> |   |   |  |  |             |
|----------------------------|---|---|---|--|--|-------------|
|                            | Diretas   |   |   |  |  | Indiretas   |
|                            | Peso próprio de estruturas metálicas            | Peso próprio de estruturas pré-moldadas | Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes | Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i> | Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos |             |
| Normais                    | 1,25<br>(1,00)                                  | 1,30<br>(1,00)                          | 1,35<br>(1,00)  | 1,40<br>(1,00)   | 1,50<br>(1,00)   | 1,20<br>(0) |
| Especiais ou de construção | 1,15<br>(1,00)                                  | 1,20<br>(1,00)                          | 1,25<br>(1,00)  | 1,30<br>(1,00)   | 1,40<br>(1,00)   | 1,20<br>(0) |
| Excepcionais               | 1,10<br>(1,00)                                  | 1,15<br>(1,00)                          | 1,15<br>(1,00)  | 1,20<br>(1,00)   | 1,30<br>(1,00)   | 0<br>(0)    |
|                            | Ações variáveis ( $\gamma_q$ ) <sup>a,d</sup>   |   |   |  |  |             |
|                            | Efeito da temperatura <sup>b</sup>              | Ação do vento                           | Ações truncadas <sup>e</sup>  | Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação                 |  |             |
| Normais                    | 1,20  | 1,40                                    | 1,20  | 1,50   |  |             |
| Especiais ou de construção | 1,00  | 1,20                                    | 1,10  | 1,30   |  |             |
| Excepcionais               | 1,00  | 1,00                                    | 1,00  | 1,00   |  |             |

<sup>a</sup> Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

<sup>b</sup> O efeito de temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado ação decorrente do uso e ocupação da edificação.

<sup>c</sup> Nas combinações normais, as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,35 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m<sup>2</sup>, ou 1,40 quando isso não ocorrer. Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,25 e 1,30, e nas combinações excepcionais, 1,15 e 1,20.

<sup>d</sup> Nas combinações normais, se as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança forem agrupadas, as ações variáveis que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas também todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,50 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m<sup>2</sup>, ou 1,40 quando isso não ocorrer (mesmo nesse caso, o efeito da temperatura pode ser considerado isoladamente, com o seu próprio coeficiente de ponderação). Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,30 e 1,20, e nas combinações excepcionais, sempre 1,00.

<sup>e</sup> Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico, de modo que o valor dessa ação não possa superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado nesta Tabela se aplica a este valor-limite.

Fonte: NBR 8800 (2008).

## ANEXO C – FATORES DE COMBINAÇÃO E REDUÇÃO PARA AS AÇÕES VARIÁVEIS

| Ações  |   | $\gamma_{fz}^a$ |            |            |
|--|---|-----------------|------------|------------|
|  |   | $\psi_0$        | $\psi_1^d$ | $\psi_2^e$ |
| Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação   | 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 <sup>b)</sup> | 0,5             | 0,4        | 0,3        |
|  | Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas <sup>c)</sup>      | 0,7             | 0,6        | 0,4        |
|  | Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas (ver B.5.1)   | 0,8             | 0,7        | 0,6        |
| Vento  | Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral   | 0,6             | 0,3        | 0          |
| Temperatura  | Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local   | 0,6             | 0,5        | 0,3        |
| Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos   | Passarelas de pedestres   | 0,6             | 0,4        | 0,3        |
|  | Vigas de rolamento de pontes rolantes   | 1,0             | 0,8        | 0,5        |
|  | Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes  | 0,7             | 0,6        | 0,4        |
| <sup>a</sup> Ver alínea c) de 4.7.5.3.<br><sup>b</sup> Edificações residenciais de acesso restrito.<br><sup>c</sup> Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.<br><sup>d</sup> Para estado-limite de fadiga (ver Anexo K), usar $\psi_1$ igual a 1,0.<br><sup>e</sup> Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para $\psi_2$ o valor zero. |   |                 |            |            |

Fonte: NBR 8800 (2008).

## ANEXO D – COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS

| Combinações                | Aço estrutural <sup>a</sup>                                  |                          | Concreto<br>$\gamma_c$ | Aço das<br>armaduras<br>$\gamma_s$ |
|----------------------------|--|--------------------------|------------------------|------------------------------------|
|                            | $\gamma_a$   |                          |                        |                                    |
|                            | Escoamento,<br>flambagem e<br>instabilidade<br>$\gamma_{a1}$ | Ruptura<br>$\gamma_{a2}$ |                        |                                    |
| Normais                    | 1,10   | 1,35                     | 1,40                   | 1,15                               |
| Especiais ou de construção | 1,10   | 1,35                     | 1,20                   | 1,15                               |
| Excepcionais               | 1,00   | 1,15                     | 1,20                   | 1,00                               |

<sup>a</sup> Inclui o aço de fôrma incorporada, usado nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

Fonte: NBR 8800 (2008).

## ANEXO E – VALOR DE $\chi$ EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE ESBELTEZ $\lambda_0$

| $\lambda_0$ | 0,00  | 0,01  | 0,02  | 0,03  | 0,04  | 0,05  | 0,06  | 0,07  | 0,08  | 0,09  | $\lambda_0$ |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| 0,0         | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,999 | 0,999 | 0,998 | 0,998 | 0,997 | 0,997 | 0,0         |
| 0,1         | 0,996 | 0,995 | 0,994 | 0,993 | 0,992 | 0,991 | 0,989 | 0,988 | 0,987 | 0,985 | 0,1         |
| 0,2         | 0,983 | 0,982 | 0,980 | 0,978 | 0,976 | 0,974 | 0,972 | 0,970 | 0,968 | 0,965 | 0,2         |
| 0,3         | 0,963 | 0,961 | 0,958 | 0,955 | 0,953 | 0,950 | 0,947 | 0,944 | 0,941 | 0,938 | 0,3         |
| 0,4         | 0,935 | 0,932 | 0,929 | 0,926 | 0,922 | 0,919 | 0,915 | 0,912 | 0,908 | 0,904 | 0,4         |
| 0,5         | 0,901 | 0,897 | 0,893 | 0,889 | 0,885 | 0,881 | 0,877 | 0,873 | 0,869 | 0,864 | 0,5         |
| 0,6         | 0,860 | 0,856 | 0,851 | 0,847 | 0,842 | 0,838 | 0,833 | 0,829 | 0,824 | 0,819 | 0,6         |
| 0,7         | 0,815 | 0,810 | 0,805 | 0,800 | 0,795 | 0,790 | 0,785 | 0,780 | 0,775 | 0,770 | 0,7         |
| 0,8         | 0,765 | 0,760 | 0,755 | 0,750 | 0,744 | 0,739 | 0,734 | 0,728 | 0,723 | 0,718 | 0,8         |
| 0,9         | 0,712 | 0,707 | 0,702 | 0,696 | 0,691 | 0,685 | 0,680 | 0,674 | 0,669 | 0,664 | 0,9         |
| 1,0         | 0,658 | 0,652 | 0,647 | 0,641 | 0,636 | 0,630 | 0,625 | 0,619 | 0,614 | 0,608 | 1,0         |
| 1,1         | 0,603 | 0,597 | 0,592 | 0,586 | 0,580 | 0,575 | 0,569 | 0,564 | 0,558 | 0,553 | 1,1         |
| 1,2         | 0,547 | 0,542 | 0,536 | 0,531 | 0,525 | 0,520 | 0,515 | 0,509 | 0,504 | 0,498 | 1,2         |
| 1,3         | 0,493 | 0,488 | 0,482 | 0,477 | 0,472 | 0,466 | 0,461 | 0,456 | 0,451 | 0,445 | 1,3         |
| 1,4         | 0,440 | 0,435 | 0,430 | 0,425 | 0,420 | 0,415 | 0,410 | 0,405 | 0,400 | 0,395 | 1,4         |
| 1,5         | 0,390 | 0,385 | 0,380 | 0,375 | 0,370 | 0,365 | 0,360 | 0,356 | 0,351 | 0,347 | 1,5         |
| 1,6         | 0,343 | 0,338 | 0,334 | 0,330 | 0,326 | 0,322 | 0,318 | 0,314 | 0,311 | 0,307 | 1,6         |
| 1,7         | 0,303 | 0,300 | 0,296 | 0,293 | 0,290 | 0,286 | 0,283 | 0,280 | 0,277 | 0,274 | 1,7         |
| 1,8         | 0,271 | 0,268 | 0,265 | 0,262 | 0,259 | 0,256 | 0,253 | 0,251 | 0,248 | 0,246 | 1,8         |
| 1,9         | 0,243 | 0,240 | 0,238 | 0,235 | 0,233 | 0,231 | 0,228 | 0,226 | 0,224 | 0,221 | 1,9         |
| 2,0         | 0,219 | 0,217 | 0,215 | 0,213 | 0,211 | 0,209 | 0,207 | 0,205 | 0,203 | 0,201 | 2,0         |
| 2,1         | 0,199 | 0,197 | 0,195 | 0,193 | 0,192 | 0,190 | 0,188 | 0,186 | 0,185 | 0,183 | 2,1         |
| 2,2         | 0,181 | 0,180 | 0,178 | 0,176 | 0,175 | 0,173 | 0,172 | 0,170 | 0,169 | 0,167 | 2,2         |
| 2,3         | 0,166 | 0,164 | 0,163 | 0,162 | 0,160 | 0,159 | 0,157 | 0,156 | 0,155 | 0,154 | 2,3         |
| 2,4         | 0,152 | 0,151 | 0,150 | 0,149 | 0,147 | 0,146 | 0,145 | 0,144 | 0,143 | 0,141 | 2,4         |
| 2,5         | 0,140 | 0,139 | 0,138 | 0,137 | 0,136 | 0,135 | 0,134 | 0,133 | 0,132 | 0,131 | 2,5         |
| 2,6         | 0,130 | 0,129 | 0,128 | 0,127 | 0,126 | 0,125 | 0,124 | 0,123 | 0,122 | 0,121 | 2,6         |
| 2,7         | 0,120 | 0,119 | 0,119 | 0,118 | 0,117 | 0,116 | 0,115 | 0,114 | 0,113 | 0,113 | 2,7         |
| 2,8         | 0,112 | 0,111 | 0,110 | 0,110 | 0,109 | 0,108 | 0,107 | 0,106 | 0,106 | 0,105 | 2,8         |
| 2,9         | 0,104 | 0,104 | 0,103 | 0,102 | 0,101 | 0,101 | 0,100 | 0,099 | 0,099 | 0,098 | 2,9         |
| 3,0         | 0,097 | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | 3,0         |

Fonte: NBR 8800 (2008).

ANEXO F – VALORES DE  $(b/t)_{lim}$ 

| Elementos | Grupo | Descrição dos elementos  | Alguns exemplos com indicação de $b$ e $t$ | $(b/t)_{lim}$                       |
|-----------|-------|--|--|-------------------------------------|
| AA        | 1     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mesas ou almas de seções tubulares retangulares</li> <li>Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas</li> </ul>  |  | $1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$         |
|           | 2     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Almas de seções I, H ou U</li> <li>Mesas ou almas de seção-caixão</li> <li>Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1</li> </ul>  |  | $1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$         |
| AL        | 3     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas de travessamento</li> </ul>   |  | $0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$         |
|           | 4     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mesas de seções I, H, T ou U laminadas</li> <li>Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas</li> <li>Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas</li> </ul> |  | $0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$         |
|           | 5     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mesas de seções I, H, T ou U soldadas*</li> </ul>   |  | $0,64 \sqrt{\frac{E}{(f_y / k_c)}}$ |
|           | 6     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Almas de seções T</li> </ul>  |  | $0,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$         |

\* O coeficiente  $k_c$  é dado em F.2.

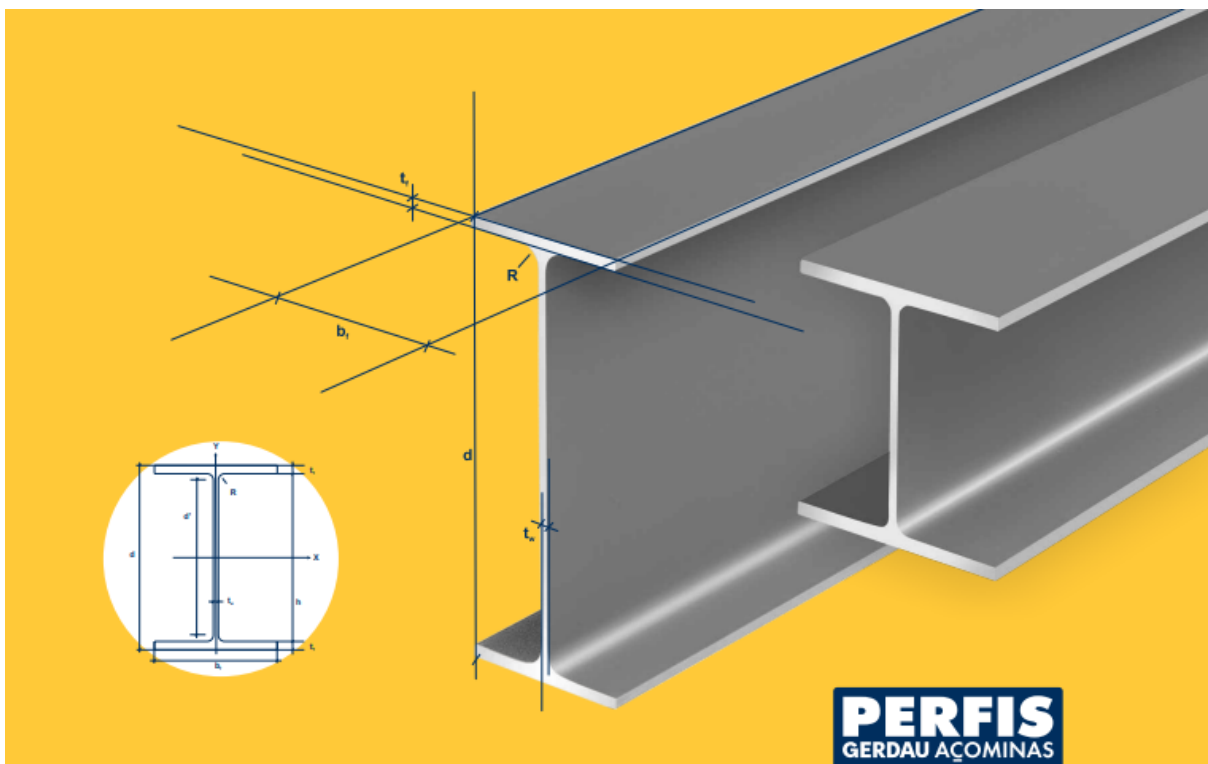
Fonte: NBR 8800 (2008).

## ANEXO G – PARÂMETROS DE MOMENTO FLETOR RESISTENTE

| Tipo de seção e eixo de flexão   | Estados-limites aplicáveis | $M_r$   | $M_{cr}$                               | $\lambda$                    | $\lambda_p$   | $\lambda_r$                    |
|--|----------------------------|---|--|------------------------------|---|--------------------------------|
| 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                        | $(f_y - \sigma_t)W$<br>Ver Nota 5                     | Ver Nota 1                             | $\frac{L_b}{r_y}$            | $1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$   | Ver Nota 1                     |
|  | FLM                        | $(f_y - \sigma_t)W$<br>Ver Nota 5                     | Ver Nota 6                             | $\frac{b/t}{}$<br>Ver Nota 8 | $0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$   | Ver Nota 6                     |
|  | FLA                        | $f_y W$   | Viga de alma esbelta<br>(Anexo H)      | $\frac{h}{t_w}$              | $3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$   | $5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$    |
| Seções I e H com apenas um eixo de simetria situado no plano médio da alma, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia (ver Nota 9) | FLT                        | $(f_y - \sigma_t)W_c$<br>$\leq f_y W_t$<br>Ver Nota 5 | Ver Nota 2                             | $\frac{L_b}{r_{yc}}$         | $1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$   | Ver Nota 2                     |
|  | FLM                        | $(f_y - \sigma_t)W_c$<br>Ver Nota 5                   | Ver Nota 6                             | $\frac{b/t}{}$<br>Ver Nota 8 | $0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$   | Ver Nota 6                     |
|  | FLA                        | $f_y W$   | Viga de alma esbelta<br>(Anexo H)      | $\frac{h_c}{t_w}$            | $\frac{h_c}{h_y} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \leq \lambda_1$<br>$\left(0,54 \frac{M_{pt}}{M_t} - 0,09\right)^2 \leq \lambda_1$ | $5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$    |
| Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia                                       | FLM<br>Ver Nota 3          | $(f_y - \sigma_t)W$                                   | Ver Nota 6                             | $\frac{b/t}{}$<br>Ver Nota 8 | $0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$   | Ver Nota 6                     |
|  | FLA<br>Ver Nota 3          | $f_y W_{ef}$<br>Ver Nota 4                            | $\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$<br>Ver Nota 4 | $\frac{h}{t_w}$              | $1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$   | $1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$    |
| Seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia  | FLT                        | $f_y W$   | $\frac{2,00 C_b E}{\lambda} \sqrt{JA}$ | $\frac{L_b}{r_y}$            | $\frac{0,13 E}{M_{pt}} \sqrt{JA}$   | $\frac{2,00 E}{M_t} \sqrt{JA}$ |
| Seções-caixão e tubulares retangulares, duplamente simétricas, fletidas em relação a um dos eixos de simetria que seja paralelo a dois lados     | FLT<br>Ver Nota 7          | $(f_y - \sigma_t)W$<br>Ver Nota 5                     | $\frac{2,00 C_b E}{\lambda} \sqrt{JA}$ | $\frac{L_b}{r_y}$            | $\frac{0,13 E}{M_{pt}} \sqrt{JA}$   | $\frac{2,00 E}{M_t} \sqrt{JA}$ |
|  | FLM                        | $f_y W_{ef}$<br>Ver Nota 4                            | $\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$<br>Ver Nota 4 | $\frac{b/t}{}$<br>Ver Nota 8 | $1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$   | $1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$    |
|  | FLA                        | $f_y W$   | -                                      | $\frac{h}{t_w}$              | Ver Nota 10   | $5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$    |

Fonte: NBR 8800 (2008).

## ANEXO F – TABELA DE BITOLAS DA EMPRESA GERDAU AÇOMINAS



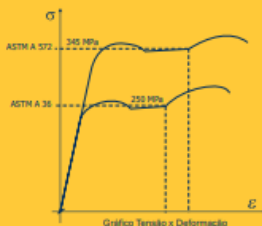
**PERFIS**  
GERDAU AÇOMINAS

### PROPRIEDADES MECÂNICAS

|   | ASTM A 572 Grau 50 | AÇO COR 500 |
|---|--------------------|-------------|
| Limite de escoamento (MPa)                            | <b>345 mín.</b>    | 370 mín.    |
| Limite de Resistência (MPa)                           | <b>450 mín.</b>    | 500 mín.    |
| Alongamento após ruptura, % (l <sub>0</sub> = 200 mm) | <b>18 mín.</b>     | 18 mín.     |

Especificações de aço de acordo com a Norma NBR 7007:2002 são AR 350 e AR 350 COR, respectivamente.

### COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA



NOTAS:

- 1) Aço A 572 supera as solicitações do A 36.
- 2) Produzimos aço A 992 sob encomenda.
- 3) Produzimos aço A 131 sob encomenda e com certificação para uso naval (AH 32/36).
- 4) Material certificado DNV, ABS, BV, Lloyd's Register, Nippon Kaiji Kyokai e Korean Register.



São Paulo  
Av. das Nações Unidas, 8.501 - 7º andar  
Pinheiros - CEP 05425-070  
Fone: (11) 3094-6550 - Fax: (11) 3094-4283

**Belo Horizonte** (31) 3269-4321    **Curitiba** (41) 3641-3616    **Porto Alegre** (51) 3323-2981  
**Recife** (81) 3452-7639    **Rio de Janeiro** (21) 2414-6933    **Vitória** (27) 3398-4431

E-mail: [perfis@gerdau.com.br](mailto:perfis@gerdau.com.br)

[www.gerdau.com.br/perfisgerdauacominas](http://www.gerdau.com.br/perfisgerdauacominas)

**PERFIS**  
GERDAU AÇOMINAS

### TABELA DE BITOLAS

| BITOLA<br>mm x kg/m | Massa<br>Linear<br>kg/m | d<br>mm | h<br>mm | ESPESURA             |                      | h <sub>0</sub><br>mm | d <sub>0</sub><br>mm | Área<br>cm <sup>2</sup> | EIXO X - X                        |                                   |                                   |                                   | EIXO Y - Y           |                      |                                    |                                    | I <sub>xx</sub><br>cm <sup>4</sup> | I <sub>yy</sub><br>cm <sup>4</sup> | C <sub>x</sub><br>cm | C <sub>y</sub><br>cm | u<br>m <sup>2</sup> /m | BITOLA<br>mm x kg/m |                                   |
|---------------------|-------------------------|---------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|---------------------|-----------------------------------|
|                     |                         |         |         | t <sub>1</sub><br>mm | t <sub>2</sub><br>mm |                      |                      |                         | I <sub>x</sub><br>cm <sup>4</sup> | I <sub>y</sub><br>cm <sup>4</sup> | S <sub>x</sub><br>cm <sup>3</sup> | S <sub>y</sub><br>cm <sup>3</sup> | r <sub>x</sub><br>cm | r <sub>y</sub><br>cm | I <sub>xx</sub><br>cm <sup>4</sup> | I <sub>yy</sub><br>cm <sup>4</sup> |                                    |                                    |                      |                      |                        |                     | S <sub>x</sub><br>cm <sup>3</sup> |
| W 150 x 13,0        | 13,0                    | 148     | 100     | 4,3                  | 4,9                  | 138                  | 118                  | 16,8                    | 635                               | 85,8                              | 6,18                              | 96,4                              | 82                   | 16,4                 | 2,22                               | 25,5                               | 2,80                               | 1,72                               | 10,20                | 27,49                | 4,181                  | 0,67                | W 150 x 13,0                      |
| W 150 x 18,0        | 18,0                    | 153     | 102     | 5,8                  | 7,1                  | 139                  | 119                  | 23,4                    | 939                               | 122,8                             | 6,34                              | 134,4                             | 126                  | 24,7                 | 2,32                               | 38,5                               | 2,89                               | 4,34                               | 7,18                 | 26,48                | 6,683                  | 0,69                | W 150 x 18,0                      |
| W 150 x 22,5 (H)    | 22,5                    | 152     | 102     | 5,8                  | 6,6                  | 139                  | 119                  | 29,0                    | 1.229                             | 161,7                             | 6,51                              | 179,6                             | 187                  | 50,9                 | 3,05                               | 77,9                               | 4,10                               | 4,75                               | 11,52                | 20,48                | 20,417                 | 0,88                | W 150 x 22,5 (H)                  |
| W 150 x 24,0        | 24,0                    | 160     | 102     | 6,6                  | 10,3                 | 139                  | 115                  | 31,5                    | 1.384                             | 173,0                             | 6,63                              | 197,6                             | 183                  | 35,9                 | 2,41                               | 55,8                               | 2,73                               | 11,08                              | 4,95                 | 17,48                | 10,206                 | 0,69                | W 150 x 24,0                      |
| W 150 x 29,8 (H)    | 29,8                    | 157     | 102     | 6,6                  | 9,3                  | 138                  | 118                  | 38,5                    | 1.739                             | 221,5                             | 6,72                              | 247,5                             | 256                  | 72,6                 | 3,80                               | 110,8                              | 4,18                               | 10,95                              | 8,23                 | 17,94                | 30,277                 | 0,90                | W 150 x 29,8 (H)                  |
| W 150 x 37,1 (H)    | 37,1                    | 162     | 102     | 8,1                  | 11,6                 | 139                  | 119                  | 47,8                    | 2.244                             | 277,0                             | 6,85                              | 313,5                             | 313                  | 91,8                 | 3,84                               | 140,4                              | 4,22                               | 20,58                              | 6,64                 | 14,67                | 39,930                 | 0,91                | W 150 x 37,1 (H)                  |
| W 200 x 15,0        | 15,0                    | 200     | 100     | 4,3                  | 5,2                  | 190                  | 170                  | 19,4                    | 1.325                             | 130,5                             | 8,20                              | 147,9                             | 87                   | 17,4                 | 2,12                               | 27,3                               | 2,55                               | 2,85                               | 9,62                 | 39,44                | 8,222                  | 0,77                | W 200 x 15,0                      |
| W 200 x 19,3        | 19,3                    | 203     | 102     | 5,8                  | 6,5                  | 190                  | 170                  | 25,1                    | 1.686                             | 166,1                             | 8,19                              | 190,6                             | 116                  | 22,7                 | 2,14                               | 35,9                               | 2,59                               | 4,62                               | 7,85                 | 29,31                | 11,098                 | 0,79                | W 200 x 19,3                      |
| W 200 x 22,5        | 22,5                    | 206     | 102     | 6,2                  | 8,0                  | 190                  | 170                  | 29,0                    | 2.029                             | 197,0                             | 8,37                              | 225,5                             | 142                  | 27,9                 | 2,22                               | 43,9                               | 2,63                               | 6,18                               | 6,38                 | 27,42                | 13,868                 | 0,79                | W 200 x 22,5                      |
| W 200 x 26,6        | 26,6                    | 207     | 103     | 5,8                  | 8,4                  | 190                  | 170                  | 34,2                    | 2.611                             | 252,3                             | 8,73                              | 282,3                             | 330                  | 49,6                 | 3,10                               | 76,3                               | 3,54                               | 7,85                               | 7,92                 | 29,34                | 32,477                 | 0,92                | W 200 x 26,6                      |
| W 200 x 31,3        | 31,3                    | 210     | 104     | 6,4                  | 10,2                 | 190                  | 170                  | 40,3                    | 3.168                             | 301,7                             | 8,86                              | 338,6                             | 410                  | 61,2                 | 3,19                               | 94,0                               | 3,60                               | 12,59                              | 6,57                 | 26,50                | 40,822                 | 0,93                | W 200 x 31,3                      |
| W 200 x 35,9 (H)    | 35,9                    | 201     | 105     | 6,2                  | 10,2                 | 181                  | 161                  | 45,7                    | 3.437                             | 342,0                             | 8,67                              | 379,2                             | 764                  | 92,6                 | 4,09                               | 141,0                              | 4,50                               | 14,51                              | 8,09                 | 25,90                | 69,502                 | 1,03                | W 200 x 35,9 (H)                  |
| W 200 x 41,7 (H)    | 41,7                    | 205     | 106     | 7,2                  | 11,8                 | 181                  | 157                  | 53,5                    | 4.114                             | 401,4                             | 8,77                              | 448,6                             | 901                  | 108,5                | 4,10                               | 165,7                              | 4,53                               | 23,19                              | 7,03                 | 21,86                | 83,948                 | 1,04                | W 200 x 41,7 (H)                  |
| W 200 x 46,1 (H)    | 46,1                    | 203     | 203     | 7,2                  | 11,0                 | 181                  | 161                  | 58,6                    | 4.540                             | 447,6                             | 8,81                              | 495,3                             | 1.535                | 151,2                | 5,12                               | 229,5                              | 5,58                               | 22,01                              | 9,23                 | 22,36                | 141,342                | 1,19                | W 200 x 46,1 (H)                  |



|                    |       |     |     |      |      |     |     |       |        |         |       |         |       |       |      |       |      |        |       |       |           |      |                    |
|--------------------|-------|-----|-----|------|------|-----|-----|-------|--------|---------|-------|---------|-------|-------|------|-------|------|--------|-------|-------|-----------|------|--------------------|
| W 200 x 52,0 (H)   | 52,0  | 206 | 204 | 7,9  | 12,6 | 181 | 157 | 66,9  | 5,298  | 514,4   | 8,90  | 572,5   | 1,784 | 174,9 | 5,16 | 265,8 | 5,61 | 33,34  | 8,10  | 19,85 | 166,710   | 1,19 | W 200 x 52,0 (H)   |
| HP 250 x 53,0 (H)  | 53,0  | 204 | 207 | 11,3 | 11,3 | 181 | 161 | 68,1  | 4,977  | 488,0   | 8,55  | 551,3   | 1,673 | 161,7 | 4,96 | 248,6 | 5,57 | 31,93  | 9,16  | 14,28 | 155,075   | 1,20 | HP 250 x 53,0 (H)  |
| W 200 x 59,0 (H)   | 59,0  | 210 | 205 | 8,1  | 5,4  | 182 | 158 | 76,0  | 6,540  | 584,8   | 9,99  | 655,9   | 2,041 | 199,1 | 5,18 | 303,0 | 5,64 | 47,89  | 7,22  | 17,32 | 156,418   | 1,20 | W 200 x 59,0 (H)   |
| W 200 x 71,0 (H)   | 71,0  | 216 | 206 | 10,2 | 17,4 | 181 | 161 | 91,0  | 7,990  | 709,2   | 9,17  | 803,2   | 2,537 | 246,3 | 5,28 | 374,5 | 5,70 | 81,66  | 5,92  | 15,80 | 246,976   | 1,22 | W 200 x 71,0 (H)   |
| W 200 x 86,0 (H)   | 86,0  | 222 | 209 | 13,0 | 20,6 | 181 | 157 | 110,0 | 9,498  | 855,7   | 9,26  | 984,2   | 3,129 | 300,4 | 5,32 | 458,7 | 5,77 | 142,19 | 5,07  | 12,06 | 317,844   | 1,23 | W 200 x 86,0 (H)   |
| W 250 x 17,9       | 17,9  | 251 | 101 | 4,8  | 5,3  | 240 | 220 | 23,1  | 2,291  | 182,6   | 9,96  | 210,0   | 91    | 18,1  | 1,99 | 28,8  | 2,48 | 2,54   | 9,53  | 45,92 | 13,735    | 0,88 | W 250 x 17,9       |
| W 250 x 22,3       | 22,3  | 254 | 102 | 5,8  | 6,9  | 240 | 220 | 28,9  | 2,939  | 231,4   | 10,09 | 267,7   | 123   | 24,1  | 2,06 | 38,4  | 2,54 | 4,77   | 7,39  | 37,97 | 18,029    | 0,89 | W 250 x 22,3       |
| W 250 x 25,3       | 25,3  | 257 | 102 | 6,1  | 8,4  | 240 | 220 | 32,6  | 3,473  | 270,2   | 10,31 | 311,1   | 148   | 28,3  | 2,14 | 46,4  | 2,58 | 7,86   | 6,07  | 36,15 | 22,965    | 0,89 | W 250 x 25,3       |
| W 250 x 28,4       | 28,4  | 260 | 102 | 6,4  | 10,0 | 240 | 220 | 36,6  | 4,046  | 311,2   | 10,51 | 357,3   | 178   | 34,8  | 2,20 | 54,9  | 2,62 | 10,34  | 5,10  | 34,38 | 27,636    | 0,90 | W 250 x 28,4       |
| W 250 x 32,7       | 32,7  | 258 | 146 | 6,1  | 9,1  | 240 | 220 | 42,1  | 4,937  | 362,7   | 10,82 | 428,5   | 473   | 64,8  | 3,35 | 99,7  | 3,86 | 10,44  | 8,02  | 36,03 | 73,134    | 1,07 | W 250 x 32,7       |
| W 250 x 38,5       | 38,5  | 262 | 147 | 6,6  | 11,2 | 240 | 220 | 49,6  | 6,057  | 462,4   | 11,05 | 517,8   | 594   | 80,8  | 3,46 | 124,1 | 3,93 | 17,63  | 6,56  | 33,27 | 93,242    | 1,08 | W 250 x 38,5       |
| W 250 x 44,8       | 44,8  | 266 | 148 | 7,8  | 13,0 | 240 | 220 | 57,6  | 7,158  | 538,2   | 11,15 | 636,3   | 704   | 95,1  | 3,50 | 148,4 | 3,96 | 27,14  | 5,09  | 28,95 | 112,398   | 1,09 | W 250 x 44,8       |
| HP 250 x 62,0 (H)  | 62,0  | 246 | 256 | 10,5 | 10,7 | 225 | 201 | 79,6  | 8,728  | 709,6   | 11,07 | 790,5   | 2,965 | 234,0 | 6,13 | 357,8 | 6,89 | 33,46  | 11,96 | 19,10 | 417,120   | 1,47 | HP 250 x 62,0 (H)  |
| W 250 x 73,0 (H)   | 73,0  | 253 | 254 | 8,8  | 14,2 | 225 | 201 | 92,7  | 11,257 | 889,9   | 11,32 | 983,3   | 3,880 | 305,6 | 6,47 | 463,1 | 7,01 | 56,94  | 8,94  | 23,33 | 552,800   | 1,48 | W 250 x 73,0 (H)   |
| W 250 x 80,0 (H)   | 80,0  | 256 | 255 | 9,4  | 15,6 | 225 | 201 | 101,9 | 12,550 | 980,5   | 11,10 | 1,088,7 | 4,313 | 338,3 | 6,51 | 513,1 | 7,04 | 75,02  | 8,17  | 21,26 | 622,878   | 1,49 | W 250 x 80,0 (H)   |
| HP 250 x 85,0 (H)  | 85,0  | 254 | 260 | 14,4 | 14,4 | 225 | 201 | 108,5 | 12,280 | 966,9   | 10,84 | 1,093,2 | 4,325 | 325,0 | 6,24 | 499,6 | 7,00 | 82,07  | 9,03  | 12,97 | 605,403   | 1,50 | HP 250 x 85,0 (H)  |
| W 250 x 89,0 (H)   | 89,0  | 260 | 256 | 10,7 | 17,3 | 225 | 201 | 113,9 | 14,237 | 1,095,1 | 11,18 | 1,224,4 | 4,841 | 378,2 | 6,52 | 574,3 | 7,06 | 102,81 | 7,40  | 18,82 | 712,351   | 1,50 | W 250 x 89,0 (H)   |
| W 250 x 101,0 (H)  | 101,0 | 264 | 257 | 11,9 | 19,8 | 225 | 201 | 128,7 | 16,352 | 1,238,8 | 11,27 | 1,396,0 | 5,549 | 431,8 | 6,57 | 656,3 | 7,10 | 147,70 | 6,56  | 16,87 | 828,031   | 1,51 | W 250 x 101,0 (H)  |
| W 250 x 115,0 (H)  | 115,0 | 260 | 259 | 13,5 | 22,1 | 225 | 201 | 146,1 | 18,020 | 1,406,7 | 11,30 | 1,597,4 | 6,405 | 484,6 | 6,62 | 752,7 | 7,16 | 212,00 | 5,86  | 14,87 | 975,205   | 1,53 | W 250 x 115,0 (H)  |
| W 310 x 21,0       | 21,0  | 303 | 101 | 5,1  | 5,7  | 292 | 272 | 27,2  | 3,776  | 249,2   | 11,77 | 291,9   | 98    | 19,5  | 1,90 | 31,4  | 2,42 | 3,27   | 8,89  | 53,25 | 21,628    | 0,98 | W 310 x 21,0       |
| W 310 x 23,8       | 23,8  | 305 | 101 | 5,6  | 6,7  | 292 | 272 | 30,7  | 4,346  | 285,0   | 11,80 | 333,2   | 116   | 22,9  | 1,94 | 36,9  | 2,45 | 4,85   | 7,54  | 48,50 | 25,594    | 0,99 | W 310 x 23,8       |
| W 310 x 28,3       | 28,3  | 309 | 102 | 6,0  | 8,9  | 291 | 271 | 36,5  | 5,590  | 356,0   | 12,28 | 412,0   | 158   | 31,0  | 2,08 | 49,4  | 2,55 | 8,14   | 5,73  | 45,26 | 35,441    | 1,00 | W 310 x 28,3       |
| W 310 x 32,7       | 32,7  | 313 | 102 | 6,6  | 10,8 | 291 | 271 | 42,1  | 6,570  | 419,8   | 12,40 | 485,3   | 192   | 37,6  | 2,13 | 59,8  | 2,58 | 12,91  | 4,72  | 41,12 | 43,242    | 1,00 | W 310 x 32,7       |
| W 310 x 38,7       | 38,7  | 310 | 165 | 5,8  | 9,7  | 291 | 271 | 49,7  | 8,581  | 553,6   | 13,14 | 615,4   | 257   | 48,1  | 3,02 | 134,9 | 4,38 | 13,20  | 8,51  | 46,66 | 163,728   | 1,25 | W 310 x 38,7       |
| W 310 x 44,5       | 44,5  | 313 | 166 | 6,6  | 11,2 | 291 | 271 | 57,2  | 9,997  | 638,8   | 13,22 | 712,8   | 355   | 59,3  | 3,07 | 158,0 | 4,41 | 19,90  | 7,41  | 41,00 | 194,433   | 1,26 | W 310 x 44,5       |
| W 310 x 52,0       | 52,0  | 317 | 167 | 7,6  | 13,2 | 291 | 271 | 67,0  | 11,969 | 751,4   | 13,33 | 883,3   | 456   | 72,9  | 3,19 | 188,8 | 4,45 | 31,81  | 6,33  | 35,01 | 238,422   | 1,27 | W 310 x 52,0       |
| HP 310 x 79,0 (H)  | 79,0  | 299 | 306 | 11,0 | 11,0 | 277 | 245 | 100,0 | 16,316 | 1,091,3 | 12,77 | 1,210,1 | 5,528 | 343,7 | 7,25 | 525,4 | 8,20 | 46,72  | 13,91 | 22,27 | 1,089,256 | 1,77 | HP 310 x 79,0 (H)  |
| HP 310 x 93,0 (H)  | 93,0  | 303 | 308 | 13,1 | 13,1 | 277 | 245 | 119,2 | 19,682 | 1,299,1 | 12,85 | 1,450,3 | 6,387 | 414,7 | 7,32 | 635,5 | 8,26 | 77,33  | 11,76 | 18,69 | 1,340,320 | 1,78 | HP 310 x 93,0 (H)  |
| W 310 x 97,0 (H)   | 97,0  | 308 | 305 | 9,9  | 15,4 | 277 | 245 | 123,6 | 22,284 | 1,447,0 | 13,43 | 1,594,2 | 7,286 | 477,8 | 7,68 | 725,0 | 8,38 | 92,12  | 9,90  | 24,77 | 1,558,602 | 1,79 | W 310 x 97,0 (H)   |
| W 310 x 107,0 (H)  | 107,0 | 311 | 306 | 10,9 | 17,6 | 277 | 245 | 136,4 | 24,839 | 1,597,3 | 13,49 | 1,768,2 | 8,123 | 530,9 | 7,72 | 806,1 | 8,41 | 122,86 | 9,00  | 22,48 | 1,754,271 | 1,80 | W 310 x 107,0 (H)  |
| HP 310 x 119,0 (H) | 119,0 | 308 | 310 | 15,4 | 15,5 | 277 | 245 | 141,0 | 23,703 | 1,539,1 | 12,97 | 1,730,6 | 7,707 | 497,3 | 7,30 | 763,7 | 8,33 | 125,66 | 10,00 | 15,91 | 1,646,104 | 1,80 | HP 310 x 119,0 (H) |
| W 310 x 117,0 (H)  | 117,0 | 314 | 307 | 11,9 | 18,7 | 277 | 245 | 149,9 | 27,583 | 1,755,6 | 13,96 | 1,952,6 | 9,024 | 587,9 | 7,76 | 893,1 | 8,44 | 161,61 | 8,21  | 25,55 | 1,965,950 | 1,80 | W 310 x 117,0 (H)  |
| HP 310 x 125,0 (H) | 125,0 | 312 | 312 | 17,4 | 17,4 | 277 | 245 | 159,0 | 27,676 | 1,735,6 | 13,95 | 1,963,3 | 8,823 | 565,6 | 7,45 | 870,6 | 8,38 | 177,58 | 8,97  | 14,09 | 1,911,025 | 1,81 | HP 310 x 125,0 (H) |
| W 360 x 32,9       | 32,9  | 346 | 127 | 5,8  | 8,5  | 332 | 308 | 42,1  | 8,358  | 479,0   | 14,09 | 547,6   | 291   | 45,9  | 2,03 | 72,0  | 3,20 | 9,15   | 7,47  | 53,15 | 84,911    | 1,17 | W 360 x 32,9       |
| W 360 x 39,0       | 39,0  | 353 | 128 | 6,5  | 10,7 | 332 | 308 | 50,2  | 10,331 | 585,3   | 14,36 | 667,7   | 375   | 58,6  | 2,73 | 91,9  | 3,27 | 15,83  | 5,98  | 47,37 | 109,251   | 1,18 | W 360 x 39,0       |
| W 360 x 44,0       | 44,0  | 352 | 171 | 6,9  | 9,8  | 332 | 308 | 57,7  | 12,258 | 696,5   | 14,58 | 794,3   | 818   | 95,7  | 3,77 | 148,0 | 4,43 | 16,70  | 8,72  | 44,76 | 239,091   | 1,25 | W 360 x 44,0       |
| W 360 x 51,0       | 51,0  | 355 | 171 | 7,2  | 11,6 | 332 | 308 | 64,8  | 14,222 | 801,3   | 14,81 | 894,5   | 968   | 113,3 | 3,87 | 174,7 | 4,49 | 24,85  | 7,37  | 44,75 | 289,594   | 1,26 | W 360 x 51,0       |
| W 360 x 57,8       | 57,8  | 358 | 172 | 7,9  | 13,1 | 332 | 308 | 72,5  | 16,143 | 901,8   | 14,92 | 1,014,8 | 1,113 | 129,4 | 3,92 | 199,8 | 4,53 | 34,45  | 6,56  | 38,96 | 330,394   | 1,27 | W 360 x 57,8       |
| W 360 x 64,0       | 64,0  | 347 | 263 | 7,7  | 13,5 | 320 | 288 | 81,7  | 17,890 | 1,031,1 | 14,80 | 1,145,5 | 1,185 | 185,7 | 4,80 | 284,5 | 5,44 | 44,57  | 7,32  | 37,40 | 523,362   | 1,46 | W 360 x 64,0       |
| W 360 x 72,0       | 72,0  | 350 | 264 | 8,6  | 15,1 | 320 | 288 | 91,3  | 20,169 | 1,152,5 | 14,86 | 1,285,9 | 2,140 | 209,8 | 4,84 | 321,8 | 5,47 | 61,18  | 6,75  | 33,47 | 596,082   | 1,47 | W 360 x 72,0       |
| W 360 x 79,0       | 79,0  | 354 | 265 | 9,4  | 16,8 | 320 | 288 | 101,2 | 22,713 | 1,283,2 | 14,96 | 1,437,0 | 2,416 | 235,7 | 4,89 | 361,9 | 5,51 | 82,41  | 6,10  | 30,68 | 685,701   | 1,48 | W 360 x 79,0       |
| W 360 x 91,0 (H)   | 91,0  | 353 | 254 | 9,5  | 16,4 | 320 | 288 | 115,9 | 26,755 | 1,515,9 | 15,19 | 1,680,1 | 4,483 | 353,0 | 6,22 | 538,1 | 6,90 | 92,61  | 7,74  | 30,34 | 1,268,709 | 1,68 | W 360 x 91,0 (H)   |
| W 360 x 101,0 (H)  | 101,0 | 357 | 255 | 10,5 | 18,3 | 320 | 288 | 129,5 | 30,279 | 1,696,3 | 15,29 | 1,888,9 | 5,063 | 397,1 | 6,25 | 606,1 | 6,93 | 128,47 | 6,97  | 27,28 | 1,450,410 | 1,68 | W 360 x 101,0 (H)  |
| W 360 x 110,0 (H)  | 110,0 | 360 | 256 | 11,4 | 19,9 | 320 | 288 | 140,6 | 33,155 | 1,841,9 | 15,36 | 2,059,3 | 5,570 | 435,2 | 6,29 | 684,5 | 6,96 | 161,93 | 6,43  | 25,28 | 1,609,070 | 1,69 | W 360 x 110,0 (H)  |
| W 360 x 122,0 (H)  | 122,0 | 363 | 257 | 13,0 | 21,7 | 320 | 288 | 155,3 | 36,589 | 2,016,5 | 15,35 | 2,269,8 | 6,147 | 478,4 | 6,29 | 732,4 | 6,98 | 212,70 | 5,92  | 22,12 | 1,787,806 | 1,70 | W 360 x 122,0 (H)  |
| W 410 x 38,8       | 38,8  | 399 | 140 | 6,4  | 8,8  | 381 | 357 | 50,3  | 12,777 | 640,5   | 15,94 | 736,8   | 494   | 57,7  | 2,83 | 90,9  | 3,49 | 11,69  | 7,95  | 55,84 | 153,190   | 1,32 | W 410 x 38,8       |
| W 410 x 46,1       | 46,1  | 403 | 140 | 7,0  | 11,2 | 381 | 357 | 59,2  | 15,690 | 778,7   | 16,27 | 891,1   | 514   | 73,4  | 2,95 | 115,2 | 3,55 | 20,06  | 6,25  | 50,94 | 196,571   | 1,33 | W 410 x 46,1       |
| W 410 x 53,0       | 53,0  | 403 | 177 | 7,5  | 10,9 | 381 | 357 | 68,4  | 18,734 | 929,7   | 16,55 | 1,052,2 | 1,008 | 114,0 | 3,84 | 178,9 | 4,56 | 23,38  | 8,12  | 47,63 | 387,194   | 1,48 | W 410 x 53,0       |
| W 410 x 60,0       | 60,0  | 407 | 178 | 7,7  | 12,8 | 381 | 357 | 78,0  | 21,707 | 1,066,7 | 16,88 | 1,201,5 | 1,205 | 135,4 | 3,98 | 209,2 | 4,65 | 33,78  | 6,95  | 46,42 | 467,404   | 1,49 | W 410 x 60,0       |
| W 410 x 67,0       | 67,0  | 410 | 179 | 8,8  | 14,4 | 381 | 357 | 86,3  | 24,878 | 1,203,8 | 16,91 | 1,362,7 | 1,379 | 154,1 | 4,00 | 239,0 | 4,67 | 48,11  | 6,22  | 40,59 | 538,546   | 1,50 | W 410 x 67,0       |
| W 410 x 75         |       |     |     |      |      |     |     |       |        |         |       |         |       |       |      |       |      |        |       |       |           |      |                    |