



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Guilherme Domingos Póvoas

**Análise e dimensionamento de galpão industrial com pórticos em perfis  
metálicos de alma cheia**

Florianópolis  
2024

**Análise e dimensionamento de galpão industrial com pórticos em perfis metálicos de alma cheia**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador(a): Prof. Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr.

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Póvoas, Guilherme Domingos  
Análise e dimensionamento de galpão industrial com  
pórticos em perfis metálicos de alma cheia / Guilherme  
Domingos Póvoas ; orientador, Leandro Fleck Fadel Miguel,  
2024.

117 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro  
Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis,  
2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Dimensionamento estrutural. 3.  
Aço. 4. Estruturas metálicas. 5. Galpão industrial. I.  
Miguel, Leandro Fleck Fadel. II. Universidade Federal de  
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III.  
Titulo.

Guilherme Domingos Póvoas

**Análise e dimensionamento de galpão industrial com pórticos em perfis metálicos de alma cheia**

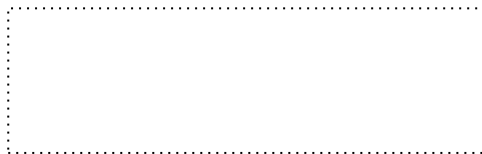
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 11 de setembro de 2024.



Coordenação do Curso

**Banca examinadora**



Prof. Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr.

Orientador

Prof. Jano d'Araújo Coelho, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

David Guillermo Esteche Pedrozo, MSc.  
Nova Engevix Engenharia e Projetos

Florianópolis, 2024.

## AGRADECIMENTOS

O ato de gratidão é um dos maiores sentimentos que o ser humano pode ter. Nele está incluso o ato de reflexão e reconhecimento perante pessoas próximas, trazendo ainda mais afinidades e conexões entre as partes.

Primeiramente, gostaria de agradecer meus pais, Márcio e Jacqueline, por serem minhas referências, terem me proporcionado a vida e toda base sólida para alcançar meus objetivos, além de muito amor e carinho. Minha irmã, Camilla, que nunca mediu esforços para cuidar de mim e proteger. Minha namorada e dupla de vida, Brenda Luiza, que consegue trazer felicidade, amor e cuidado incansavelmente, fazendo com que eu me sinta acolhido e motivado, permitindo que eu leve a vida de forma mais leve.

Agradeço à minha avó materna, Matilde, e aos meus avós paternos, Luiz Alberto e Vera Lúcia, sou eternamente grato por poder compartilhar a vida próximo a vocês. Todo apoio, amor e carinho me fazem sentir o privilégio de tê-los como se fossem meus pais.

Aos amigos e colegas que caminharam junto durante a faculdade sempre agregando conhecimento.

Aos professores que tive durante a graduação, que sempre abriram portas para o conhecimento de forma objetiva e mantiveram o nível do curso elevado.

Ao meu professor e orientador, Dr. Leandro Fleck Fadel Miguel, que com sua excelente didática me fez ter interesse em estudar além sobre outro tipo de concepção estrutural. Agradeço também o tempo empregado para me orientar neste trabalho.

À banca formada, agradeço o tempo gasto para leitura e análise deste presente trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por proporcionar um ambiente com estrutura e profissionais dedicados a transmitir conhecimento em alto nível.

Àqueles que não foram citados individualmente, expresso minha gratidão por entrarem em minha vida para trazer conhecimento e por agregarem no meu crescimento pessoal e profissional.

## RESUMO

A relevância dos galpões metálicos industriais é manifestada na sua capacidade de atender à crescente demanda por soluções eficientes de armazenamento e produção. Esses galpões desempenham um papel crucial na logística e nas operações industriais, fornecendo uma base robusta para o crescimento econômico e o desenvolvimento de diversas indústrias. Além disso, a eficiência na construção e o custo-benefício dos galpões metálicos os tornam uma solução atraente para uma ampla gama de projetos industriais.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento estrutural e dimensionar um galpão industrial em estrutura metálica, conforme os procedimentos e requisitos de carregamento estabelecidos pelas normas técnicas. Para a análise dos carregamentos de vento, a ABNT NBR 6123 (2023) especifica os critérios de carga de vento baseados nas características geométricas da estrutura, na localização e na finalidade da edificação. Após a definição dos carregamentos, a estrutura é validada segundo a ABNT NBR 8800 (2008), que estabelece os procedimentos de cálculo e os limites de deslocamento a serem verificados.

A utilização de softwares comerciais amplamente adotados comercialmente possibilita uma modelagem e análise mais ágeis e dinâmicas, desde que estas sejam feitas corretamente, permitindo a visualização detalhada do comportamento estrutural e a obtenção de dados sobre esforços e deslocamentos.

Com o pórtico dimensionado e verificado, procede-se à modelagem tridimensional (3D) para analisar o comportamento global da estrutura e avaliar seus deslocamentos na direção longitudinal.

**Palavras-chave:** Galpão industrial; Galpão metálico; Estruturas metálicas; Aço industrial; NBR 6123; NBR 8800.

## ABSTRACT

The importance of industrial warehouses steel-constructed is underscored by their capacity to address the growing demand for efficient storage and production solutions. These facilities are pivotal in logistics and industrial operations, offering a solid foundation for economic growth and the advancement of various sectors. Additionally, the efficiency and cost-effectiveness associated with steel-constructed warehouses make them a compelling choice for numerous industrial applications.

This study focuses on analyzing the structural performance and dimensioning of an industrial warehouse with a steel framework, adhering to the loading procedures and requirements set forth by technical standards. For wind load assessment, ABNT NBR 6123 (2023) provides criteria based on the structure's geometric properties, its location, and its intended purpose. Once the loads are defined, the structure is validated according to ABNT NBR 8800 (2008), which specifies calculation methodologies and displacement limits for verification.

The application of widely-used commercial software facilitates a more efficient and dynamic modeling and analysis process, provided these tasks are executed accurately. This approach enables detailed visualization of the structural behavior and the precise extraction of data regarding forces and displacements.

After dimensioning and validating the portal frame, a three-dimensional model is developed to evaluate the overall structural behavior and assess longitudinal displacements.

**Keywords:** Industrial warehouse; Steel-constructed warehouse; Steel structures; Industrial steel; NBR 6123; NBR 8800.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de laminação do aço.....	23
Figura 2 – Perfis laminados produzidos no Brasil.....	24
Figura 3 – Perfis soldados.....	25
Figura 4 – Partes componentes do galpão metálico.....	26
Figura 5 – Pórtico transversal.....	27
Figura 6 – Contraventamento plano horizontal.....	29
Figura 7 – Contraventamento plano vertical.....	30
Figura 8 – Sistema de tirantes.....	30
Figura 9 – Galpão de duas águas em perfis de alma cheia.....	31
Figura 10 – Galpão de duas águas com colunas em perfil de alma cheia e cobertura em tesoura treliçada.....	31
Figura 11 – Galpão de duas águas em perfis de alma cheia com ponte rolante.....	31
Figura 12 – Galpão de duas águas com colunas mistas.....	32
Figura 13 – Galpão geminado com duas meias-águas.....	32
Figura 14 – Galpão geminado com quatro meias-águas.....	32
Figura 15 – Galpão geminado com meias-águas no sentido transversal.....	33
Figura 16 – Galpão do tipo Shed.....	33
Figura 17 – Galpão em arco.....	33
Figura 18 – Isopletras de velocidade básica $V_0$ .....	48
Figura 19 – Variações do fator topográfico $S_1$ .....	50
Figura 20 – Pórtico transversal.....	54
Figura 21 – Modelo 3D do galpão.....	55
Figura 22 – $C_{pe}$ nas paredes.....	56
Figura 23 – $C_{pe}$ nos telhados.....	57
Figura 24 – Esforços lineares nos pórticos.....	57
Figura 25 – Ábaco de pré-dimensionamento para $H=9$ m.....	61
Figura 26 – Esquema de tirantes X da cobertura.....	67
Figura 27 – Esquema de tirantes X na vertical.....	67
Figura 28 – Esquema de tirantes Y da cobertura.....	68
Figura 29 – Esquema de tirantes Y na vertical.....	68
Figura 30 – Pontos de análise de deslocamento.....	71



Figura 31 – Modelo 3D com envoltória de deslocamento nos pórticos de análise. ....	74
Figura 32 – Cortante x. ....	95
Figura 33 – Cortante y. ....	95
Figura 34 – Momento fletor x. ....	95
Figura 35 – Momento fletor y. ....	96
Figura 36 – Cortante x. ....	96
Figura 37 – Cortante y. ....	96
Figura 38 – Momento fletor x. ....	97
Figura 39 – Momento fletor y. ....	97
Figura 40 – Cortante x. ....	97
Figura 41 – Cortante y. ....	98
Figura 42 – Momento fletor x. ....	98
Figura 43 – Momento fletor y. ....	98
Figura 44 – Cortante x. ....	103
Figura 45 – Cortante y. ....	103
Figura 46 – Momento fletor x. ....	103
Figura 47 – Momento fletor y. ....	104
Figura 48 – Cortante x. ....	104
Figura 49 – Cortante y. ....	104
Figura 50 – Momento fletor x. ....	105
Figura 51 – Momento fletor y. ....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do aço.....	22
Tabela 2 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações $\gamma_g$ e $\gamma_q$ .....	36
Tabela 3 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações $\gamma_f2$ . .....	36
Tabela 4 – Propriedades mecânicas dos aços para conectores. ....	46
Tabela 5 – Grupos para fator $S_3$ . .....	52
Tabela 6 – Sobrecarga permanente. ....	58
Tabela 7 – Comparativo de deslocamentos. ....	62
Tabela 8 – Esforços nos pilares .....	62
Tabela 9 – Esforços nas vigas.....	63
Tabela 10 – Combinações terças .....	64
Tabela 11 – Combinações vigas de tapamento.....	66
Tabela 12 – Tirantes X. ....	67
Tabela 13 – Tirantes Y. ....	69
Tabela 14 – Escoras.....	69
Tabela 15 – Ligações parafusadas.....	70
Tabela 16 – Maiores deslocamentos ELU .....	71
Tabela 17 – Maiores deslocamentos ELS. ....	72
Tabela 18 – Maiores deslocamentos ELS. ....	73
Tabela 19 – Quantitativo de aço.....	76
Tabela 20 – Perfil I.....	112
Tabela 21 – Perfil U.....	113
Tabela 22 – Barra redonda.....	113
Tabela 23 – Parafusos de alta resistência.....	113
Tabela 24 – Telhas metálicas.....	114
Tabela 25 – Carregamento de vento nos pórticos.....	115

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$A_g$	Área bruta da seção transversal
$A_e$	Área líquida efetiva da seção transversal
$A_n$	Área líquida da barra
$A_{inf}$	Área de influência
$b_f$	Largura da mesa
$bm$	Parâmetro meteorológico
$C_e$	Coefficiente de forma
$C_w$	Constante de empenamento
$C_{pe}$	Coefficiente de pressão externa
$C_{pi}$	Coefficiente de pressão interna
$db$	Diâmetro do parafuso
$dt$	Diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro
$E$	Módulo de elasticidade
$FG_{i,k}$	Esforços solicitantes característicos permanentes
$FQ_{1,k}$	Esforços solicitantes característicos acidentais principais
$FQ_{j,k}$	Esforços solicitantes característicos acidentais
$Fr$	Fator de rajada
$f_y$	Resistência ao escoamento
$f_u$	Resistência à ruptura
$G$	Módulo de elasticidade transversal
$I_x$	Momento de inércia em relação ao eixo x
$I_y$	Momento de inércia em relação ao eixo y
$J$	Momento de inércia à torção

$Kx * Lx$	Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo x
$Ky * Ly$	Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo y
$Kz * Lz$	Comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo z
$Lb$	Comprimento destravado
$lc$	Distância livre, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda da parte ligada nas chapas de Gusset
$Mpl$	Momento fletor de plastificação
$MRd$	Momento fletor resistente de projeto
$MSd$	Momento fletor solicitante de projeto
$MRd,x$	Momento fletor resistente de projeto em relação ao eixo x
$MSd,x$	Momento fletor solicitante de projeto em relação ao eixo x
$MRd,y$	Momento fletor resistente de projeto em relação ao eixo y
$MSd,y$	Momento fletor solicitante de projeto em relação ao eixo y
$Nc,Rd$	Força axial resistente de compressão de projeto
$Nc,Sd$	Força axial solicitante de compressão de projeto
$Nt,Rd$	Força axial resistente de tração de projeto
$Nt,Sd$	Força axial solicitante de tração de projeto
$p$	Função da rugosidade do terreno e intervalo de tempo
$q$	Pressão dinâmica do vento
$rx$	Raio de giração em relação ao eixo x
$ry$	Raio de giração em relação ao eixo y
$r0$	Raio de giração polar da seção bruta em relação ao eixo de cisalhamento
$S1$	Fator topográfico

$S1(z)$	Fator topográfico em função da altura acima do nível médio do terreno
$S2$	Fator de rugosidade
$S3$	Fator estatístico
$Q$	Fator de redução total associado à flambagem local
$Qa$	Fator de redução associado à flambagem local da alma
$Qs$	Fator de redução associado à flambagem local da base
$Tp$	Período de retorno
$t$	Espessura da parte ligada nas chapas de Gusset
$tf$	Espessura da mesa
$tw$	Espessura da alma
$Vk$	Velocidade característica do vento
$V0$	Velocidade básica do vento
$Vpl$	Esforço cortante de plastificação
$VRd$	Esforço cortante resistente
$VSd$	Esforço cortante solicitante
$VRd,x$	Esforço cortante resistente paralelo ao eixo x
$VSd,x$	Esforço cortante solicitante paralelo ao eixo x
$VRd,y$	Esforço cortante resistente paralelo ao eixo y
$VSd,y$	Esforço cortante solicitante paralelo ao eixo y
$W$	Módulo de resistência elástico mínimo
$Wx$	Módulo de resistência elástico em relação ao eixo x
$Wy$	Módulo de resistência elástico em relação ao eixo y
$z$	Altura acima do nível médio do terreno
$Zx$	Módulo plástico em relação ao eixo x
$Zy$	Módulo plástico em relação ao eixo y

$\Delta p$	Pressão efetiva
$\Delta p_e$	Pressão efetiva externa
$\Delta p_i$	Pressão efetiva interna
$\gamma$	Coefficiente de majoração
$\lambda$	Índice de esbeltez
$\lambda_r$	Índice de esbeltez de plastificação
$\lambda_p$	Índice de esbeltez de escoamento
$\lambda_0$	Índice de esbeltez reduzido
$\theta_t$	Inclinação média do talude ou encosta do morro
$\psi_{0j}$	Coefficiente de ponderação das ações acidentais
$\psi_1$	Coefficiente de ponderação das ações acidentais
$\psi_2$	Coefficiente de ponderação das ações acidentais
$\chi$	Fator de redução associado à compressão

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1	OBJETIVOS .....	19
1.1.1	<b>Objetivos gerais</b> .....	<b>19</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>19</b>
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
1.2.1	<b>Limitações do trabalho</b> .....	<b>20</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
2.1	AÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	21
2.1.1	<b>Propriedades</b> .....	<b>21</b>
2.1.2	<b>Classificação dos tipos de aços estruturais</b> .....	<b>22</b>
2.1.2.1	<i>Aço carbono</i> .....	22
2.1.2.2	<i>Aços de baixa liga, alta resistência e patináveis</i> .....	22
2.1.3	<b>Perfis laminados</b> .....	<b>23</b>
2.1.4	<b>Perfis soldados</b> .....	<b>24</b>
2.2	GALPÃO METÁLICO DE USO GERAL .....	25
2.2.1	<b>Elementos que compõem um galpão metálico</b> .....	<b>25</b>
2.2.1.1	<i>Pórticos Transversais</i> .....	27
2.2.1.2	<i>Terças</i> .....	28
2.2.1.3	<i>Escoras de compressão</i> .....	28
2.2.1.4	<i>Vigas de tapamento</i> .....	28
2.2.1.5	<i>Contraventamento</i> .....	29
2.2.1.6	<i>Telhas metálicas</i> .....	30
2.2.2	<b>Modelos de galpões metálicos</b> .....	<b>30</b>
<b>3.</b>	<b>CRITÉRIOS PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURA METÁLICA</b>	<b>34</b>
3.1	ESTADOS LIMITES .....	34
3.1.1	<b>Estado-limite último (E.L.U)</b> .....	<b>34</b>
3.1.2	<b>Estado-limite de serviço (E.L.S)</b> .....	<b>34</b>
3.2	AÇÕES SOLICITANTES.....	34
3.2.1	<b>Combinações últimas normais</b> .....	<b>37</b>
3.2.2	<b>Combinações de serviço</b> .....	<b>37</b>
3.3	ESTABILIDADE LATERAL .....	38
3.4	DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS .....	38

3.4.1	Classificação quanto à esbeltez das seções transversais .....	38
3.4.2	Barras prismáticas submetidas a esforço axial de tração .....	39
3.4.3	Barras prismáticas submetidas a esforço axial de compressão .....	40
3.4.4	Barras prismáticas submetidas a esforço cortante .....	42
3.4.5	Barras prismáticas submetidas a momento fletor .....	43
3.4.6	Barras redondas com extremidades rosqueadas .....	44
3.4.7	Barras submetidas à combinações de esforços solicitantes .....	45
3.5	DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES .....	45
3.5.1	Ligação parafusada .....	46
3.6	DESLOCAMENTOS LIMITE EM RELAÇÃO AO ELS.....	47
3.7	AÇÃO DO VENTO NA ESTRUTURA .....	47
3.7.1	Velocidade básica do vento ( $V_0$ ) .....	48
3.7.2	Fator topográfico ( $S_1$ ) .....	49
3.7.3	Fator de rugosidade ( $S_2$ ).....	50
3.7.4	Fator estatístico ( $S_3$ ).....	52
3.7.5	Pressão dinâmica ( $q$ ).....	53
3.7.6	Coeficientes de pressão.....	53
4.	APRESENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PROJETO .....	54
4.1	GEOMETRIA DA ESTRUTURA.....	54
4.2	AÇÕES ATUANTES .....	55
4.2.1	Ação do vento .....	55
4.2.2	Ações permanentes e acidentais.....	58
4.2.3	Combinações consideradas.....	59
5.	DIMENSIONAMENTO .....	60
5.1	SOFTWARES PARA ANÁLISE ESTRUTURAL.....	60
5.2	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE MASTAN2 E CYPE 3D .....	61
5.3	PILARES.....	62
5.4	VIGAS DE COBERTURA.....	63
5.5	TERÇAS .....	63
5.6	VIGAS DE TAPAMENTO.....	65
5.7	CONTRAVENTAMENTO .....	66
5.7.1	Tirantes em formato de X .....	66
5.7.2	Tirantes em formato de Y .....	68
5.7.3	Escoras à compressão .....	69



5.8	LIGAÇÕES PARAFUSADAS .....	69
5.8.1	Pressão de contato dos furos .....	70
5.9	DESLOCAMENTOS.....	70
5.9.1	Pórticos.....	70
5.9.2	Terças e vigas de tapamento .....	72
5.9.3	Deslocamentos no modelo 3D .....	73
5.10	CONSUMO DE AÇO.....	75
6.	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>77</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS .....	77
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DOS PILARES .....</b>	<b>80</b>
	<b>APÊNDICE B – DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS.....</b>	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE C – DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES PARAFUSADAS .....</b>	<b>94</b>
	<b>APÊNDICE D – DIMENSIONAMENTO DAS TERÇAS .....</b>	<b>95</b>
	<b>APÊNDICE E – DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS DE TAPAMENTO ..</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE F – DIMENSIONAMENTO DOS CONTRAVENTAMENTOS</b>	<b>107</b>
	<b>APÊNDICE G – CATÁLOGOS .....</b>	<b>112</b>
	<b>APÊNDICE H – PLANILHA DE CARREGAMENTO DE VENTO.....</b>	<b>115</b>
	<b>APÊNDICE I.....</b>	<b>116</b>
	<b>PRANCHAS DE DETALHAMENTOS .....</b>	<b>116</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Galpões em estrutura metálica representam uma solução eficiente para diferentes objetivos. Com sua versatilidade e resistência, essas estruturas têm se destacado como uma escolha popular em projetos de construção civil e industrial. Ao combinar aço e outros materiais (aço galvanizado, patináveis etc.), esses galpões oferecem não apenas excelente durabilidade, mas também a capacidade de serem adaptados a uma ampla gama de usos, desde armazenagem simples até instalações industriais complexas. Este tipo de construção não apenas reduz o tempo de construção, mas também proporciona um ambiente seguro e de baixa manutenção, desde que se use artifícios para proteger as peças, como pinturas e tratamentos superficiais, atendendo às demandas de mercado que estão cada vez mais imediatas, mas ainda sempre buscando por eficiência e sustentabilidade.

Os galpões em estruturas metálicas podem ser definidos como construções em aço geralmente de um único pavimento, constituídos de sistemas estruturais compostos por pórticos regularmente espaçados, com cobertura superior apoiada em sistemas de terças e vigas ou tesouras e treliças, com grandes áreas cobertas e destinadas para uso comercial (lojas, estacionamentos, centros de distribuição, entre outros), uso industrial, agrícola ou outras aplicações (CBCA, 2018).

Estruturas em aço possuem diversas vantagens construtivas, onde em pequenas seções consegue-se um grande suporte a esforços nos diversos estados de tensão (tração, compressão, flexão e combinações entre elas), sendo obtido ainda uma estrutura mais leve, mesmo com sua alta densidade ( $7.850 \text{ kg/m}^3$ ), se comparado ao concreto armado (BELLEI, 1998).

Com o intuito de aprimorar os conhecimentos adquiridos nas disciplinas de Estruturas Metálicas, assim como a motivação de projetar uma estrutura com método construtivo diferente no qual usualmente são focados na graduação e mercado de trabalho (concreto armado, protendido etc.), este trabalho consiste na análise e dimensionamento para a construção de um galpão industrial em estrutura metálica na cidade de Tijucas, Santa Catarina, local com a presença de grandes empresas, tanto industriais como do setor de logística, mas ainda com grande espaço para expansão.

Foram usados, para este presente trabalho, softwares comercialmente utilizados. Os esforços obtidos pelo vento foram obtidos através do software VisualVentos® e validados através de cálculo manual conforme NBR 6123 (1988) e

NBR 6123 (2023) para assim serem inseridos nas análises. Para análise estrutural, inicialmente, foram feitos comparativos de resultados em três softwares distintos, sendo estes Ftool®, Ziemian and W. McGuire. MASTAN2 e Cype3D. Com resultados coerentes entre eles, seguiu-se com a utilização do Ziemian and W. McGuire. MASTAN2 para a retirada de resultados de análise linear e não linear para modelagem 2D dos pórticos, e o Cype3D com resultados de análise linear para modelagem 2D dos pórticos e 3D da estrutura completa, assim como detalhamento dos perfis e ligações, conforme critérios da norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 8800/2008– Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo geral projetar e analisar o desempenho de um galpão industrial de uso geral que estará exposto a esforços de utilização e externos, garantindo ao mesmo tempo segurança, conforto e economia para a construção, papel fundamental do engenheiro na sociedade.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Modelagem de um galpão industrial em estrutura metálica utilizando perfis de alma cheia para os pórticos;
- Definição do layout;
- Obtenção dos esforços de vento e análise conforme NBR 6123/1988 e NBR 6123/2023;
- Inserção dos esforços nos softwares de análise estruturais Ziemian and W. McGuire. MASTAN2 e Cype3D;
- Análise e dimensionamento conforme a NBR 8800/2008;
- Verificação de Estados Limites últimos e Estados Limites de Serviço;
- Análise do comportamento global da estrutura através da modelagem 3D no software Cype3D.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Inicialmente, no Capítulo 2, será abordada uma revisão bibliográfica, detalhando e explicando as propriedades do material utilizado em questão, o aço carbono. No mesmo tópico serão abordados aspectos gerais sobre galpões metálicos e suas diferentes concepções.

Seguindo no Capítulo 3, serão mostrados os critérios para dimensionamentos conforme as normas correspondentes a cada assunto, englobando NBR 8800/2008 para dimensionamento de estruturas metálicas, NBR 6123/1988 e NBR 6123/2023 para ações de vento na estrutura, comparando os resultados extraídos conforme norma de 1988 com a atual de 2023, e analisando as diferenças para este trabalho.

O Capítulo 4 engloba o estudo de caso a ser analisado. É apresentado as características da estrutura e combinações de carregamentos consideradas.

No Capítulo 5 será detalhado como cada elemento foi dimensionado com seus resultados obtidos através dos softwares utilizados para análise estrutural (Ziemian and W. McGuire. MASTAN2 E Cype3D) e software para obtenção dos esforços de vento (VisualVentos®), todos os resultados validados via cálculo planilhado conforme cálculos apresentados nas normas vigentes.

Por fim, o Capítulo 6 engloba a conclusão do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros que envolve a complementação deste trabalho com os tópicos não abordados e destacados no Capítulo 1.2.1.

### 1.2.1 Limitações do trabalho

O trabalho não contemplará:

- Análise e dimensionamento das placas de base;
- Dimensionamento completo das ligações;
- Dimensionamento de fundações;
- Dimensionamento de ligações de terças e vigas de tapamento lateral;
- Dimensionamento e detalhamento do tapamento das extremidades do galpão, onde o estudo de caso considerou as extremidades abertas.
- Otimização da estrutura.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 AÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O aço na construção vem se aprimorando cada vez mais com seu desenvolvimento tecnológico, garantindo um ótimo controle de qualidade dos materiais, tornando a construção mais segura e eficiente. Com a possibilidade do maior controle na produção das peças em indústria, a construção em aço consegue utilizar de peças com seções não tão robustas, se comparadas a outros métodos construtivos, porém extremamente eficazes em versatilidade e desempenho.

De acordo com BELLEI et al. (1998), as primeiras obras em aço para fins estruturais datam em meados do Século XVIII, onde iniciou sua produção industrialmente, na França. No Brasil, a produção iniciou no início do século XIX e teve sua primeira utilização em uma obra de arte no Estado do Rio de Janeiro, a ponte de Paraíba do Sul, em 1857, composta por cinco vãos livres de 30 metros. Seu emprego em edifícios deu-se por volta de fim do século XIX, nos Estados Unidos.

#### 2.1.1 Propriedades

Uma das propriedades mais importantes do aço é sua relação entre resistência e peso de uma peça estrutural, onde consegue-se garantir estruturas eficientes com seções menores, ideal para obras de grande porte, tornando a estrutura mais leve e, conseqüentemente, mais barata, principalmente no quesito fundação, que pode encarecer muito a obra a depender do tipo de solo.

Uma propriedade que deve ser levada em consideração é sua durabilidade no meio inserido. O aço, por possuir ferro na composição, está suscetível à corrosão. Reação esta que reduz de forma considerável sua resistência e, por consequência, capacidade de desempenho estrutural, reduzindo a vida útil da estrutura. Para isso há diversas técnicas de proteção contra corrosão que são utilizadas, como pinturas e galvanização, com o objetivo de mitigar a corrosão, ampliando a vida útil da estrutura.

Para fins de cálculo, a NBR 8800/2008, item 4.5.2.2.1, especifica a adoção de peças estruturais com resistências ao escoamento máximo de 450 MPa e relação entre resistência à ruptura ( $f_u$ ) e ao escoamento ( $f_y$ ) não inferior a 1,18.

O item 4.5.2.9 da NBR 8800/2008 relaciona os valores de propriedades mecânicas do aço para efeito de cálculo, ilustrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades do aço.

Propriedade	
Módulo de elasticidade	$E = E_a = 200.000 \text{ MPa}$
Módulo de elasticidade transversal	$G = 77.000 \text{ MPa}$
Massa específica	$\rho_a = 7.850 \text{ kg/m}^3$
Coefficiente de Poisson	$\nu_a = 0,3$
Coefficiente de dilatação térmica	$\beta = 12 * 10^6 * ^\circ\text{C}^{-1}$

Fonte: NBR 8800 (2008).

### 2.1.2 Classificação dos tipos de aços estruturais

O aço possui, majoritariamente, em sua composição o ferro (98%), com pequenas quantidades de carbono, silício, enxofre, fósforo, manganês etc. Possuem propriedades mecânicas bem definidas, como alta resistência mecânica e ductilidade. (BELLEI, 1998).

Os aços são divididos em aço carbono e aços de baixa liga, com diferentes composições e características próprias, estes serão abordados na sequência em 2.1.2.1 e 2.1.2.2, respectivamente.

#### 2.1.2.1 Aço carbono

Os aços carbono são os mais usuais, onde sua composição não possui grandes variações. O carbono é o elemento que confere maior efeito nas propriedades do aço, porém não se ultrapassam composições maiores que 0,45% para não elevar a dureza e reduzir a ductilidade do material, garantindo ainda uma boa soldabilidade (BELLEI, 1998).

São exemplos de aços carbono: ASTM A36 e A570 e os ABNT NBR 7007, 6648, 6649 e 6650.

#### 2.1.2.2 Aços de baixa liga, alta resistência e patináveis

Os aços de baixa liga, ou aços de alta resistência, possuem composição máxima de carbono em 0,20%, mas possuem elevada resistência por seus elementos

de ligas acrescido em pequena quantidade, como nióbio, cobre, manganês, silício etc (FAKURY, 2016). Com isso, é garantida elevada resistência e ainda boa ductilidade, resultando ainda em boa soldabilidade (BELLEI, 1998).

Exemplos mais usuais são: ASTM A572, A441, e os ABNT NBR 7007, 5000, 5004.

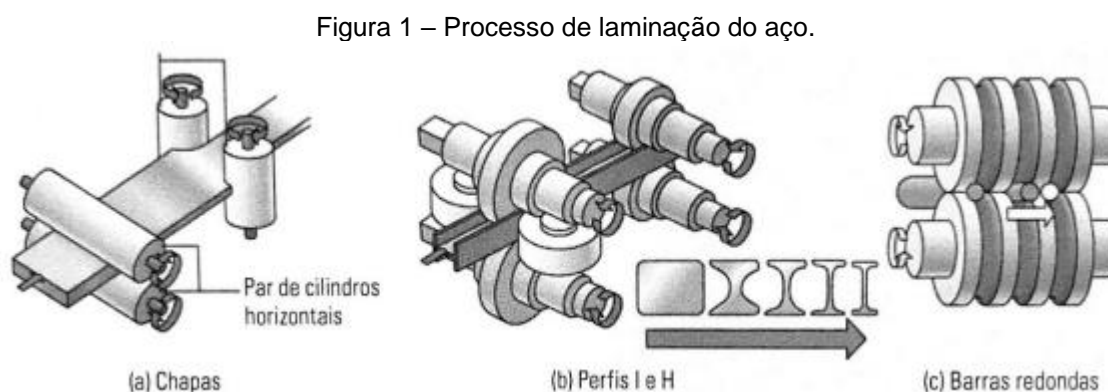
Com uma pequena variação na composição, adicionando elementos como cobre, níquel, cromo, vanádio e alumínio, o aço pode ainda ter sua resistência à corrosão atmosférica aumentada de duas a quatro vezes (BELLEI, 1998).

São chamados de aços de baixa liga e alta resistência mecânica e resistentes à corrosão atmosférica, ou aços patináveis.

Exemplos de aços patináveis são: ASTM A588 e os ABNT NBR 5920, 5921 e 5008.

### 2.1.3 Perfis laminados

Os perfis laminados são produzidos através da laminação a quente, processo este composto pela passagem da placa de aço entre cilindros laminadores que giram em sentido oposto para moldar a estrutura desejada (conforme ilustrado na Figura 1 a seguir), variando as dimensões conforme cada tipo de perfil (FAKURY, 2016).

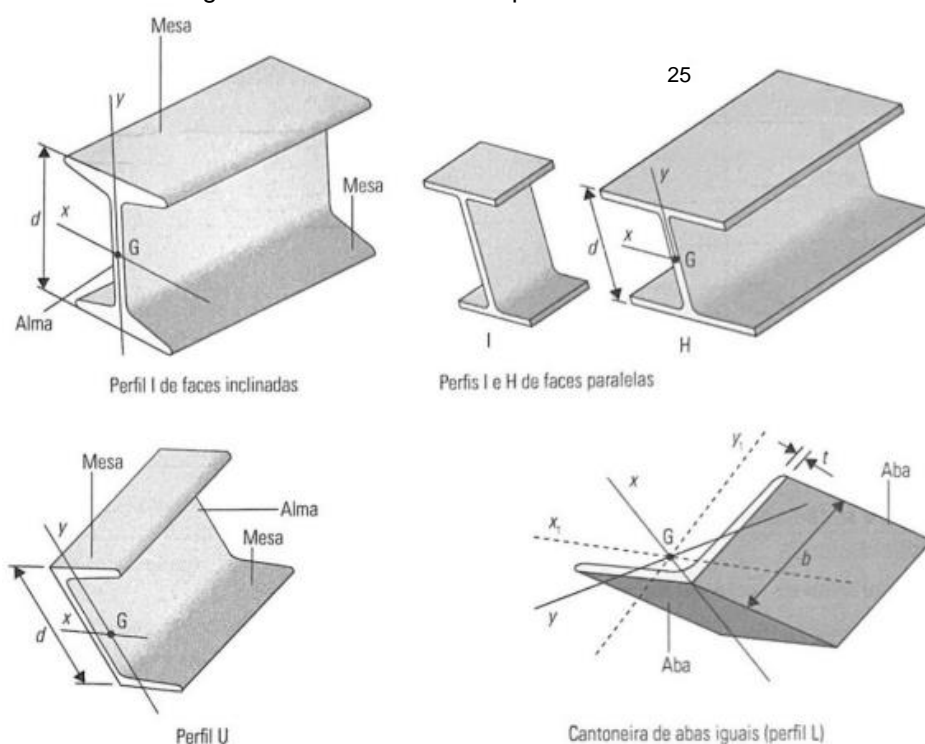


Atualmente no Brasil são produzidos os seguintes tipos de perfis laminados (ilustrados na Figura 2):

- Perfil I de faces inclinadas;
- Perfil I e H de faces paralelas;

- Perfil U e perfil L (cantoneira) de abas iguais.

Figura 2 – Perfis laminados produzidos no Brasil.



Fonte: FAKURY (2016).

#### 2.1.4 Perfis soldados

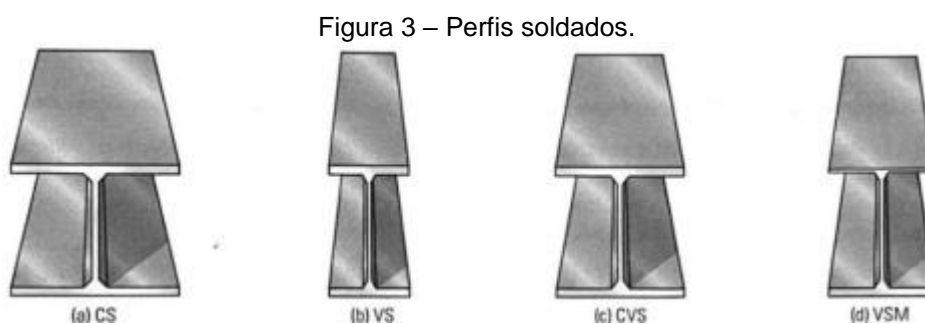
Os perfis soldados são compostos por perfis laminados soldados entre si, por motivos arquitetônicos ou de necessidade de maior robustez.

Os perfis soldados mais comuns no Brasil são os I ou H, formado por três chapas soldadas, de dimensões conforme tamanho do perfil (FAKURY, 2016). A ABNT NBR 5884/2005 prescreve os requisitos de fabricação e divide os perfis em quatro séries de dimensões padronizadas (ilustrado na Figura 3):

- Série CS (colunas soldadas): Perfis H duplamente simétricos, com largura das mesas sempre iguais à altura da seção transversal, variando entre 150 e 750 mm;
- Série VS (vigas soldadas): Perfis I duplamente simétricos, com altura variando entre 150 e 2.000 mm e esta sendo entre uma vez e meia e quatro vezes a largura das mesas;



- c) Série CVS (colunas-vigas soldadas): Perfis intermediários entre I e H duplamente simétricos, com altura entre 150 e 1.000 mm e esta sendo entre uma vez e meia a largura das mesas;
- d) Série VSM (vigas soldadas monossimétricas): Perfis I monossimétricos (mesas com mesma largura, mas espessuras diferentes), com altura entre 150 e 650 mm e esta sendo entre uma e quatro vezes a largura das mesas;



Fonte: FAKURY (2016).

## 2.2 GALPÃO METÁLICO DE USO GERAL

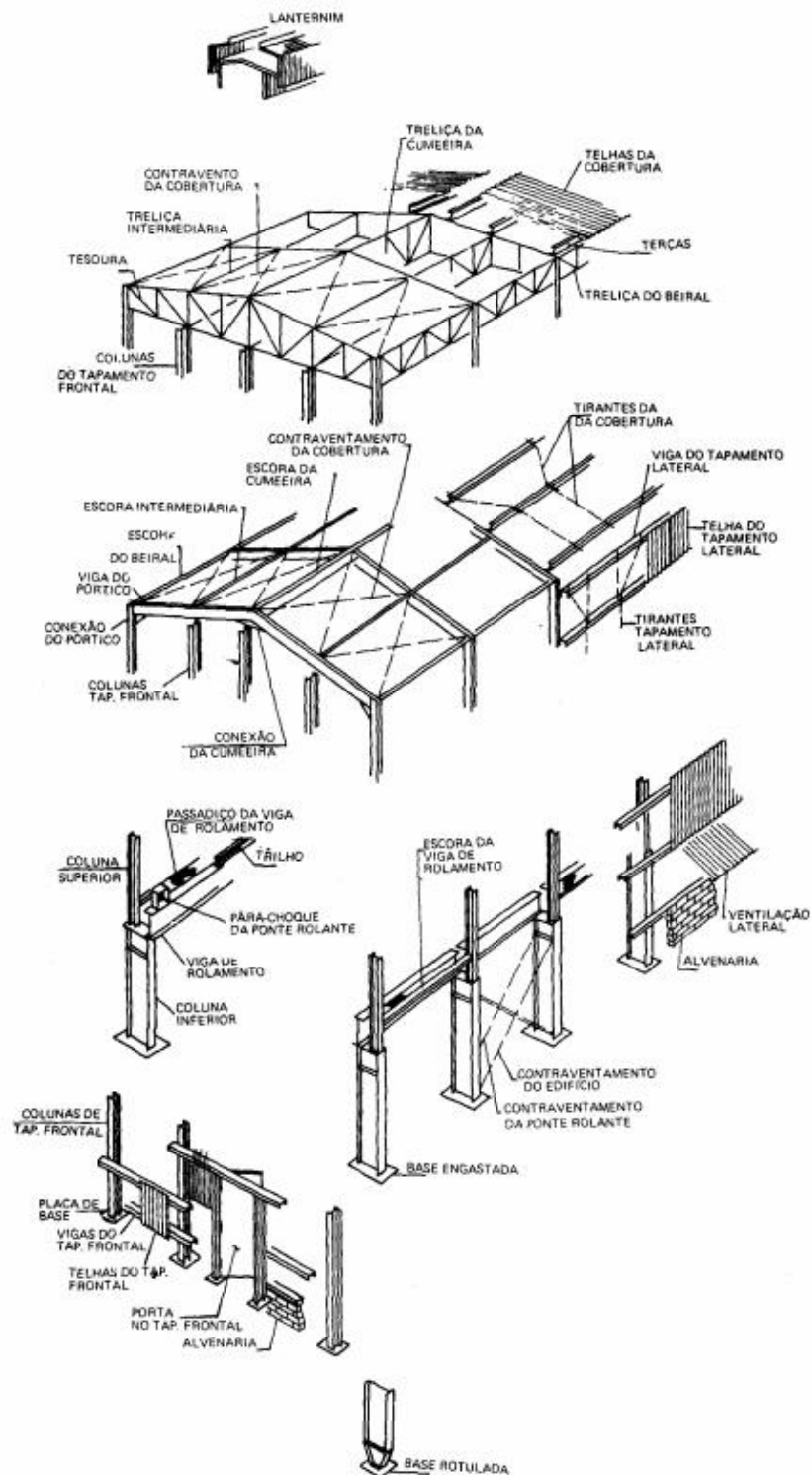
Um galpão em estrutura metálica é composto por peças pré-fabricadas e montadas in-loco, tais peças formam os pilares, vigas e cobertura, que são conectadas por meio de ligações parafusadas e/ou soldadas.

### 2.2.1 Elementos que compõem um galpão metálico

O galpão em estrutura metálica pode ser composto por diferentes concepções, variando desde os perfis utilizados até seu tipo de cobertura, depende de sua necessidade e otimização.

A Figura 4 ilustra variações de elementos que podem compor um galpão em estrutura metálica.

Figura 4 – Partes componentes do galpão metálico.



Fonte: CBCA (2004).

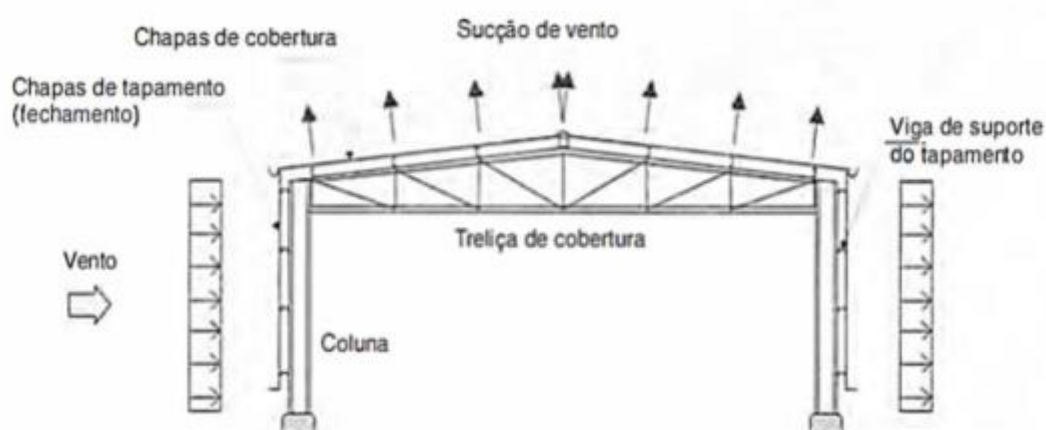
Nos tópicos a seguir, será abordado cada elemento que compõe o galpão separadamente, detalhando suas variações e objetivos estruturais.

## 2.2.1.1 Pórticos Transversais

Os pórticos transversais (Figura 5) são formados por colunas e elementos de cobertura ligados entre si. Tais elementos podem ser projeções de diferentes formas, desde elementos treliçados à perfis de alma cheia.

Estes elementos estruturais trabalham, majoritariamente, para suportar esforços gerados por peso próprio e de utilização, devidamente combinados, e esforços externos, que podem ser bem expressivos, como o do vento. Todos estes esforços são calculados atuando no plano do pórtico.

Figura 5 – Pórtico transversal.



Fonte: PFEIL (2009).

As colunas são responsáveis por levarem os esforços até a fundação. Podem estar sujeitas a solicitações de compressão, tração e flexão combinadas com tração ou compressão (flexotração e flexocompressão).

Além disso, é definida pelo engenheiro o tipo de vinculação que terá com a fundação, podendo ser rotulada ou engastada. A base rotulada trará a necessidade de uma superestrutura mais robusta. Já a base engastada permite transmitir mais momento para a fundação e, com isso, necessitando uma melhor análise do solo para transmissão dos esforços, podendo-se ter uma superestrutura mais econômica (BELLEI, 1998).

Cabe ao engenheiro decidir a concepção, analisando os parâmetros de onde a estrutura será inserida.

Os elementos estruturais da cobertura podem ser compostos por treliças ou perfis de alma cheia, no galpão, deste trabalho em questão, será projetado em perfil de alma cheia. Tais elementos estruturais tem objetivo de suportar os esforços atuantes e transmitir para as colunas.

#### 2.2.1.2 Terças

As terças localizam-se na cobertura ligando um pórtico transversal a outro, com objetivo principal de suportar as chapas de cobertura, sendo estas que determinam o espaçamento das terças.

As peças estão normalmente sujeitas a flexão dupla e, excepcionalmente, flexão simples (BELLEI, 1998). Segundo CBCA (2004), as terças são verificadas à flexão em ambos os eixos do perfil utilizado, e estas não travam o galpão longitudinalmente, sendo este travamento feito por escoras de compressão.

#### 2.2.1.3 Escoras de compressão

As escoras de compressão são elementos que travam os pórticos de esforços de vento no plano longitudinal, que tendem a deslocar o galpão neste mesmo sentido.

Apenas o Manual de construção em aço do Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), 3ª edição de 2004, trata deste elemento com o intuito de travar o deslocamento longitudinal da estrutura, sendo colocados em nós intermediários as terças e espaçados a cada dois elementos de terças, fazendo com que os esforços de compressão sejam transmitidos para as escoras e não para as terças, com as escoras exclusivamente trabalhando a compressão e as terças apenas a flexão.

Neste projeto será considerado a estrutura contraventada em X, no plano vertical e horizontal, e escoras, não considerando terças para tal.

#### 2.2.1.4 Vigas de tapamento

As vigas de tapamento são elementos análogos as terças, ou seja, são calculadas e trabalham da mesma forma. Segundo BELLEI (1998), são calculadas a flexão dupla, onde o eixo de maior inércia é orientado na mesma direção do maior

esforço, que seria o de vento, e o eixo de menor inércia trabalha para suportar peso próprio e fechamento lateral.

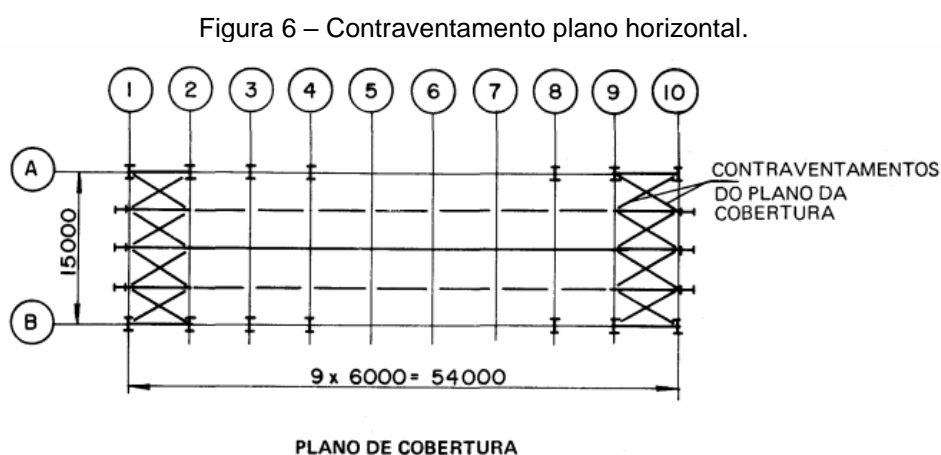
### 2.2.1.5 Contraventamento

Os galpões em estruturas metálicas normalmente possuem elementos de contraventamento com o intuito de estabilizar a estrutura durante sua vida útil e no momento de montagem, especialmente falando. Além da estabilização, o contraventamento atua como travamento, com isso diminui o comprimento de ancoragem das peças (PFEIL, 2009).

Segundo BELLEI (1998), o contraventamento é calculado como tirantes, ou seja, apenas atuando com esforços de tração, mas entende-se que na prática há também esforços de compressão que são desconsiderados para efeito de cálculo, considerando todo o esforço de compressão absorvido pela tração do elemento adicionado na direção ortogonal.

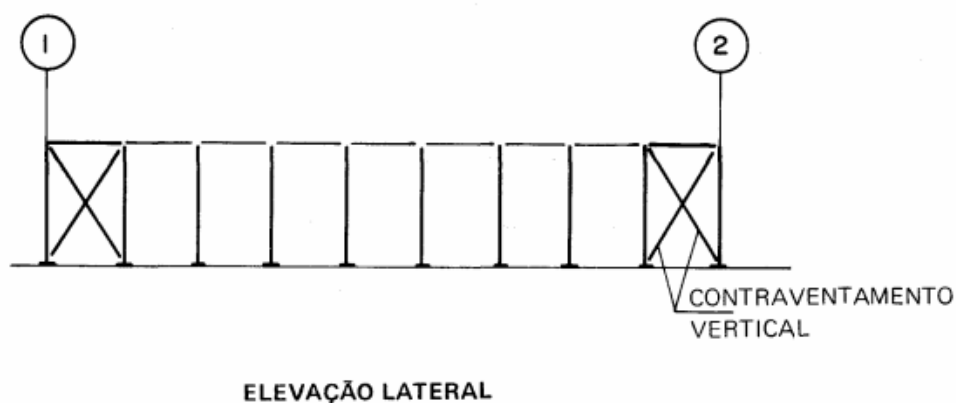
Há dois planos a serem contraventados em galpões, horizontal (Figura 6) e vertical (Figura 7). O plano horizontal compõe o plano das terças e vertical das colunas.

As principais seções usadas são barras rosqueadas (Figura 8), perfil cantoneira, I e duplo U.



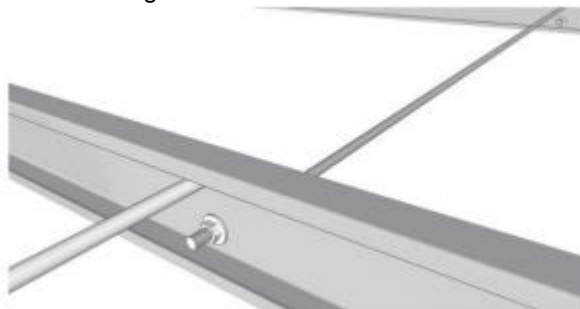
Fonte: CBCA (2004).

Figura 7 – Contraventamento plano vertical.



Fonte: CBCA (2004).

Figura 8 – Sistema de tirantes



Fonte: CBCA (2018).

#### 2.2.1.6 Telhas metálicas

As telhas metálicas têm como objetivo o fechamento e divisão do ambiente interno e externo. Comercialmente há vários catálogos disponíveis com todas suas características necessárias para escolha, sendo o telhamento/fechamento um dos fatores determinantes para definição do espaçamento de terças e vigas de tapamento lateral.

### 2.2.2 Modelos de galpões metálicos

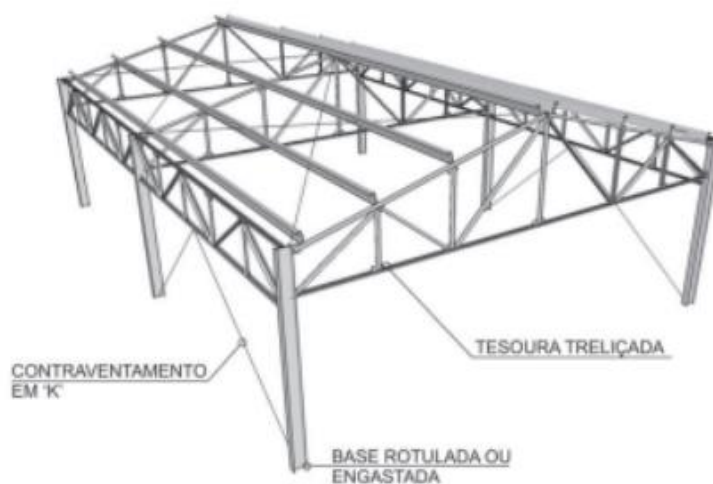
Como dito em 2.2.1, há diversas formas de concepção de um galpão em estrutura metálica. O Manual de Construção em Aço com foco em galpões de uso geral (CBCA, 2018) ilustra algumas opções de concepções possíveis e usadas comercialmente, de acordo com cada demanda. Tais concepções serão ilustradas a seguir:

Figura 9 – Galpão de duas águas em perfis de alma cheia.



Fonte: CBCA (2018).

Figura 10 – Galpão de duas águas com colunas em perfil de alma cheia e cobertura em tesoura treliçada.



Fonte: CBCA (2018).

Figura 11 – Galpão de duas águas em perfis de alma cheia com ponte rolante.



Fonte: CBCA (2018).

Figura 12 – Galpão de duas águas com colunas mistas.



Fonte: CBCA (2018).

Figura 13 – Galpão geminado com duas meias-águas.



Fonte: CBCA (2018).

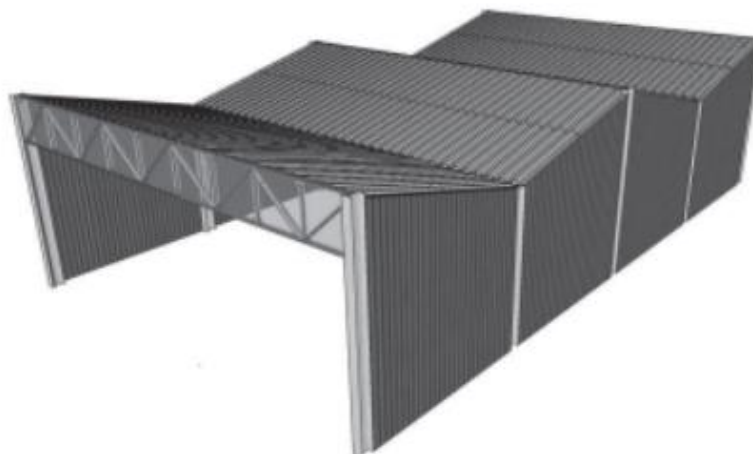
Figura 14 – Galpão geminado com quatro meias-águas.



Fonte: CBCA (2018).

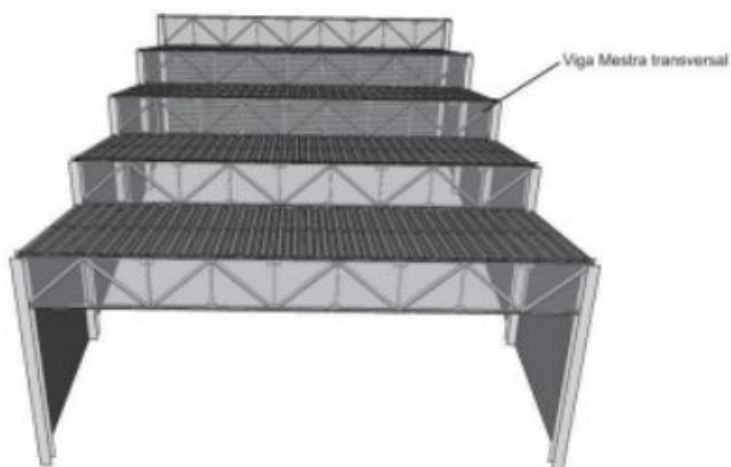


Figura 15 – Galpão geminado com meias-águas no sentido transversal.



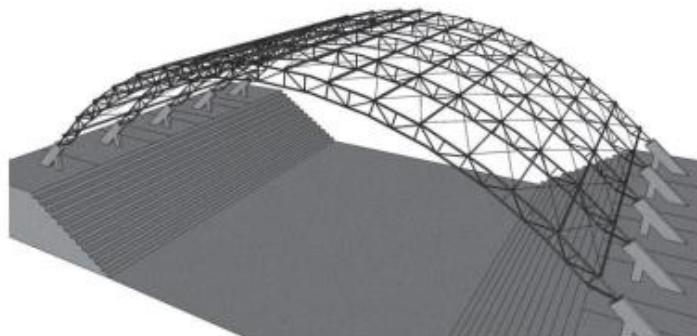
Fonte: CBCA (2018).

Figura 16 – Galpão do tipo Shed.



Fonte: CBCA (2018).

Figura 17 – Galpão em arco.



Fonte: CBCA (2018).

### **3. CRITÉRIOS PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURA METÁLICA**

Neste capítulo serão abordados os critérios para dimensionamento de estruturas metálicas conforme normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

#### **3.1 ESTADOS LIMITES**

Os estados limites são definidos na NBR 8681 quando não atendem seus objetivos estruturais, tais objetivos estão divididos em dois estados: Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS).

##### **3.1.1 Estado-limite último (E.L.U)**

Estado Limite Último refere-se à ocorrência de carregamentos excessivos que podem levar a estrutura ao colapso. Este podendo ocorrer por plastificação total de um elemento estrutural, ruptura de seção ou ligação ou equilíbrio da estrutura como um todo.

##### **3.1.2 Estado-limite de serviço (E.L.S)**

Estado Limite de Serviço refere-se às cargas normais de serviço, que englobam parâmetros de deformações e vibrações excessivas, prejudicando o conforto do usuário e diminuindo a vida útil da estrutura, podendo causar danos à aparência (FAKURY, 2016).

#### **3.2 AÇÕES SOLICITANTES**

Conforme NBR 8681, as ações atuantes podem ser consideradas como permanentes, variáveis e excepcionais.

- Ações permanentes: São ações que atuam praticamente constantes durante a vida útil da estrutura. Carregamentos como peso próprio, paredes e revestimentos são consideradas permanentes.
- Ações variáveis: São ações que ocorrem intermitentemente durante a vida útil da estrutura. Geralmente são cargas acidentais provenientes do uso e ocupação da estrutura, como sobrecargas em pisos e coberturas, divisórias e equipamentos móveis, ações de vento e de temperatura.
- Ações excepcionais: São ações com probabilidade pequena de ocorrência e curta duração durante a vida útil da estrutura. Choque de veículos, incêndios, explosões e sismos são considerados excepcionais.

Segundo a NBR 8800 (2008), as ações devem ser ponderadas pela seguinte Equação (1):

$$\gamma_f = \gamma_{f1} * \gamma_{f2} * \gamma_{f3} \quad (1)$$

Onde:

- $\gamma_{f1}$  é a parcela que considera a variabilidade das ações;
- $\gamma_{f2}$  é a parcela que considera a simultaneidade de atuação das ações;
- $\gamma_{f3}$  é a parcela que considera possíveis erros de avaliação das ações, seja por problemas construtivos ou por deficiência dos métodos de cálculo.

Vale ressaltar que nas Tabela 2 e Tabela 3, o produto  $\gamma_{f1}\gamma_{f3}$  é representado por  $\gamma_g$  ou  $\gamma_q$ . O coeficiente  $\gamma_{f2}$  é igual ao fator de combinação  $\Psi$ .

Tabela 2 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações  $\gamma_g$  e  $\gamma_q$ .

Combinacões	Ações permanentes ( $\gamma_g$ ) <sup>1) 3)</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 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)
	Ações variáveis ( $\gamma_q$ ) <sup>1) 4)</sup>					
	Efeito da temperatura <sup>2)</sup>	Ação do vento	Ações truncadas <sup>5)</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>1)</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>2)</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>3)</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>4)</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>5)</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 (2018).

Tabela 3 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações  $\gamma_{f2}$ .

Ações		$\gamma_{f2}$ <sup>1)</sup>		
		$\psi_0$	$\psi_1$ <sup>4)</sup>	$\psi_2$ <sup>5)</sup>
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas <sup>3)</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>3)</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>1)</sup> Ver alínea c) de 4.7.5.3.

<sup>2)</sup> Edificações residenciais de acesso restrito.

<sup>3)</sup> Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.

<sup>4)</sup> Para estado-limite de fadiga (ver Anexo K), usar  $\psi_1$  igual a 1,0.

<sup>5)</sup> Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, adote-se adotar para  $\psi_2$  o valor zero.

Fonte: NBR 8800 (2018).

### 3.2.1 Combinações últimas normais

Conforme NBR 8800 (2008), as combinações últimas normais devem ser consideradas quantas forem necessárias para verificação das condições de segurança em relação a todos os estados limites últimos. Cada combinação deve conter as ações permanentes e variáveis principais, com valores majorados, e secundárias, com seus valores reduzidos de combinação, seguindo a Equação (2) para todas as combinações:

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

Onde:

- $F_{Gi,k}$  representa valores característicos das ações permanentes;
- $F_{Q1,k}$  representa o valor característico da ação variável principal da combinação;
- $F_{Qj,k}$  representa o valor característico da ação variável secundária da combinação;
- Valores de  $\Psi$  são encontrados na Tabela 3.

### 3.2.2 Combinações de serviço

Conforme a NBR 8800 (2008), as combinações de serviço são classificadas de acordo com sua permanência na estrutura em quase permanentes, frequentes e raras.

A Equação (3) a seguir representa a combinação rara, tal combinação que será usada para fins de cálculo de deslocamento, considerada como pior caso.

$$F_d = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\Psi_{1j} F_{Qj,k}) \quad (3)$$

Onde:

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

- $F_{Q1,k}$  representa o valor característico da ação variável principal da combinação;
- $F_{Qj,k}$  representa o valor característico da ação variável secundária da combinação;
- Valores de  $\Psi$  são encontrados na Tabela 3.

### 3.3 ESTABILIDADE LATERAL

Conforme a NBR 8800 (2008), para efeito de classificação quanto a deslocabilidade da estrutura, a razão entre os deslocamentos obtidos em análise não linear (segunda ordem) e análise linear (primeira ordem) classifica a estrutura em três tipos:

- Pequena deslocabilidade: Razão  $\leq 1,1$  (10%);
- Média deslocabilidade:  $1,1$  (10%)  $<$  Razão  $\leq 1,4$  (40%);
- Grande deslocabilidade: Razão  $> 1,4$  (40%).

### 3.4 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Os seguintes capítulos serão compostos de uma revisão bibliográfica da NBR 8800 (2008) para critérios de dimensionamento dos elementos estruturais.

#### 3.4.1 Classificação quanto à esbeltez das seções transversais

O parâmetro de esbeltez da peça engloba uma razão entre sua largura “b” e “t”, tal razão é chamada de lambda ( $\lambda$ ) que é comparada com os parâmetros  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$ , podendo as seções serem classificadas em:

- Compacta: Seções com  $\lambda \leq \lambda_p$  e mesas ligadas continuamente às almas. São capazes de desenvolver uma distribuição de tensões totalmente plástica com grande rotação antes de iniciar a flambagem local, por essa razão são seções ideais para análises plásticas. Tal

seção necessita de um eixo de simetria no plano do carregamento à flexão, e ser duplamente simétrica quando submetida à compressão;

- Semicompacta: Seções com  $\lambda_r < \lambda \leq \lambda_r$  e um ou mais elementos comprimidos, podendo atingir a resistência de escoamento antes que ocorra a flambagem local;
- Esbelta: Seções com  $\lambda > \lambda_r$  e um ou mais elementos comprimidos flambam em regime elástico.

### 3.4.2 Barras prismáticas submetidas a esforço axial de tração

Para barras prismáticas submetidas à tração, devem ser atendidas as seguintes condições:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (4)$$

Onde:

- $N_{t,Sd}$  : força axial de tração solicitante de cálculo, obtido através das combinações de Estado Limite último, sendo o maior valor entre os resultados;
- $N_{t,Rd}$  : força axial de tração resistente de cálculo, sendo o menor valor obtido na análise do Estado Limite de escoamento da seção bruta (Equação (5)) e da seção líquida (Equação (6)).

- Escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} \leq \frac{A_g * f_y}{\gamma_{a1}} \quad (5)$$

- Escoamento da seção líquida:

$$N_{t,Rd} \leq \frac{A_e * f_u}{\gamma_{a2}} \quad (6)$$

Onde:

- $A_g$ : área bruta da seção transversal da barra;

- $A_e$ : área líquida efetiva da seção transversal da barra conforme o item 5.2.3 da norma;
- $f_y$  : é a resistência ao escoamento do aço;
- $f_u$ : é a resistência à ruptura do aço.
- $\gamma_{a1}$  e  $\gamma_{a2}$  são coeficientes de ponderação encontrados em 4.8.2 da norma, correspondendo, respectivamente, a 1,10 e 1,35;
- Se existirem furos na barra, calcula-se o coeficiente de redução ( $C_t$ ) da área líquida conforme o item 5.2.5 da NBR 8800 (2008). O valor deste coeficiente pode ser 1,0 caso a força de tração seja transmitida diretamente por soldas ou parafuso.

### 3.4.3 Barras prismáticas submetidas a esforço axial de compressão

Para barras prismáticas submetidas à compressão, devem ser atendidas as seguintes condições:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (7)$$

Onde:

- $N_{c,Sd}$  é a força de compressão solicitante de cálculo;
- $N_{c,Rd}$  é a força de compressão resistente de cálculo.

O valor resistente de cálculo à compressão ( $N_{c,Rd}$ ) é dado pela Equação (8):

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi * Q * A_g * f_y}{\gamma_{a1}} \quad (8)$$

Onde:

- $\chi$  é o fator de redução associado à resistência à compressão;
- $Q$  é o fator de redução total associado à flambagem local.

O fator  $Q$  é calculado conforme Anexo F da NBR 8800 (2008), comparando a esbeltez de uma determinada seção com valores de esbeltez limite, equações disponíveis na Tabela F.1. Para seções com valores de esbeltez excedentes a limite, há uma redução do parâmetro  $Q$ , sendo este menor que 1,0.



O fator  $\chi$  é calculado conforme item 5.3.3 da NBR 8800 (2008):

$$\chi = \begin{cases} 0,658\lambda_0^2, & \text{se } \lambda_0 \leq 1,5 \\ \frac{0,877}{\lambda_0^2}, & \text{se } \lambda_0 > 1,5 \end{cases} \quad (9)$$

Onde  $\lambda_0$  representa o índice de esbeltez reduzido, dado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q * A_g * f_y}{N_e}} \quad (10)$$

Onde  $N_e$  é a força axial de flambagem elástica, calculada conforme Anexo E da NBR 8800 (2008). Para seções com dupla simetria, que é o caso das peças componentes deste trabalho, é calculada as forças axiais de flambagem elástica para cada eixo de inércia e tomado o menor valor, tais forças calculadas conforme Equação (11), (12) e (13):

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 * E * I_x}{(K_x * L_x)^2} \quad (11)$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 * E * I_y}{(K_y * L_y)^2} \quad (12)$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} * \left[ \frac{\pi^2 * E * C_w}{(K_z * L_z)^2} + G * J \right] \quad (13)$$

Onde:

- $K_x * L_x$ : comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo x;
- $K_y * L_y$ : comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo y;
- $K_z * L_z$ : comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo z;
- $r_0$ : o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de cisalhamento, dado no item E.1.1 da norma como:

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2} \quad (14)$$

- $C_w$ : é a constante de empenamento da seção transversal;
- $G$ : é o módulo de elasticidade transversal do aço;

- J: é o momento de inércia à torção uniforme;
- E: é o módulo de elasticidade do aço.

#### 3.4.4 Barras prismáticas submetidas a esforço cortante

Analogamente aos critérios abordados nas barras prismáticas á esforços axiais, tem-se para os esforços cortantes:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (15)$$

Onde:

- $V_{Sd}$ : esforço cortante solicitante de cálculo;
- $V_{Rd}$ : esforço cortante resistente de cálculo.

Para o cálculo do esforço cortante resistente, a peça precisa ser classificada conforme sua esbeltez, calculadas pela Equação (16) e comparado com valores de esbeltez de plastificação e de escoamento (Equação (17) e (18), respectivamente):

$$\lambda \leq \frac{h}{t_w} \quad (16)$$

$$\lambda_p \leq 1,10 * \sqrt{\frac{k_v * E}{f_y}} \quad (17)$$

$$\lambda_r \leq 1,37 * \sqrt{\frac{k_v * E}{f_y}} \quad (18)$$

Onde posteriormente o cortante resistente é calculado:

$$V_{Rd} = \begin{cases} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, & \text{para } \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{\lambda_p}{\lambda} * \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, & \text{para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\ 1,24 * \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^2 * \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}, & \text{para } \lambda > \lambda_r \end{cases} \quad (19)$$

Onde:

- $k_v =$

$$\begin{cases} 5,0 \text{ almas sem enrijecedores transversais, } \frac{a}{h} > 3 \text{ ou para } \frac{a}{h} > \left(\frac{260}{\frac{h}{t_w}}\right)^2 \\ 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} \text{ para todos os outros casos} \end{cases}$$

- $V_{pl}$  é a força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento, dado por:

$$V_{pl} = \frac{0,60 * d * t_w * f_w}{\gamma_{a1}} \quad (20)$$

Onde:

- $d$  é a altura total da seção transversal;
- $a$  é a distância entre as linhas de centro de dois enrijecedores;
- $h$  é a altura da alma, tomada igual à distância entre faces internas das mesas dos perfis soldados e igual a esse valor menos os raios de concordância entre mesa e alma nos laminados;
- $t_w$  é a espessura da alma.

### 3.4.5 Barras prismáticas submetidas a momento fletor

Para barras prismáticas submetidas a momento fletor segue-se o mesmo critério de comparação entre solicitação de esforços e resistência da peça:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (21)$$

Onde:

- $M_{Sd}$  é o esforço axial solicitante de cálculo;
- $M_{Rd}$  é o esforço axial resistente de cálculo;

O momento resistente de cálculo ( $M_{Rd}$ ) é obtido seguindo um rito de cálculo disponível nos Anexos G e H da NBR 8800 (2008). São verificados estados limites

últimos para flambagem local da alma (FLA), flambagem local da mesa comprimida (FLM) e flambagem lateral por torção (FLT). Se analisada a esbelteza da alma, via Anexo G da norma, e definida como esbelta, o procedimento de cálculo é seguido para o Anexo H da norma para análises da FLM e FLT.

Para seções I, H e U, que serão utilizadas neste trabalho, e de acordo com a Tabela G.1 da norma, as análises de flambagens seguem os seguintes critérios:

Os estados limites FLM e FLA, o momento fletor resistente é dado por:

$$M_{Rd} = \begin{cases} \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, & \text{para } \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{1}{\gamma_{a1}} * \left[ M_{pl} - (M_{pl} - M_r) * \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right], & \text{para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\ \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}}, & \text{para } \lambda > \lambda_r \text{ (não aplicável à FLA – ver Anexo H)} \end{cases} \quad (22)$$

Os estados limites FLT, o momento fletor resistente é dado por:

$$M_{Rd} = \begin{cases} \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, & \text{para } \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{C_b}{\gamma_{a1}} * \left[ M_{pl} - (M_{pl} - M_r) * \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right], & \text{para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\ \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, & \text{para } \lambda > \lambda_r \end{cases} \quad (23)$$

Os valores de  $M_r$ ,  $M_{cr}$  e os parâmetros de esbeltezes ( $\lambda$ ,  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$ ) são calculados conforme Tabela G.1 da norma.

### 3.4.6 Barras redondas com extremidades rosqueadas

As barras redondas com extremidades rosqueadas submetidas à tração são calculadas com o menor valor considerando os estados limites últimos de escoamento da seção bruta, conforme Equação (5), e de ruptura da parte rosqueada, conforme Equação (24).

$$F_{t,Rd} = \frac{0,75 * A_b * f_{ub}}{\gamma_{a2}} \quad (24)$$

Onde:

$A_b$  é a área bruta baseada no diâmetro externo da barra redonda;

$f_{ub}$  é a resistência à ruptura da barra redonda.

### 3.4.7 Barras submetidas à combinações de esforços solicitantes

A NBR 8800 (2008) prevê combinações para esforços axiais juntamente com os de momentos fletores, a fim de verificar flexocompressão e flexotração. Para essa combinação as seguintes condições devem ser validadas:

$$\frac{N_{Sd}}{2 * N_{Rd}} + \left( \frac{M_{Sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0, \text{ se } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2 \quad (25)$$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{Sd,x}}{M_{Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} \right) \leq 1,0, \text{ se } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2 \quad (26)$$

Onde:

- $N_{Sd}$  é o esforço axial solicitante de cálculo;
- $N_{Rd}$  é o esforço axial resistente de cálculo;
- $M_{Sd,x}$  e  $M_{Sd,y}$  são momentos fletores solicitantes de cálculo em relação ao eixo x e y, respectivamente;
- $M_{Rd,x}$  e  $M_{Rd,y}$  são momentos fletores resistentes de cálculo em relação ao eixo x e y, respectivamente;

## 3.5 DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES

Os tipos de ligações podem ser do tipo parafusada, soldada ou as duas na mesma ligação.

Para este trabalho foram consideradas apenas ligações parafusadas, definidos os critérios em 3.5.1.

### 3.5.1 Ligação parafusada

A Tabela 4 engloba alguns tipos de conectores que serão usados como base para os cálculos.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas dos aços para conectores.

Conectores		$f_y$ (Mpa)	$f_u$ (Mpa)
Rebites (ASTM A502)	Grau 1	-	415
	Grau 2	-	525
Parafusos comuns (ASTM A307)	$d \leq 102$ mm	-	75
Parafusos de alta resistência (ASTM A325)	$12,7 \leq d \leq 25,4$ mm	635	825
	$25,4 \leq d \leq 38,1$ mm	560	725
Parafusos de alta resistência (ASTM A325)	$12,7 \leq d \leq 38,1$ mm	895	1035
Barras Rosqueadas	ASTM A36	250	400
	ASTM A588	345	485

Fonte: Adaptado de PFEIL (2009).

Conforme NBR 8800 (2008), são dados critérios de verificações para ligações parafusadas, sendo verificado o cisalhamento do parafuso (Equação (27)) e a pressão de contato nos furos (Equação (28)), estes não sendo inferiores a  $2,7d_b$ , de preferência  $3d_b$ , e distância livre entre a borda de dois furos não inferior a  $d_b$ .

$$F_{Rd,v} = \frac{0,4 * A_g * f_u}{\gamma_{a2}} \quad (27)$$

$$F_{Rd,c} = \frac{1,2 * l_f * t * f_u}{\gamma_{a2}} \leq \frac{2,4 * d_b * t * f_u}{\gamma_{a2}} \quad (28)$$

Onde:

- $l_f$  é a distância livre, na direção da força, entre a borda do furo e a borda do furo adjacente ou a borda da peça ligada;
- $t$  é a espessura da peça ligada;
- $f_u$  é a resistência à ruptura do aço na parede do furo.
- $d_b$  é o diâmetro do parafuso;

### 3.6 DESLOCAMENTOS LIMITE EM RELAÇÃO AO ELS

Os deslocamentos máximos são descritos pela Tabela C.1 da NBR 8800 (2008), devendo satisfazer os seguintes critérios:

Para deslocamentos horizontais do pórtico transversal:

$$\delta_h < \frac{H}{300} \quad (29)$$

Onde:

- $\delta_h$  representa o deslocamento horizontal;
- $H$  representa a altura do pilar.

Para deslocamentos verticais do pórtico transversal:

$$\delta_v < \frac{L}{250} \quad (30)$$

Onde:

- $\delta_v$  representa o deslocamento vertical;
- $L$  representa o vão do pórtico transversal.

Para deslocamentos verticais de elementos na direção longitudinal da estrutura, como terças e vigas de tapamento:

$$\delta_v < \frac{L}{120} \quad (31)$$

Onde:

- $\delta_v$  representa o deslocamento vertical;
- $L$  representa o espaçamento entre os pórticos transversais.

### 3.7 AÇÃO DO VENTO NA ESTRUTURA

Estruturas metálicas, por se tratar de estruturas leves, sofrem de forma significativa às ações externas proveniente dos ventos, podendo levar a estrutura ao

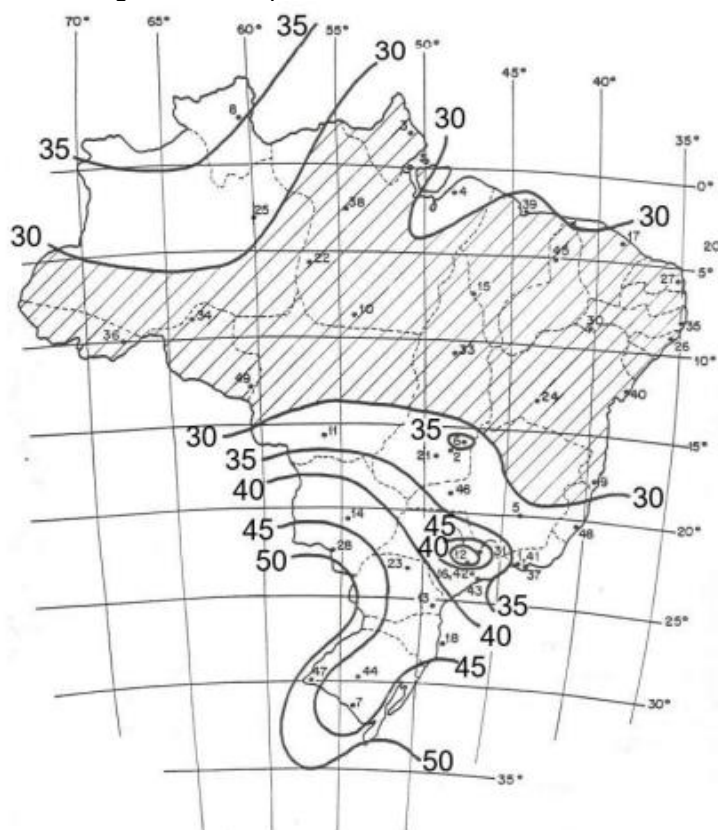
colapso ou até mesmo não resistir aos efeitos de sucção. Os subtópicos a seguir tratam de uma revisão da norma responsável pelas considerações de ações do vento nas edificações, NBR 6123 (2023).

### 3.7.1 Velocidade básica do vento ( $V_0$ )

A NBR 6123 (2023) define, através de um mapa de isopletas, velocidades básicas dadas em metros por segundo (m/s), ilustrada na Figura 18.

Os valores são considerados para uma altura de 10 metros sobre o nível do terreno em um lugar aberto e plano, com um tempo de recorrência de 50 anos, ou seja, podem acontecer ou exceder uma vez em 50 anos.

Figura 18 – Isopletas de velocidade básica  $V_0$ .



Fonte: NBR 6123 (2023).

Como o intuito do trabalho foi de considerar um pior caso para a estrutura, foi considerado o maior valor da isopleta mais próxima, não sendo utilizado o artifício de interpolação para redução da velocidade básica.



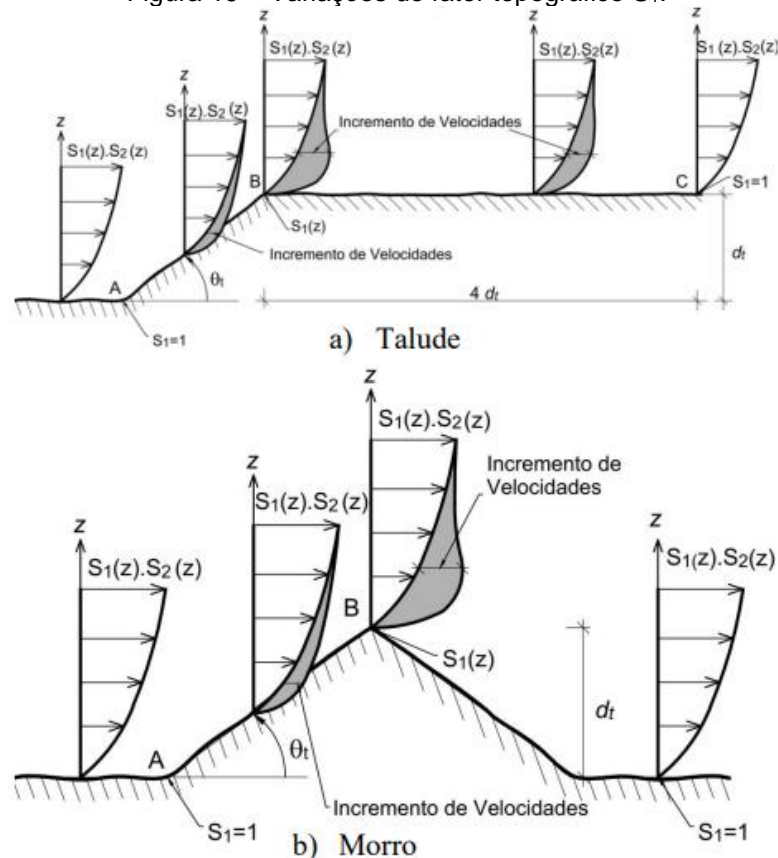
Como os valores não consideram exatamente as características locais a qual a estrutura está inserida, para cálculo da velocidade característica do vento ( $V_k$ ), conforme Equação (32), são considerados coeficientes que consideram fatores topográficos ( $S_1$ ), de rugosidade ( $S_2$ ) e estatísticos ( $S_3$ ), detalhados nos subtópicos na sequência.

$$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3 \quad (32)$$

### 3.7.2 Fator topográfico ( $S_1$ )

O fator topográfico  $S_1$  considera as variações de relevo, podendo ter uma redução em vales profundos protegidos,  $S_1 = 0,9$ , sem valores de reduções ou incrementos para terrenos planos,  $S_1 = 1,0$ , e valores incrementais para regiões de taludes ou morros,  $S_1 \geq 1$ , conforme Equação (33) e ilustrado na Figura 19.

$$S_1 = \begin{cases} S_1 = 1,0, \text{ para } \theta_t \leq 3^\circ \\ S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d_t}\right) * \text{tg}(\theta_t - 3^\circ) \geq 1, \text{ para } 6^\circ < \theta_t \leq 17^\circ \\ S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d_t}\right) * 0,31 \geq 1, \text{ para } \theta_t > 45^\circ \end{cases} \quad (33)$$

Figura 19 – Variações do fator topográfico  $S_1$ .

Fonte: NBR 6123 (2023).

### 3.7.3 Fator de rugosidade ( $S_2$ )

O fator de rugosidade  $S_2$  relaciona a interferência da rugosidade do terreno para a velocidade do vento com as dimensões da estrutura e sua altura acima do terreno. Com estes dados, a NBR 6123 (2023) classifica em cinco categorias relacionadas ao terreno e três classes relacionadas as dimensões da estrutura:

- Categoria I: Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medidas na direção e sentido incidente;
- Categoria II: Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas possuem uma cota média do topo dos obstáculos menor ou igual a 1;

- Categoria III: Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. A cota média do topo dos obstáculos é igual a 3,0 m;
  - Categoria IV: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados em zonas florestais, industriais ou urbanizados. A cota média do topo dos obstáculos é igual a 10 m. Inclui também zonas com obstáculos maiores que ainda não podem ser considerados na Categoria 5;
  - Categoria V: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. A cota média do topo dos obstáculos é igual ou superior a 25 m.
- 
- Classe A: Toda edificação, estrutura, parte de edificação ou estrutura, unidades e sistemas de vedação e seus elementos de fixação, cuja maior dimensão vertical ou horizontal não exceda 20 m;
  - Classe B: Toda edificação, estrutura, parte de edificação ou estrutura, cuja maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal seja maior do que 20 m e menor ou igual a 50 m;
  - Classe C: Toda edificação, estrutura, parte de edificação ou estrutura, cuja maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

Com todos esses fatores definidos, o fator de rugosidade  $S_2$  pode ser definido através da Tabela 3 da NBR 6123 (2023), ou calculado pela Equação (34).

$$S_2 = b_m * F_r * \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (34)$$

Onde:

- $b_m$  e  $p$  são obtidos pela Tabela 1 da norma, variando conforme vizinhança e classe da edificação;
- $F_r$  representa o fator de rajada, sempre correspondente à categoria II, Tabela 2 da norma.
- $z$  representa a altura máxima da estrutura.

### 3.7.4 Fator estatístico (S<sub>3</sub>)

O fator estatístico S<sub>3</sub> é baseado em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. São classificados em 5 grupos:

Tabela 5 – Grupos para fator S<sub>3</sub>.

Grupo	Descrição	S <sub>3</sub>	T <sub>p</sub> (anos)
1	Estruturas cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, edifícios de centrais de controle etc.). Pontes rodoviárias e ferroviárias. Estruturas que abrigam substâncias inflamáveis, tóxicas e/ou explosivas. Vedações das edificações do grupo 1 (telhas, vidros, painéis de vedação).	1,11	100
2	Estruturas cuja ruína represente substancial risco à vida humana, particularmente a pessoas em aglomerações, crianças e jovens, incluindo, mas não limitado a: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Edificações com capacidade de aglomeração de mais de 300 pessoas em um mesmo ambiente, como centros de convenções, ginásios, estádios etc.</li> <li>• Creches com capacidade maior do que 150 pessoas;</li> <li>• Escolas com capacidade maior do que 250 pessoas; Vedações das edificações do grupo 2 (telhas, vidros, painéis de vedação).</li> </ul>	1,06	75
3	Edificações para residências, hotéis, comércio, indústrias. Estruturas ou elementos estruturais desmontáveis com vistas a reutilização. Vedações das edificações do grupo 3 (telhas, vidros, painéis de vedação).	1,00	50
4	Edificações não destinadas à ocupação humana (depósitos, silos) e sem circulação de pessoas no entorno. Vedações das edificações do grupo 4 (telhas, vidros, painéis de vedação).	0,95	37
5	Edificações temporárias não reutilizáveis. Estruturas dos Grupos 1 a 4 durante a construção (fator aplicável em um prazo máximo de 2 anos) Vedações das edificações do grupo 5 (telhas, vidros, painéis de vedação).	0,83	15

Fonte: NBR 6123 (2023)

### 3.7.5 Pressão dinâmica (q)

A pressão dinâmica do vento é dada por:

$$q = 0,613 * (V_k)^2 \quad (35)$$

Onde:

- q é a pressão dinâmica, dada em N/m<sup>2</sup>;
- $V_k$  é a velocidade característica do vento, dada em m/s.

### 3.7.6 Coeficientes de pressão

Conforme NBR 6123 (2023), valores dos coeficientes de pressão e de forma, externos, para diversos tipos de edificações e para direções críticas do vento são dados nas Tabelas 6 a 12 da norma. Superfícies em que ocorrem variações consideráveis de pressão foram subdivididas e coeficientes são dados para cada uma das partes. Já para os coeficientes de pressão interna pode ser dado pelo método simplificado em 6.3.2 da norma, utilizada a alínea “a” para este trabalho:

a) Duas faces opostas igualmente permeáveis; as outras faces impermeáveis:

- Vento perpendicular a uma face permeável:  $c_{pi} = +0,2$
- Vento perpendicular a uma face impermeável:  $c_{pi} = -0,3$

Com as informações de coeficientes de pressões externas e internas, é possível calcular então a pressão efetiva ( $\Delta p$ ), dado por:

$$\Delta p = (c_{pe} - c_{pi}) * q \quad (36)$$

A pressão efetiva em um ponto da superfície externa, portanto, poderá ter um valor positivo ou negativo, representando uma sobrepressão e sucção externa, respectivamente.

## 4. APRESENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PROJETO

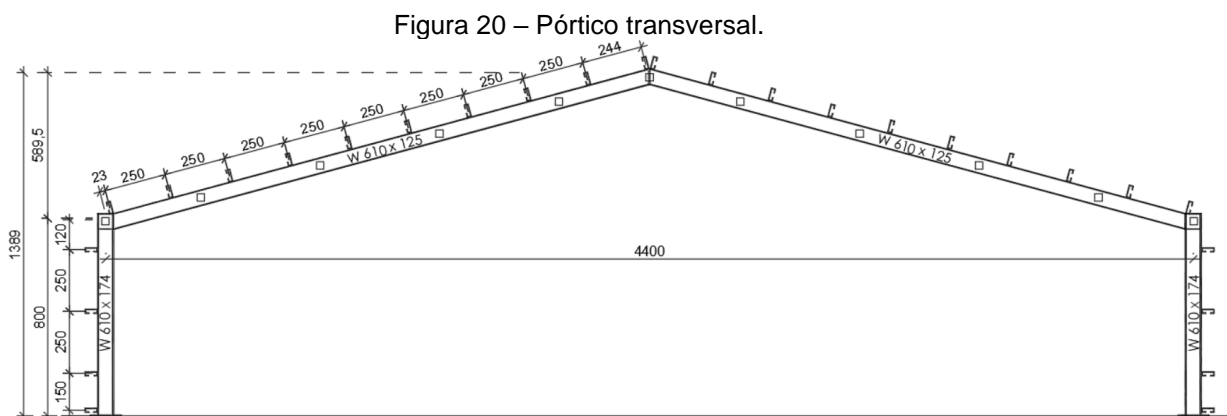
Este presente trabalho tem como objetivo a análise e o dimensionamento de um galpão metálico industrial modelado em perfis de alma cheia, projetado para ser construído em uma área consideravelmente aberta e descampada nas margens da BR-101 em Tijucas, Santa Catarina.

### 4.1 GEOMETRIA DA ESTRUTURA

Após definida necessidades arquitetônicas, a estrutura foi modelada e dimensionada com as seguintes especificações:

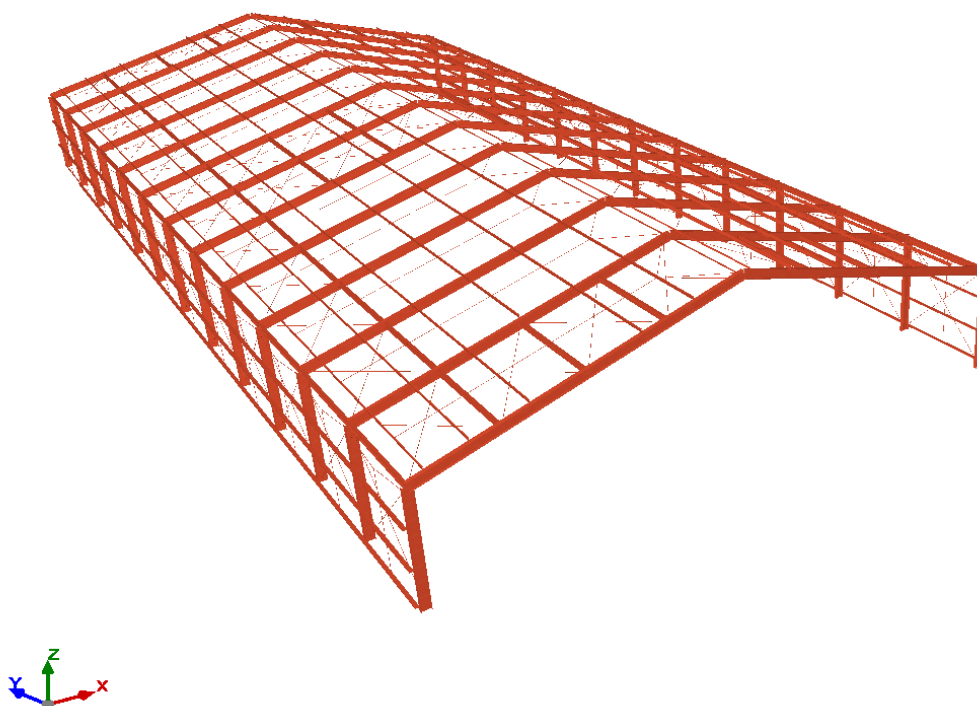
- Comprimento longitudinal de 96 metros e vão livre de 44 metros;
- Espaçamento de 8 metros entre os pórticos, totalizando 13 pórticos transversais;
- Colunas e vigas em perfis I laminados;
- Terças e vigas de tapamento em perfis U laminados;
- Contraventamentos dispostos no formato de X e Y em barras rosqueadas, trabalhando apenas à tração;
- Escoras à compressão em perfis U duplos ([]) travando os pórticos;
- Inclinação das vigas do pórtico e telhados em  $15^\circ$ , garantindo pé direito no centro do vão de 13,90 metros.

As Figura 20 e Figura 21, a seguir, ilustram o pórtico transversal calculado e o modelo 3D do galpão.



Fonte: Autor.

Figura 21 – Modelo 3D do galpão.



Fonte: Autor.

Como pode ser visto na Figura 21, o padrão dos eixos adotados foi:

- Eixo x: Sentido transversal do galpão;
- Eixo y: Sentido longitudinal do galpão;
- Eixo z: Representa a altura do galpão.

## 4.2 AÇÕES ATUANTES

### 4.2.1 Ação do vento

Os esforços provenientes do vento foram calculados utilizando o software VisualVentos® e validado por planilha própria, conforme NBR 6123 (2023).

Considerando o mapa de isopletas (Figura 18), o galpão será inserido em terreno de área aberta às margens da BR-101 na cidade de Tijucas, Santa Catarina, assim sendo considerado velocidade básica do vento,  $V_0$ , de 45 m/s.

Os fatores  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  considerados foram:

- $S_1 = 1,00$ . Terreno plano ou fracamente acidentado;
- $S_2 = 0,92$ . Categoria III – Classe C;
- $S_3 = 1,00$ . Grupo 3

Com estas informações é possível calcular a velocidade característica do vento ( $V_k$ ) e a pressão dinâmica exercida ( $q$ ):

$$V_k = 45 * 1,00 * 0,92 * 1,00 = 41,29 \text{ m/s}$$

$$q = 0,613 * 41,29^2 = 1,05 \text{ kN/m}^2$$

Através de 6.2.5, alínea “a”, Tabela 4 e Tabela 5 da norma, é possível identificar pelas características da estrutura seus coeficientes de pressão interna ( $C_{pi}$ ) e externa ( $C_{pe}$ ).

Foram consideradas para  $C_{pi}$  duas faces opostas igualmente permeáveis e duas faces opostas impermeáveis. Assim, tem-se:

- $C_{pi} = 0,2$  → ventos perpendiculares às faces permeáveis;
- $C_{pi} = -0,3$  → ventos perpendiculares às faces impermeáveis.

Para  $C_{pe}$  foi considerado  $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$ . Assim, tem-se:

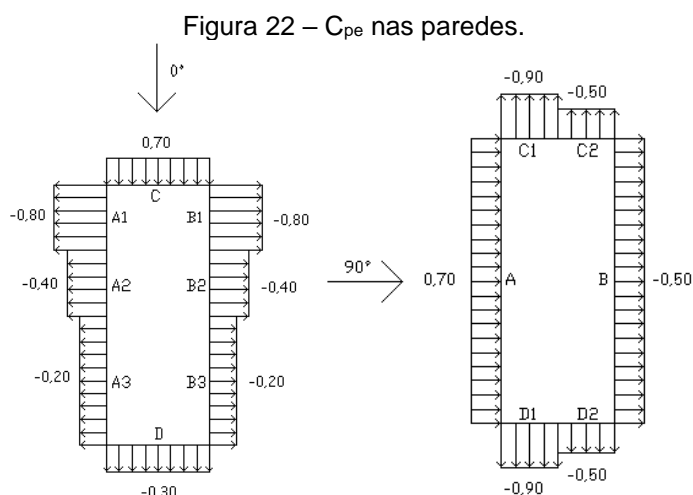
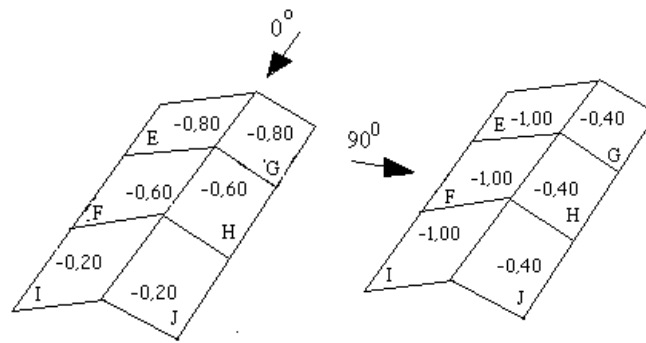




Figura 23 –  $C_{pe}$  nos telhados.

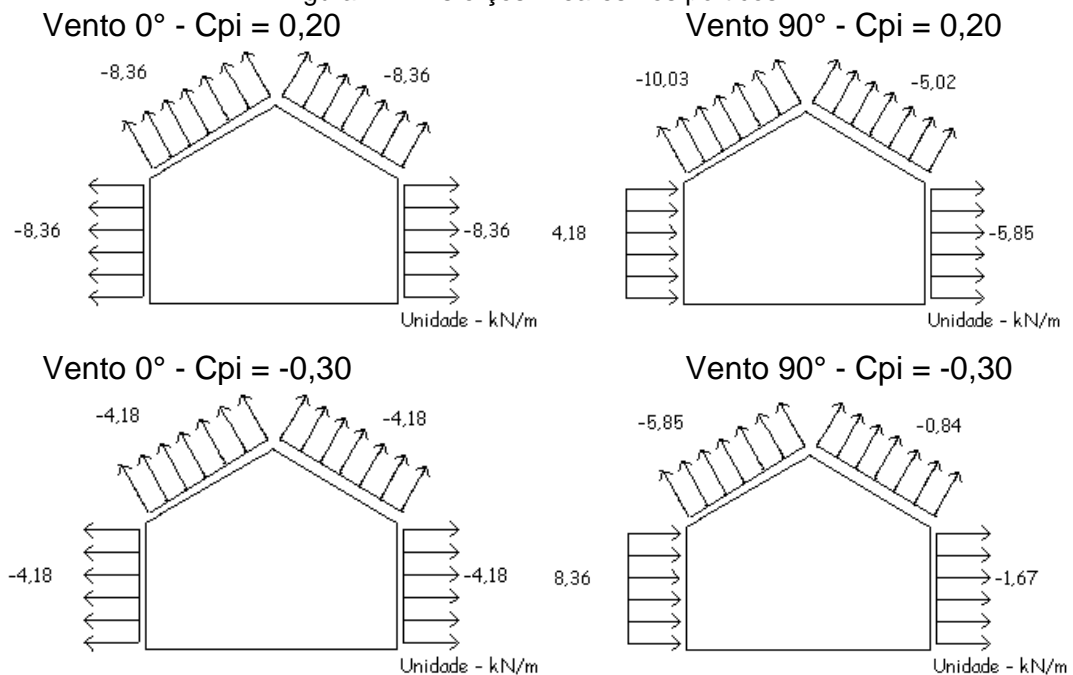


Fonte: VisualVentos®.

Por simplificação de cálculo e executiva, foram considerados os piores casos de coeficientes para vento a  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , sendo considerado o maior coeficiente em faces que tem diminuição do coeficiente no restante de sua dimensão, e seguindo a lógica de poder ter o vento no sentido oposto.

Com os coeficientes determinados, obtém-se os respectivos esforços lineares nos pórticos transversais com o coeficiente resultante, vindo da soma vetorial de  $C_{pe}$  e  $C_{pi}$ , multiplicado pela pressão dinâmica e distância entre os pórticos.

Figura 24 – Esforços lineares nos pórticos.



Fonte: VisualVentos®.

Como pode-se notar, o efeito do vento a 0° e 90° com  $C_{pi} = -0,30$  são menos expressivos em termos de força resultante se comparado ao com  $C_{pi} = 0,20$ , sendo assim considerado apenas este caso por ser claramente mais expressivo.

Para efeito de consideração de deslocamento longitudinal, foi considerado as faces transversais fechada como uma previsão de futuro fechamento e aumento dos esforços no sentido longitudinal, aumentando o deslocamento neste plano.

#### 4.2.2 Ações permanentes e acidentais

Conforme o CBCA (2018), para a análise no software MASTAN2 foi adicionado um carregamento permanente de 0,45 kN/m<sup>2</sup> que correspondem ao somatório de alguns elementos presentes no galpão, descrito na Tabela 6.

Tabela 6 – Sobrecarga permanente.

Sobrecargas permanentes	[kN/m <sup>2</sup> ]
Elementos estruturais	0,2
Tirantes/Terças	0,1
Contraventamentos	0,05
Telhas	0,1
Total	0,45

Fonte: CBCA (2018).

Para a análise do modelo 3D no Cype3D foi inserido apenas o carregamento de telha, visto que o software já considera o peso próprio dos elementos.

Segundo a NBR 8800 (2008), também se adiciona uma sobrecarga acidental de 0,25 kN/m<sup>2</sup>.

Para efeito de carregamento linear, os valores por área são multiplicados pelo espaçamento entre os pórticos, resultando em:

$$CP = 0,45 * 8 = 3,60 \text{ kN/m}$$

$$Q = 0,25 * 8 = 2,00 \text{ kn/m}$$

### 4.2.3 Combinações consideradas

Foram consideradas inicialmente sete situações de combinações para o ELU, posteriormente validadas por software de análise estrutural, onde são criadas todas as combinações possíveis (total de 22):

- $F_{d,1} = 1,25 * G + 1,5 * Q + (1,4 * 0,6) * W_0(c_{pi} = 0,20)$
- $F_{d,2} = 1,25 * G + 1,5 * Q + (1,4 * 0,6) * W_{90}(c_{pi} = 0,20)$
- $F_{d,3} = 1,25 * G + 1,4 * W_0(c_{pi} = 0,20) + (1,5 * 0,7) * Q$
- $F_{d,4} = 1,25 * G + 1,4 * W_{90}(c_{pi} = 0,20) + (1,5 * 0,7) * Q$
- $F_{d,5} = 1,25 * G + 1,5 * Q$
- $F_{d,6} = 1,00 * G + 1,4 * W_0(c_{pi} = 0,20)$
- $F_{d,7} = 1,00 * G + 1,4 * W_{90}(c_{pi} = 0,20)$

Onde:

- $F_{d,i}$ : esforço solicitante resultante da combinação;
- G: forças permanentes;
- Q: sobrecargas acidentais;
- $W_0$ : esforço solicitante do vento a 0°;
- $W_{90}$ : esforço solicitante do vento a 90°.

Para o ELS foram consideradas três combinações raras de serviços, consideradas como pior caso, posteriormente validadas via software onde é criada todas as combinações possíveis (total de 8):

- $F_{ser,1} = 1,00 * G + 1,00 * Q$ ;
- $F_{ser,2} = 1,00 * G + 1,00 * Q + 0,30 * W_0(C_{pi} = 0,20)$ ;
- $F_{ser,3} = 1,00 * G + 1,00 * Q + 0,30 * W_{90}(c_{pi} = -0,30)$ .

## 5. DIMENSIONAMENTO

Os próximos tópicos serão abordados os resultados e verificações de pior combinação no ELU feitos para cada elemento estrutural, com os respectivos memoriais de cálculo presentes nos apêndices.

### 5.1 SOFTWARES PARA ANÁLISE ESTRUTURAL

Os softwares vieram para agilizar a forma de analisar as estruturas, com isso foi viável o uso de algumas ferramentas que possibilitaram simular e analisar os esforços que irão atuar na estrutura.

Com a intenção de analisar os esforços no software Cype3D, e ser usado em grande escala profissionalmente, optou-se por modelar 2D e 3D a estrutura nele. Para conferência e confiabilidade dos resultados de análise vindos do Cype3D, usou-se softwares já bem consolidado como o Ftool® e Ziemian and W. McGuire. MASTAN2 para comparação de resultados dos pórticos em 2D, com resultados muito semelhantes. Como o Cype3D, na versão utilizada, possui a limitação de não fazer análise não linear (implementada na versão 2024.d), utilizou-se o MASTAN2 para este fim.

Uma ótima ferramenta do Cype3D é exibir as combinações mais expressivas que foi utilizada para verificação dos elementos, sendo assim, sendo possível assim já extrair o pior carregamento e verificar manualmente.

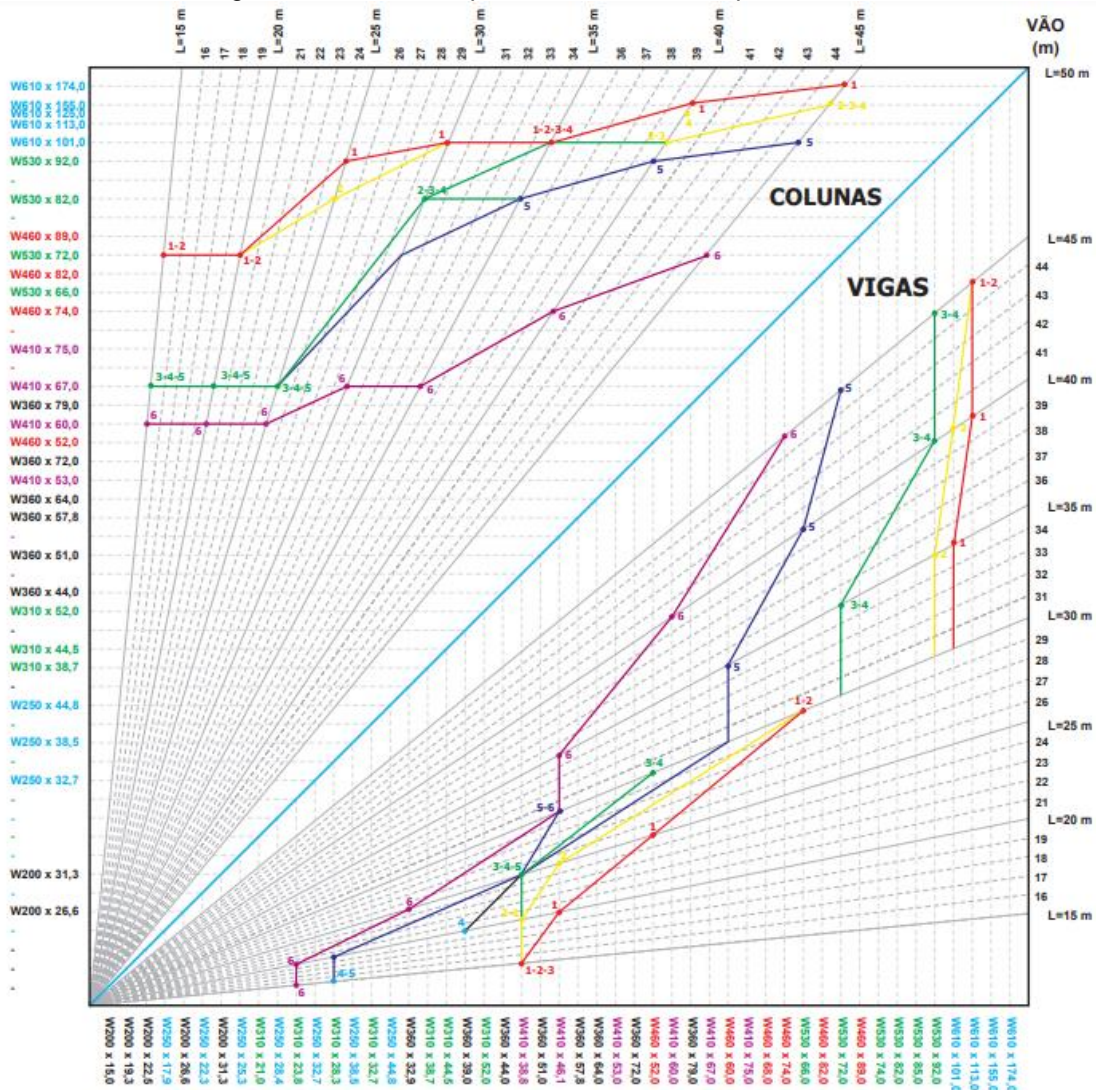
Como pré-dimensionamento para pilares e vigas foi utilizado o ábaco fornecido pela Gerdau®, Figura 25.

A partir do ábaco obteve-se um perfil W610x125 para pilares e W610x113 para vigas, que supriu todas as verificações das combinações do ELU, porém excedeu no deslocamento horizontal nas verificações do ELS. Com isso, foi alterado iterativamente pilar e viga para aumentar a rigidez, chegando em um perfil de pilar W610x174 e W610x125 para vigas, que, evidentemente, também suprirá todas as verificações do ELU, mas agora com os deslocamentos horizontais dentro dos limites do ELS.

A estrutura inicialmente foi calculada com o tipo de aço A36 (250 MPa), porém com resultados muito próximos do limite para a combinação de esforços axiais e

momentos. Com isso, tomou-se a decisão de utilizar o aço A572 (345 MPa) para melhorar estes resultados.

Figura 25 – Ábaco de pré-dimensionamento para H=9 m.



Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
$V_o = 45 / B = 12m$	$V_o = 45 / B = 9m$ $V_o = 40 / B = 12m$	$V_o = 40 / B = 9m$ $V_o = 35 / B = 12m$	$V_o = 45 / B = 6m$ $V_o = 35 / B = 9m$ $V_o = 30 / B = 12m$	$V_o = 40 / B = 6m$ $V_o = 35 / B = 6m$ $V_o = 30 / B = 9m$	$V_o = 30 / B = 6m$

Fonte: Gerdau®.

## 5.2 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE MASTAN2 E CYPE 3D

Com o intuito de validar os resultados do Cype3D, foi feita uma comparação dos resultados de deslocamentos no ELS. Com análises lineares e não lineares feitas

no MASTAN2 apresentados em 5.9.1 e comparações de análises lineares entre MASTAN2 e Cype3D, optou-se posteriormente em prosseguir com apenas análise linear e dimensionamento pelo Cype3D, visto que a estrutura foi considerada de pouca deslocabilidade e a comparação de resultados foi próxima, como ilustrado na Tabela 7 a seguir:

Tabela 7 – Comparativo de deslocamentos.

Combinação	Eixo de deslocamento	Ponto de análise	MASTAN2 (mm)	Cype3D (mm)	Diferença (%)
1	x	1	-26,39	-27,89	1,86
	y	2	-102,90	-103,86	0,92
2	x	1	-17,11	-17,50	2,29
	y	2	-66,17	-66,87	1,05
3	x	1	-25,84	-26,19	1,37
	y	2	-86,00	-86,75	1,65

Fonte: Autor.

### 5.3 PILARES

Os cálculos obtidos pelas verificações conforme NBR 8800 (2008) estão presentes no Apêndice A. Resultados apresentados na Tabela 8, a seguir:

Tabela 8 – Esforços nos pilares

Perfil	Esforço Axial		Momento Fletor		Esforço Cortante		Combinação de esforços
	$N_{c,Sd}(kN)$	$N_{t,Rd}(kN)$	$M_{Sd,x}(kN)$	$M_{Sd,y}(kN)$	$V_{Sd,x}(kN)$	$V_{Sd,y}(kN)$	
	$N_{c,Rd}(kN)$	$N_{t,Rd}(kN)$	$M_{Rd,x}(kN)$	$M_{Rd,y}(kN)$	$V_{Rd,x}(kN)$	$V_{Rd,y}(kN)$	
W610x174	222,22	211,61	807,35	14,03	28,50	248,04	Flexotração 0,52
	2989,57	6987,82	1688,31	238,83	2642,07	1622,88	

Fonte: Autor

Conforme Tabela 8, os valores foram obtidos conforme piores combinações para cada caso, conforme fórmulas em 4.2.3. As combinações para cada pior caso é:

- Tração: Combinação 6
- Compressão: Combinação 5
- Momento Fletor x: Combinação 7
- Momento Fletor y: Combinação 6

- Esforço Cortante x: Combinação 3
- Esforço Cortante y: Combinação 6
- Combinação de esforços: Combinação 6

#### 5.4 VIGAS DE COBERTURA

Os cálculos obtidos pelas verificações conforme NBR 8800 (2008) estão presentes no Apêndice A. Resultados apresentados na Tabela 9, a seguir:

Tabela 9 – Esforços nas vigas

Perfil	Esforço Axial		Momento Fletor		Esforço Cortante		Combinação de esforços
	$N_{c,Sd}(kN)$	$N_{t,Rd}(kN)$	$M_{Sd,x}(kN)$	$M_{Sd,y}(kN)$	$V_{Sd,x}(kN)$	$V_{Sd,y}(kN)$	Flexocompressão
	$N_{c,Rd}(kN)$	$N_{t,Rd}(kN)$	$M_{Rd,x}(kN)$	$M_{Rd,y}(kN)$	$V_{Rd,x}(kN)$	$V_{Rd,y}(kN)$	
W610x125	296,83	261,46	758,99	32,42	149,26	248,04	0,96
	2323,76	5021,32	841,44	107,73	1689,27	1370,49	

Fonte: Autor

Conforme Tabela 9, os valores foram obtidos conforme piores combinações para cada caso, conforme fórmulas em 4.2.3. As combinações para cada pior caso é:

- Tração: Combinação 6
- Compressão: Combinação 5
- Momento Fletor x: Combinação 5
- Momento Fletor y: Combinação 4
- Esforço Cortante x: Combinação 7
- Esforço Cortante y: Combinação 7
- Combinação de esforços: Combinação 6

#### 5.5 TERÇAS

As terças formam elementos de apoio para as telhas, e com isso não foram consideradas no travamento dos pórticos, sendo calculadas como elementos biapoiados e sem esforços axiais. O perfil adotado será o de seção U.

Conforme o CBCA (2018), foram consideradas três combinações de cálculo, sendo duas idênticas às combinações montadas para o ELU (Combinação 5 e 7), e

outra indicada pela NBR 6120 (2019) com o intuito de verificar a resistência da peça ao peso próprio majorado, sendo posicionado um carregamento de 1 kN no meio do vão, ponto mais desfavorável.

Os apoios diferem entre os locais da peça, onde para o eixo X o perfil é travado pelo tirante, no eixo Y não há travamento então terá seu comprimento de flambagem correspondendo ao vão total.

Como consideração do carregamento de vento, foi considerada a combinação com vento a 90° por possuir maior coeficiente de pressão exercido.

Combinações utilizadas:

- $F_{d1,terças} = 1,25 * F_G + 1,5 * F_{Q1}$
- $F_{d2,terças} = 1,00 * F_G + 1,4 * W_{90}(C_{pi} = 0,2)$
- $F_{d3,terças} = 1,25 * F_G + 1,00 kN$

Os carregamentos de peso próprio (0,25 kN/m²), sobrecarga (0,25 kN/m²) e vento (1,05 kN/m²,  $C_p = -1,00$ ) foram obtidos sendo transformados de carregamento por área para linear, considerando espaçamento entre as terças de 2,5 m.

- $G = Q = 0,25 * 2,5 = 0,63 kN/m$
- $W_{90}(C_{pi} = 0,2) = -1,20 * 1,05 * 2,5 = -2,58 kN/m$

Tabela 10 – Combinações terças

$F_{d1,terças}$				
Perfil	Esforço Cortante		Momento Fletor	
	$V_{x,Sd}(kN)$	$V_{y,Rd}(kN)$	$M_{x,Sd}(kN)$	$M_{y,Rd}(kN)$
	$V_{x,Rd}(kN)$	$V_{y,Rd}(kN)$	$M_{x,Rd}(kN)$	$M_{y,Rd}(kN)$
	2,70	6,30	5,00	5,40
	210,61	333,55	14,89	37,95
$F_{d2,terças}$				
U254x29,76	Esforço Cortante		Momento Fletor	
	$V_{x,Sd}(kN)$	$V_{y,Rd}(kN)$	$M_{x,Sd}(kN)$	$M_{y,Rd}(kN)$
	$V_{x,Rd}(kN)$	$V_{y,Rd}(kN)$	$M_{x,Rd}(kN)$	$M_{y,Rd}(kN)$
	2,30	15,00	1,80	30,00
	210,61	333,55	14,89	37,95



Continuação Tabela 10

<i>F<sub>d3,terças</sub></i>				
Perfil	Esforço Cortante		Momento Fletor	
	<i>V<sub>x,Sd</sub></i> (kN)	<i>V<sub>y,Rd</sub></i> (kN)	<i>M<sub>x,Sd</sub></i> (kN)	<i>M<sub>y,Rd</sub></i> (kN)
U254x29,76	<i>V<sub>x,Rd</sub></i> (kN)	<i>V<sub>y,Rd</sub></i> (kN)	<i>M<sub>x,Rd</sub></i> (kN)	<i>M<sub>y,Rd</sub></i> (kN)
	2,90	5,20	2,30	10,50
	210,61	333,55	14,89	37,95

Fonte: Autor

A Tabela 10 é composta por resultados de cálculos apresentados no Apêndice D.

## 5.6 VIGAS DE TAPAMENTO

Para o cálculo das vigas de tapamento lateral segue o mesmo princípio do cálculo das terças, com diferença dos carregamentos aplicados.

Conforme o CBCA (2018), foram consideradas três combinações de cálculo, sendo duas idênticas às combinações montadas para o ELU (Combinação 5 e 6).

Os apoios diferem entre os eixos locais da peça, onde para o eixo X o perfil é travado pelo tirante, no eixo Y não há travamento então terá seu comprimento de flambagem correspondendo ao vão total.

Como consideração do carregamento de vento, foi considerada a combinação com vento a 0° por possuir maior coeficiente de pressão exercido.

Combinações utilizadas:

- $F_{d1,vt} = 1,25 * F_G + 1,5 * F_{Q1}$
- $F_{d2,vt} = 1,00 * F_G + 1,4 * W_0(C_{pi} = 0,2)$

Os carregamentos de peso próprio (0,12 kN/m<sup>2</sup>), sobrecarga (0,12 kN/m<sup>2</sup>) e vento (1,05 kN/m<sup>2</sup>, C<sub>p</sub> = -1,00) foram obtidos sendo transformados de carregamento por área para linear, considerando espaçamento entre as terças de 2,7 m.

- $G = Q = 0,12 * 2,7 = 0,33 \text{ kN/m}$
- $W_0(C_{pi} = 0,2) = -1,00 * 1,05 * 2,7 = -2,84 \text{ kN/m}$

Tabela 11 – Combinações vigas de tapamento.

$F_{d1,vt}$				
Perfil	Esforço Cortante		Momento Fletor	
	$V_{x,Sd}(kN)$	$V_{y,Rd}(kN)$	$M_{x,Sd}(kN)$	$M_{y,Rd}(kN)$
	$V_{x,Rd}(kN)$	$V_{y,Rd}(kN)$	$M_{x,Rd}(kN)$	$M_{y,Rd}(kN)$
	2,30	-	1,80	-
	210,61	333,55	14,89	37,95
$F_{d2,vt}$				
U254x29,76	Esforço Cortante		Momento Fletor	
	$V_{x,Sd}(kN)$	$V_{y,Rd}(kN)$	$M_{x,Sd}(kN)$	$M_{y,Rd}(kN)$
	$V_{x,Rd}(kN)$	$V_{y,Rd}(kN)$	$M_{x,Rd}(kN)$	$M_{y,Rd}(kN)$
	0,80	15,90	0,70	31,80
	210,61	333,55	14,89	37,95

Fonte: Autor

A Tabela 11 é composta por resultados de cálculos apresentados no Apêndice E.

## 5.7 CONTRAVENTAMENTO

Os elementos de contraventamento foram dimensionamentos considerando seu pior caso de área de influência, a pressão do vento e um coeficiente de majoração:

$$F_{Cont} = \gamma_q * A_{inf} * q \quad (37)$$

Para as escoras de compressão foram utilizados perfis U soldados em formato de caixa ([]) para garantir boa esbeltez.

Os elementos considerados como tirantes foram implementados no software como barra de tirante, não considerando valores de carregamento à compressão, não gerando erros de esbeltez.

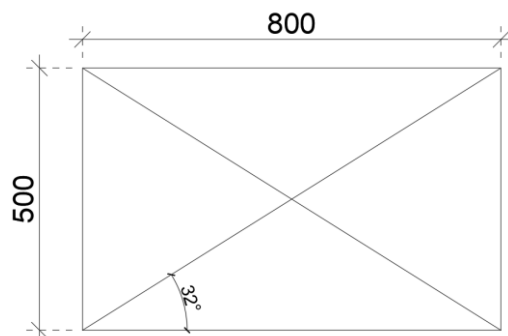
### 5.7.1 Tirantes em formato de X

Para tirantes X da cobertura foi determinado diâmetro de 7/8" ou 22,25 mm, já para os verticais diâmetros de 1.5/8" ou 41,28 mm.

Os tirantes X são posicionados da seguinte forma:

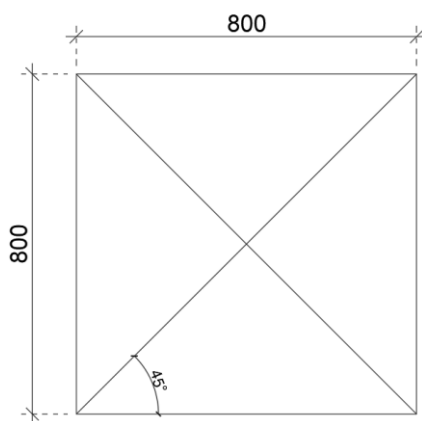
- Cobertura:

Figura 26 – Esquema de tirantes X da cobertura.



Fonte: Autor.

Figura 27 – Esquema de tirantes X na vertical.



Fonte: Autor.

Tabela 12 – Tirantes X.

Contraventamento	Diâmetro (mm)	$N_{t,Rd}(kN)$
		$N_{t,Rd}(kN)$
Cobertura	Ø22,25	60,20
		129,61
Vertical	Ø38,10	249,89
		285,02

Fonte: Autor

Os dados apresentados na Tabela 12 são resultados dos cálculos do Apêndice F.

### 5.7.2 Tirantes em formato de Y

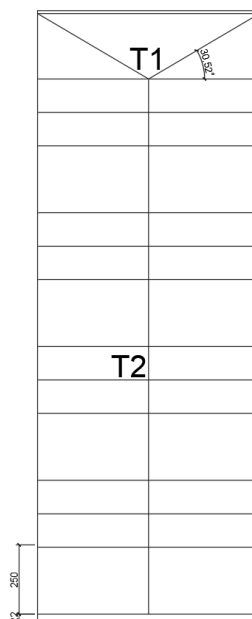
Conforme o CBCA (2018), foi utilizado carregamentos de 0,12 kN/m<sup>2</sup> para peso próprio e 0,25 kN/m<sup>2</sup> de sobrecarga, calculados seguindo analogamente a Combinação 5 do ELU:

$$F_{t,d} = 1,25 * G + 1,5 * Q \tag{38}$$

Para os tirantes Y foi determinado o diâmetro de 5/8" ou 15,88 mm. Os tirantes Y são posicionados da seguinte forma:

- Cobertura:

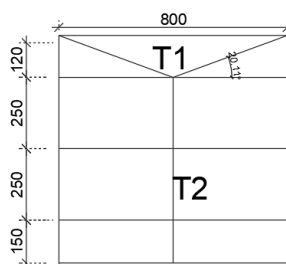
Figura 28 – Esquema de tirantes Y da cobertura.



Fonte: Autor.

- Vertical:

Figura 29 – Esquema de tirantes Y na vertical.



Fonte: Autor.

Tabela 13 – Tirantes Y.

Contraventamento	Tipo	Diâmetro (mm)	$N_{t,Sd}(kN)$
			$N_{t,Rd}(kN)$
Cobertura	T1	Ø15,88	11,39
			44,01
	T2		10,63
			44,01
Vertical	T1	9,92	
	T2	44,01	
		4,20	
			44,01

Fonte: Autor.

### 5.7.3 Escoras à compressão

As escoras de compressão também são calculadas conforme sua área de influência, Equação (37), trabalhando à compressão com a função de complementar o travamento dos pórticos.

A maior área de influência das escoras foi de 84,19 m<sup>2</sup>, gerando um esforço de:

$$F_{esc} = 1,4 * 84,19 * 1,05 = 123,76 \text{ kN}$$

Foi optado por perfis U soldados em formato de caixa ([]) por motivos de esbeltez e leveza, sendo muito usado como escora.

Tabela 14 – Escoras.

Perfil	$N_{c,Sd}(kN)$
	$N_{c,Rd}(kN)$
2U203,2x7,7 []	123,76
	281,98

Fonte: Autor.

## 5.8 LIGAÇÕES PARAFUSADAS

As ligações parafusadas são verificadas conforme os esforços cortantes solicitados.

Foram adotados diâmetros idênticos para todas as ligações, para facilitar a execução e evitar equívocos. O diâmetro adotado e verificado conforme Equação (27) foi o de 5/8" ou 15,88 mm.

Tabela 15 – Ligações parafusadas.

Ligações	Pilar-Viga		Viga-Viga	
	$V_{Sd}(kN)$ $V_{Rd}(kN)$	Quantidade	$V_{Sd}(kN)$ $V_{Rd}(kN)$	Quantidade
ASTM A325 5/8" - Ø15,88 mm	248,04 37,26	8	111,63 37,26	4

Fonte: Autor.

### 5.8.1 Pressão de contato dos furos

Para as ligações entre perfis I são soldadas chapas para servir de superfície para os parafusos. A tabela 14 da NBR 8800 (2008) determina distância de 22 mm entre bordas de furos ou da chapa, por questão de arredondamento foi usado 25 mm. Foi adotada chapa de 20 mm e verificada conforme Equação (28).

$$F_{Rd,c} = \frac{1,2 * 25 * 10^{-2} * 20 * 40}{1,35} \leq \frac{2,4 * 15,88 * 10^{-2} * 20 * 40}{1,35}$$

$$F_{Rd,c} = 177,78 \leq 225,85 \text{ kN}$$

## 5.9 DESLOCAMENTOS

Para efeito de comparação entre resultados de deslocamento em análise linear e não linear para verificação de deslocabilidade da estrutura, o pórtico foi modelado no MASTAN2 e aplicado os carregamentos das combinações de ELU e ELS.

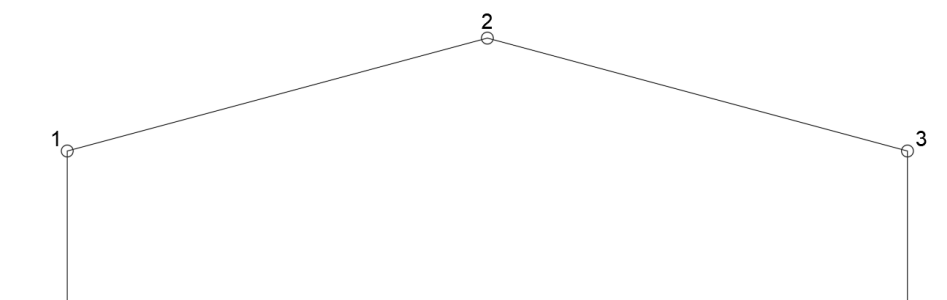
Com o modelo 3D do galpão modelado no Cype3D podemos tirar o deslocamento longitudinal apenas em uma análise linear para a pior combinação de ELS.

Nos subtópicos a seguir serão apresentados os maiores valores obtidos, a tabela com todos os valores encontra-se no Apêndice G.

### 5.9.1 Pórticos

Para analisar os deslocamentos dos pórticos foram definidos três pontos de análise ilustrados na Figura 30.

Figura 30 – Pontos de análise de deslocamento.



Fonte: Autor.

Vale ressaltar que os eixos considerados nos softwares são diferentes para os pórticos. No MASTAN2 os eixos xy correspondem ao pórtico, já no Cype3D o pórtico corresponde ao eixo xz, sendo o eixo y correspondente a direção longitudinal do galpão.

Tabela 16 – Maiores deslocamentos ELU

Combinação	Eixo de deslocamento	Ponto de análise	Análise Linear (mm)	Análise não-linear (mm)	Diferença (%)
1	x	1	-17,31	-17,35	0,23
	y	2	-65,97	-66,50	0,80
2	x	1	-24,74	-24,86	0,49
	y	2	-67,00	-67,69	1,03
3	x	1	4,16	4,12	0,97
	y	2	18,33	18,15	0,99
4	x	3	-16,22	-16,14	0,50
	y	2	16,61	16,52	0,55
5	x	1	-35,34	-35,91	1,59
	y	2	-137,90	-141,70	2,68
6	x	1	16,26	16,00	1,63
	y	2	66,05	64,71	2,07
7	x	3	-35,07	-34,63	1,27
	y	2	89,90	88,17	1,96

Fonte: Autor.

Tabela 17 – Maiores deslocamentos ELS.

Combinação	Eixo de deslocamento	Ponto de análise	Análise linear (mm)	Análise não linear (mm)	Diferença (%)
1	x	1	-26,39	-26,70	1,16
	y	2	-102,90	-105,00	2,00
2	x	1	-17,11	-17,21	0,58
	y	2	-66,17	-66,91	1,11
3	x	1	-25,84	-26,09	0,96
	y	2	-86,00	-87,46	1,67

Fonte: Autor.

Analisando os dados, pode-se inferir que a estrutura é de pouca deslocabilidade por se tratar de uma diferença inferior a 10% das análises lineares e não lineares, com isso a análise não linear para a estrutura 3D não será necessária.

### 5.9.2 Terças e vigas de tapamento

As verificações de deslocamentos das terças são similares a das vigas de tapamento. O critério de deslocamento é dado pela NBR 8800 (2008) com deslocamento limite descrito na Equação (31) e possuindo a solicitação de carregamento uma combinação rara, dada pela Equação (3).

$$\delta_v < \frac{L}{120} = \frac{8000}{120} = 66,67 \text{ mm}$$

Os carregamentos dados pela norma compõem:

- G e Q: 0,25 kN/m<sup>2</sup>;
- q: 1,05 kN/m<sup>2</sup> (C<sub>pe</sub> = -0,8);
- Pórticos espaçados em 8 m;
- Terças espaçadas em 2,5 m.

$$F_{ser} = 1,33 \text{ kN/m}$$



Segundo FAKURY (2016), é possível usar a equação da flecha teórica para definir a flecha da terça.

$$\delta_V = \frac{5 * Q * l^4}{389 * E * I} \quad (39)$$

Resultando em:

$$\delta_V = 0,00652 \text{ m} = 6,52 \text{ mm} < 66,67 \text{ mm} \rightarrow \text{ok!}$$

### 5.9.3 Deslocamentos no modelo 3D

Uma das limitações do software Cype3D é não possuir análise não linear, com isso, os deslocamentos do modelo 3D foram dados como coerentes após calcular os pórticos com análise linear e não linear separadamente no software MASTAN2 e ver que a estrutura é de pouca deslocabilidade.

A Figura 31 ilustra o modelo 3D, com os valores nos três pontos de análise dados na Figura 30, com os valores da envoltória dos deslocamentos dados para 3 pórticos diferentes, sendo dois nos extremos e um central.

Nota-se, novamente, que os eixos dados no Cype3D são xz para pórtico transversal e eixo y corresponde a direção longitudinal.

Tabela 18 – Maiores deslocamentos ELS.

Pórtico Transversal	Ponto de análise	Combinação	Eixo de deslocamento	Deslocamento (mm)
y=0 (pórtico de extremidade)	1	1	x	-24,25
		2	x	-13,27
		3	x	-22,06
	2	1	z	-93,28
		2	z	-50,72
		3	y	9,80
	3	3	z	-74,37
		1	x	24,25
		2	x	13,27
y=48 (pórtico central)	1	3	x	16,71
		1	x	-26,19
		2	x	-16,59
	2	3	x	-24,06
		1	z	-101,15

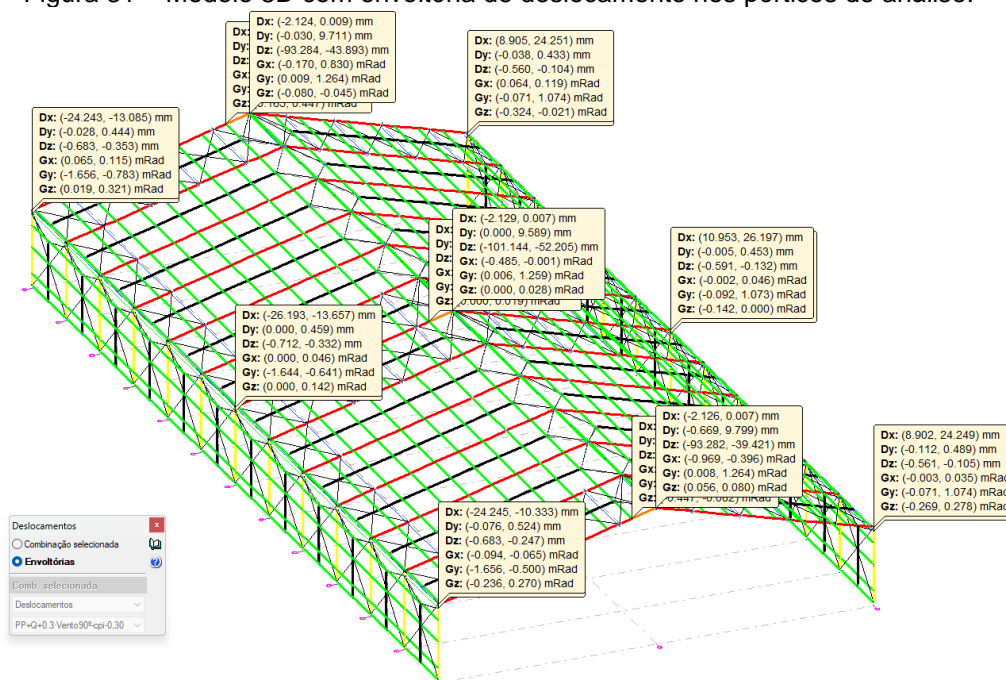
Continuação Tabela 18

Pórtico Transversal	Ponto de análise	Combinação	Eixo de deslocamento	Deslocamento (mm)
y=48 (pórtico central)	2	2	Z	-63,50
		3	Y	9,59
		3	Z	-82,53
	3	1	X	26,20
		2	X	16,59
		3	X	18,72
y=96 (pórtico de extremidade)	1	1	X	-24,24
		2	X	-16,02
		3	X	-22,05
	2	1	Z	-93,29
		2	Z	-60,55
		2	Y	9,71
	3	3	Z	-74,37
		1	X	24,25
		2	X	16,02
		3	X	16,72

Fonte: Autor.

Comparando os valores da tabela com os limites dado pela Equação (29) e (30), temos que para o ELS a estrutura se comporta dentro dos limites de deslocamentos.

Figura 31 – Modelo 3D com envoltória de deslocamento nos pórticos de análise.



Fonte: Autor.

## 5.10 CONSUMO DE AÇO

Para fins de comparação e ordem de grandeza sobre a estrutura calculada, buscou-se na literatura equações como parâmetros. O Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas (MIC, 1986) fornece o parâmetro  $K_2$ , que corresponde a uma equação que estima o peso de aço de galpões, em  $\text{kgf/m}^2$ , conforme Equação (40).

$$K_2 = 10 + 1,5 * s \quad (40)$$

Onde “s” é o vão do galpão.

Com os parâmetros da estrutura calculada neste trabalho, teríamos:

$$K_2 = 10 + 1,5 * 44 = 76 \text{ kgf/m}^2$$

Para efeito de comparação, a Tabela 18 fornece o total de aço utilizado no galpão, resultando em uma taxa de aço de:

$$A_{\text{galpão}} = 44 * 96 = 4224 \text{ m}^2$$

$$\text{Total}_{\text{aço}} = 214409,87 * 1,15 = 246571,35$$

$$\text{Taxa}_{\text{Total}_{\text{aço}}} = \frac{246571,35}{4224} = 58,37 \text{ kgf/m}^2$$

Nota-se que o resultado obtido foi positivo, sendo 23% menor que o esperado, ilustrado na Tabela 19.

Tabela 19 – Quantitativo de aço.

Material	Perfil	Perfil	Comprimento	Peso
Tipo			Perfil	Perfil
			(m)	(kg)
Aço Laminado A572 345 MPa	U	U 254.0 x 6.1	2880,00	65563,20
		U 254.0 x 6.1, Caixa dupla soldada	608,00	27682,24
	I	W 610 x 174	208,00	36378,78
		W 610 x 125	592,21	74428,37
	Barra redonda	1.5/8"	532,97	5599,43
		5/8"	1054,77	1639,89
		7/8"	1023,37	3117,95
	TOTAL		6899,32	214409,87

Fonte: Autor.

## 6. CONCLUSÃO

O estudo de caso apresentado visa analisar a estabilidade estrutural em todos os eixos, atendendo aos valores normativos estabelecidos. Os resultados obtidos foram positivos, tanto em relação aos deslocamentos quanto ao consumo de aço, proporcionando segurança, conforto e economia para a obra.

A modelagem e análise foram realizadas de forma eficiente e dinâmica utilizando softwares comerciais, sendo apenas possível com as habilidades adquiridas de modelar e analisar os resultados obtidos corretamente. Considerando as limitações de cada software, foram necessárias algumas validações e adaptações para garantir a precisão dos resultados obtidos.

Dado que a versão utilizada do software Cype3D, inicialmente escolhida, não permitia a análise não linear, optou-se por realizar essa análise em um software alternativo conhecido, o MASTAN2, para verificar a deslocabilidade da estrutura. Após a validação da estrutura como de baixa deslocabilidade, prosseguiu-se com a análise e o dimensionamento utilizando o Cype3D, alcançando resultados satisfatórios conforme a NBR 8800:2008. Esses resultados foram possíveis graças ao conhecimento adquirido durante o curso, que permitiu a aplicação prática nesta magnitude.

### 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Devido as limitações de tempo, foram indicados alguns tópicos que não foram abordados e que é considerado importante também para um entendimento e aplicação completa da análise e dimensionamento. Com isso é proposto as seguintes avaliações:

- Otimização da estrutura, com o intuito de gerar economia e manter segurança;
- Análise e dimensionamento da fundação;
- Análise e dimensionamento completo das ligações;
- Como não existe vinculações totalmente engastadas ou rotuladas na prática, considerar nós semirrígidos para uma simulação real da estrutura para maior precisão.

## REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, jun. 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, dez. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, mar. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5884**: Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico – Requisitos gerais. Rio de Janeiro, out. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7007**: Aços carbono e aços microligados para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, set. 2019.

BELLEI, Ildony H. **Edifícios Industriais em Aço: Projeto e Cálculo**. [S.l.], 1998.

FAKURY, Ricardo H. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. [S.l.], 2016.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático**. Rio de Janeiro, 2009.

D'ALAMBERT, Flavio. **Galpões em Pórticos com Perfis Laminados**. 2. Ed. São Paulo: [s.n.], 2012.

PRAVIA, Zacarias M. C.; DREHMER, Gilnei Artur; JÚNIOR, Enio Mesacasa. **Galpões para Usos Gerais – CBCA (Centro Brasileiros da Construção em Aço)**. 3. Ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2004.

PRAVIA, Zacarias M. C.; DREHMER, Gilnei Artur; JÚNIOR, Enio Mesacasa. **Galpões**

**para Usos Gerais – CBCA (Centro Brasileiros da Construção em Aço).** 4. Ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2018.

PRAVIA, Zacarias M. C. **Programa para cálculo de esforço devido ao vento de edificações com planta retangular e telhado a duas águas, segundo NBR 6123/1988: VisualVentos®v.2.0.2.** Passo Fundo, 2008.

Cype3D Software. **Cype3D - Manual do utilizador – Exemplo prático.**

Ziemian and W. McGuire. MASTAN2. **Tutorial for MASTAN2 – Version 3.0.**

Ftool® - User Guide – PUCRio.

## APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DOS PILARES

Perfil dimensionado: W610x174

- Esbeltez

Para os pilares, foi considerado como pontos engastados, mas com um ponto de translação livre. Sendo assim, conforme NBR 8800 (2008), Tabela E.1, os coeficientes de flambagem por flexão considerados ( $K_x$  e  $K_y$ ) são 1,0, obtendo-se:

$$\lambda_x = \frac{K_x * L_x}{r_x} = \frac{1 * 800}{25,75} = 31,07 < 200 \text{ ok!}$$

$$\lambda_y = \frac{K_y * L_y}{r_y} = \frac{1 * 800}{7,45} = 107,38 < 200 \text{ ok!}$$

- Compressão

Maior solicitação ocorre na Combinação 5 (1,25G + 1,5Q):

$$N_{c,sd} = 222,22 \text{ kN}$$

Conforme Tabela F.1 da NBR 8800 (2008):

- Flambagem local da alma (FLA):

$$\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{572,80}{14} = 40,91$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} = 1,49 * \sqrt{\left(\frac{20000}{34,5}\right)} = 35,87$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) > \left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}}$$

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} = \frac{215,09}{222,80} = 0,97$$



- Flambagem local da mesa (FLM):

$$\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{162,50}{21,60} = 7,52$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} = 0,56 * \sqrt{\left(\frac{E}{f_y}\right)} = 15,84$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) < \left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}}$$

Como os valores de  $\left(\frac{b}{t}\right)$  não ultrapassam os valores limites impostos pela Tabela F.1 da NBR 8800 (2008), não houve fator de redução, com  $Q_s = 1,00$ .

$$\text{Sendo assim, } Q = 0,97 * 1,00 = 0,97$$

Conforme Anexo E da NBR 8800 (2008):

- Flambagem axial elástica:

-Flambagem por flexão no eixo X:

$$N_{\text{ex}} = \frac{(\pi)^2 * 20000 * 147754}{(1 * 800)^2} = 45571,05 \text{ kN}$$

-Flambagem por flexão no eixo Y:

$$N_{\text{ey}} = \frac{(\pi)^2 * 20000 * 12374}{(1 * 800)^2} = 3816,46 \text{ kN}$$

-Flambagem por torção no eixo Z:

$$N_{ez} = \frac{1}{(25,75^2 + 7,45^2)} \left[ \frac{\pi^2 * 20000 * 10915665}{(1 * 260)^2} + 7700 * 286,88 \right]$$

$$= 47422,27 \text{ kN}$$

Com isso:

$$N_e = N_y = 3816,46 \text{ kN}$$

- Esbeltez reduzida  $\lambda_0$ :

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{1 * 222,80 * 34,5}{3816,46}} = 1,42$$

- Fator de redução  $\chi$ :

$$\lambda_0 < 1,5 \rightarrow \chi = 0,658^{1,42^2} = 0,44$$

- Força axial resistente de cálculo  $N_{c,Rd}$ :

$$N_{c,Rd} = \frac{0,44 * 0,97 * 222,8 * 34,5}{1,1} = 2989,57 \text{ kN}$$

Com isso, temos  $N_{c,Rd} > N_{c,Sd} \rightarrow \text{ok!}$

- Tração

Maior solicitação ocorre na Combinação 6 (1G + 1,4W<sub>0</sub>):

$$N_{t,Sd} = 211,61 \text{ kN}$$

$$N_{t,Rd} = \frac{222,8 * 34,5}{1,1} = 6987,82 \text{ kN}$$

Com isso, temos  $N_{t,Rd} > N_{t,Sd} \rightarrow \text{ok!}$

- Cortante

Maior solicitação eixo x ocorre na Combinação 6 (1G+1,4W<sub>0</sub>):

$$V_{Sd,x} = 49,40 \text{ kN}$$

Maior solicitação eixo y ocorre na Combinação 5 (1,25G+1,5Q):

$$V_{Sd,y} = 271,06 \text{ kN}$$

$$\lambda_x = \frac{\frac{325}{2}}{21,6} = 7,52$$

$$\lambda_y = \frac{572,8}{14} = 40,91$$

$$\lambda_{p,x} = 1,1 * \sqrt{\frac{1,2 * 20000}{34,5}} = 29,01$$

$$\lambda_{p,y} = 1,1 * \sqrt{\frac{5 * 20000}{34,5}} = 59,22$$

$$\text{Como } \lambda < \lambda_p \rightarrow V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$V_{pl,x} = 0,6 * A_w * f_y = 0,6 * 140,40 * 34,5 = 2906,28 \text{ kN}$$

$$V_{pl,y} = 0,6 * A_w * f_y = 0,6 * 86,24 * 34,5 = 1785,17 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,x} = \frac{2906,28}{1,1} = 2642,07 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,y} = \frac{1785,17}{1,1} = 1622,88 \text{ kN}$$

Com isso temos, em x e y,  $V_{Rd} > V_{Sd} \rightarrow \text{ok!}$

- Flexão:

Maior solicitação eixo x ocorre na Combinação 7 (1G+1,4W<sub>90</sub>):

$$M_{Sd,x} = 807,35 \text{ kN.m}$$

Maior solicitação eixo y ocorre na Combinação 6 (1G+1,4W<sub>0</sub>):

$$M_{Sd,y} = 14,03 \text{ kN.m}$$

- Momento máximo de cálculo:

$$M_{Rd,x} = \frac{1,5 * 47,97 * 34,5}{1,1} = 2256,87 \text{ kN.m}$$

$$M_{Rd,y} = \frac{1,5 * 7,62 * 34,5}{1,1} = 358,24 \text{ kN.m}$$

- Flambagem local da alma (FLA):

$$\lambda_x = \frac{572,8}{14} = 40,91$$

$$\lambda_{p,x} = 3,76 * \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 90,53$$

$$\lambda_y = \frac{572,8}{14} = 40,91$$

$$\lambda_{r,y} = 1,40 * \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 33,71$$

Como  $\lambda_x < \lambda_{p,x}$ :

$$M_{Rd,x} = \frac{Z_x * f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{53,83 * 34,5}{1,1} = 1688,40 \text{ kN.m}$$

Como  $\lambda_y > \lambda_{r,y}$ :

$$M_{Rd,y} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{761,48^2 * 34,5}{761,48} \leq \frac{1171 * 34,5}{1,1}$$

$$M_{Rd,y} = 238,83 \leq 367,30 \text{ kN.m}$$

$$M_{Rd,y} = 238,83 \text{ kN.m}$$

- Flambagem local da mesa (FLM):

$$\lambda_x = \lambda_y = \frac{325}{21,60} = 7,52$$

$$\lambda_{p,x} = \lambda_{p,y} = 0,38 * \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 9,15$$

Como  $\lambda_x = \lambda_y < \lambda_{p,y}$ :

$$M_{Rd,x} = \frac{Z_x * f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{53,83 * 34,5}{1,1} = 1688,40 \text{ kN.m}$$

$$M_{Rd,y} = \frac{Z_y * f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{11,71 * 34,5}{1,1} = 367,30 \text{ kN.m}$$

- Flambagem lateral com torção (FLT):

$$\lambda_x = \frac{260}{7,45} = 34,89$$

$$\lambda_{p,x} = 1,76 * \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 42,38$$

Como  $\lambda_x < \lambda_{p,x}$

$$M_{Rd,x} = \frac{Z_x * f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{53,83 * 34,5}{1,1} = 1688,40 \text{ kN.m}$$

Resultando em:

$$M_{Rd,x} = 1688,40 \text{ kN.m}$$

$$M_{Rd,y} = 238,83 \text{ kN.m}$$

Com isso temos  $M_{Rd,x} > M_{Sd,x}$  e  $M_{Rd,y} > M_{Sd,y} \rightarrow \text{ok!}$

- Flexocompressão:

Como  $\frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} = \frac{191,66}{5063,64} = 0,04 < 0,2$  temos:

$$\frac{260,84}{2 * 3074,64} + \left( \frac{1148,68}{1688,40} + \frac{3,24}{238,83} \right) = 0,74 < 1$$

Verificação ok!

## APÊNDICE B – DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS

Perfil dimensionado: W610x125

- Esbeltez

Para as vigas, foi considerado como nós engastados. Sendo assim, conforme NBR 8800 (2008), Tabela E.1, os coeficientes de flambagem por flexão considerados ( $K_x$  e  $K_y$ ) são 1,0, obtendo-se:

$$\lambda_x = \frac{K_x * L_x}{r_x} = \frac{1 * 2300}{24,89} = 92,40 < 200 \text{ ok!}$$

$$\lambda_y = \frac{K_y * L_y}{r_y} = \frac{1 * 500}{4,96} = 100,90 < 200 \text{ ok!}$$

- Compressão

Maior solicitação ocorre na Combinação 5 (1,25G + 1,5Q):

$$N_{c,Sd} = 223,52 \text{ kN}$$

Conforme Tabela F.1 da NBR 8800 (2008):

- Flambagem local da alma (FLA):

$$\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{573}{12,7} = 45,12$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} = 1,49 * \sqrt{\left(\frac{20000}{34,5}\right)} = 35,87$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) > \left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}}$$

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} = \frac{146,27}{160,10} = 0,91$$

- Flambagem local da mesa (FLM):

$$\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{\frac{229}{2}}{19,60} = 5,84$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} = 0,56 * \sqrt{\left(\frac{E}{f_y}\right)} = 15,84$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) < \left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}}$$

Como os valores de  $\left(\frac{b}{t}\right)$  não ultrapassam os valores limites impostos pela Tabela F.1 da NBR 8800 (2008), não houve fator de redução, sendo assim  $Q_s = 1,00$ .

Sendo assim,  $Q = 1,00 * 0,91 = 0,91$

Conforme Anexo E da NBR 8800 (2008):

- Flambagem axial elástica:

-Flambagem por flexão no eixo X:

$$N_{\text{ex}} = \frac{(\pi)^2 * 20000 * 99184}{(1 * 2300)^2} = 3700,97 \text{ kN}$$

-Flambagem por flexão no eixo Y:

$$N_{\text{ey}} = \frac{(\pi)^2 * 20000 * 3933}{(1 * 500)^2} = 3105,37 \text{ kN}$$

-Flambagem por torção no eixo Z:

$$N_{\text{ez}} = \frac{1}{(25,58^2 + 7,38^2)} \left[ \frac{\pi^2 * 20000 * 9436714}{(1 * 0)^2} + 7700 * 200,77 \right]$$



Com isso:

$$N_e = N_y = 3105,37 \text{ kN}$$

○ Esbeltez reduzida  $\lambda_0$ :

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{0,91 * 160,10 * 34,5}{3105,37}} = 1,28$$

○ Fator de redução  $\chi$ :

$$\lambda_0 < 1,5 \rightarrow \chi = 0,658^{1,28^2} = 0,51$$

○ Força axial resistente de cálculo  $N_{c,Rd}$ :

$$N_{c,Rd} = \frac{0,51 * 091 * 161,10 * 34,5}{1,1} = 2323,76 \text{ kN}$$

Com isso, temos  $N_{c,Rd} > N_{c,Sd} \rightarrow \text{ok!}$

• Tração

Maior sollicitação ocorre na Combinação 7 (1G + 1,4W<sub>0</sub>):

$$N_{t,Sd} = 317,83 \text{ kN}$$

$$N_{t,Rd} = \frac{160,10 * 34,5}{1,1} = 5021,32 \text{ kN}$$

Com isso, temos  $N_{t,Rd} > N_{t,Sd} \rightarrow \text{ok!}$

• Cortante

Maior sollicitação eixo x ocorre na Combinação 6 (1G+1,4W<sub>0</sub>):

$$V_{Sd,x} = 46,20 \text{ kN}$$

Maior sollicitação eixo y ocorre na Combinação 5 (1,25G+1,5Q):

$$V_{Sd,y} = 172,51 \text{ kN}$$

$$\lambda_x = \frac{\frac{229}{2}}{19,6} = 5,84$$

$$\lambda_y = \frac{572,80}{11,90} = 48,13$$

$$\lambda_{p,x} = 1,1 * \sqrt{\frac{1,2 * 20000}{34,5}} = 29,01$$

$$\lambda_{p,y} = 1,1 * \sqrt{\frac{5 * 20000}{34,5}} = 59,22$$

$$\text{Como } \lambda < \lambda_p \rightarrow V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$V_{pl,x} = 0,6 * A_w * f_y = 0,6 * 89,77 * 34,5 = 1858,20 \text{ kN}$$

$$V_{pl,y} = 0,6 * A_w * f_y = 0,6 * 72,83 * 34,5 = 1507,54 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,x} = \frac{1858,20}{1,1} = 1689,27 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,y} = \frac{1507,54}{1,1} = 1370,49 \text{ kN}$$

Com isso temos, em x e y,  $V_{Rd} > V_{Sd} \rightarrow \text{ok!}$

- Flexão:

Maior sollicitação eixo x ocorre na Combinação 5 (1,25G+1,5Q):

$$M_{Sd,x} = 758,99 \text{ kN.m}$$

Maior sollicitação eixo y ocorre na Combinação 4 (1,25G+1,4W<sub>90</sub>):

$$M_{sd,y} = 18,50. m$$

- Momento máximo de cálculo:

$$M_{Rd,x} = \frac{1,5 * 32,41 * 34,5}{1,1} = 1524,89 \text{ kN.m}$$

$$M_{Rd,y} = \frac{1,5 * 3,43 * 34,5}{1,1} = 161,60 \text{ kN.m}$$

- Flambagem local da alma (FLA):

$$\lambda_x = \frac{572,80}{11,90} = 48,13$$

$$\lambda_{p,x} = 3,76 * \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 90,53$$

$$\lambda_y = \frac{572,80}{11,90} = 48,13$$

$$\lambda_{r,y} = 1,40 * \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 33,71$$

Como  $\lambda_x < \lambda_{p,x}$ :

$$M_{Rd,x} = \frac{Z_x * f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{36,97 * 34,5}{1,1} = 1159,61 \text{ kN.m}$$

Como  $\lambda_y > \lambda_{r,y}$ :

$$M_{Rd,y} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} = \frac{\frac{343,49^2}{343,49} * 34,5}{1,1} \leq \frac{1022,60 * 34,5}{1,1}$$

$$M_{Rd,y} = 107,73 \leq 168,20 \text{ kN.m}$$

$$M_{Rd,y} = 107,73 \text{ kN.m}$$

- Flambagem local da mesa (FLM):

$$\lambda_x = \lambda_y = \frac{\frac{229}{2}}{19,60} = 5,84$$

$$\lambda_{p,x} = \lambda_{p,y} = 0,38 * \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 9,15$$

Como  $\lambda_x = \lambda_y < \lambda_{p,y}$ :

$$M_{Rd,x} = \frac{Z_x * f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{36,97 * 34,5}{1,1} = 1159,61 \text{ kN.m}$$

$$M_{Rd,y} = \frac{Z_y * f_y}{\gamma_{a1}} = \frac{5,36 * 34,5}{1,1} = 168,20 \text{ kN.m}$$

o Flambagem lateral com torção (FLT):

$$\lambda_x = \frac{500}{4,96} = 100,88$$

$$\lambda_{p,x} = 1,76 * \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 42,38$$

$$\lambda_{r,x} = \frac{1,38 * \sqrt{3933 * 159,50}}{4,96 * 159,50 * 0,025} * \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 * 34417,66 * 0,025^2}{3933}}}$$

$$= 124,75$$

Como  $\lambda_x < \lambda_{r,x}$

$$M_{Rd,x} = \frac{1}{1,1} * \left[ 1275,57 - (1275,57 - 782,78) * \frac{100,88 - 42,38}{124,75 - 42,38} \right]$$

$$\leq 1159,61$$

$$M_{Rd,x} = 841,44 \leq 1159,61$$

Resultando em:

$$M_{Rd,x} = 841,44 \text{ kN.m}$$

$$M_{Rd,y} = 107,73 \text{ kN.m}$$

Com isso temos  $M_{Rd,x} > M_{Sd,x}$  e  $M_{Rd,y} > M_{Sd,y} \rightarrow \text{ok!}$

- Flexotração:

Temos a pior combinação para flexo tração na combinação 6 (1G+1,4W<sub>0</sub>):

Como  $\frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} = \frac{252,62}{5021,32} = 0,05 < 0,2$  temos:

$$\frac{252,62}{2 * 5021,32} + \left( \frac{722,66}{841,44} + \frac{8,26}{107,73} \right) = 0,96 < 1$$

Verificação ok!

## APÊNDICE C – DIMENSIONAMENTO DAS LIGAÇÕES PARAFUSADAS

O galpão possui 3 pontos de ligações entre as peças, sendo nas placas de base, entre pilares e vigas, e por fim na cumeeira conectando as duas vigas.

Por questões executivas, optou-se por um diâmetro de parafuso e verificado sua resistência, quantidades necessárias e se estavam dentro de uma quantidade razoável. O diâmetro adotado e verificado foi o de 5/8" ou 15,88 mm.

$$F_{Rd,v} = \frac{0,4 * 198,06 * 10^{-2} * 63,5}{1,35} = 37,26 \text{ kN}$$

- Pilar-Viga

$$F_{v,Sd} = 248,04 \text{ kN}$$
$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} = \frac{248,04}{37,26} = 7,24 \rightarrow 8 \text{ parafusos.}$$

- Viga-Viga (cumeeira)

$$F_{v,Sd} = 105,96 \text{ kN}$$
$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} = \frac{111,63}{37,26} = 2,84 \rightarrow 4 \text{ parafusos.}$$

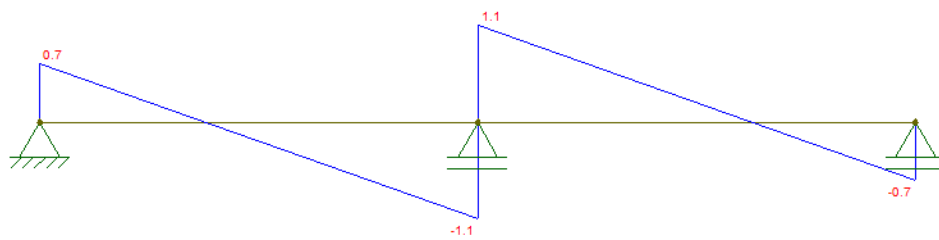
Optou-se por 4 parafusos em vez de 3 para ficar com a mesma quantidade de cada lado do perfil.

## APÊNDICE D – DIMENSIONAMENTO DAS TERÇAS

Combinações utilizadas:

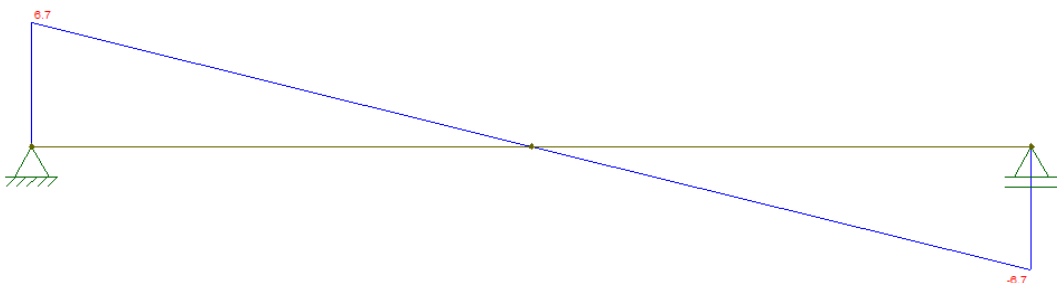
- $F_{d1,terças} = 1,25 * F_G + 1,5 * F_{Q1}$
- $F_{d2,terças} = 1,00 * F_G + 1,4 * W_{90}(C_{pi} = 0,2)$
- $F_{d3,terças} = 1,25 * F_G + 1,00 kN$
  
- $G = Q = 0,25 * 2,5 = 0,63 kN/m$
- $W_{90}(C_{pi} = 0,2) = -1,20 * 1,05 * 2,5 = -2,58 kN/m$
  
- Combinação 1 ( $F_{d1}$ ):

Figura 32 – Cortante x.



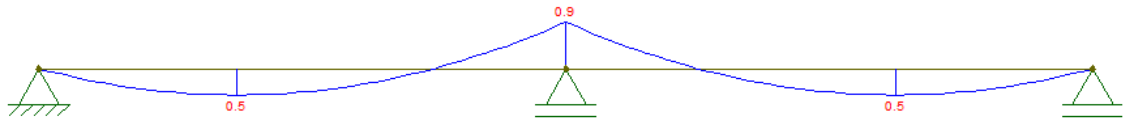
Fonte: Autor.

Figura 33 – Cortante y.



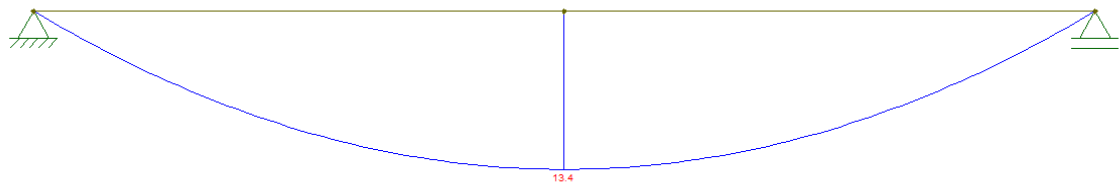
Fonte: Autor.

Figura 34 – Momento fletor x.



Fonte: Autor.

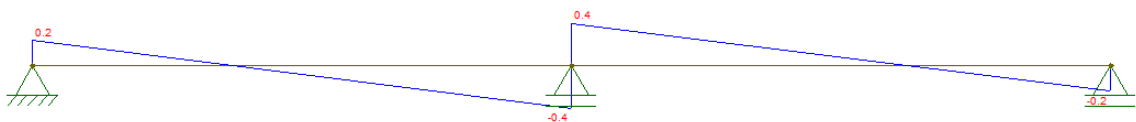
Figura 35 – Momento fletor y.



Fonte: Autor.

- Combinação 2 ( $F_{d2}$ ):

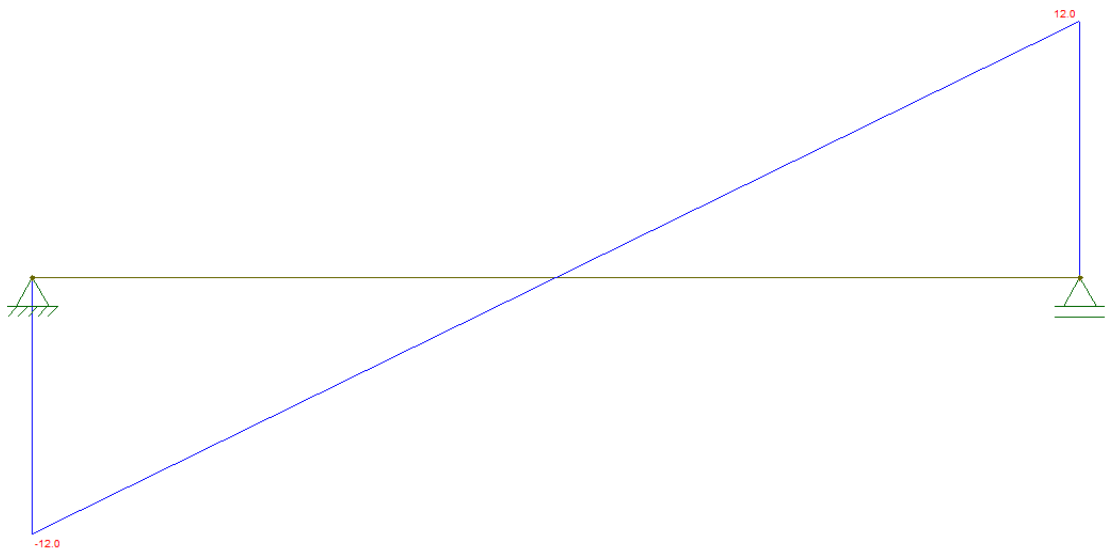
Figura 36 – Cortante x.



Fonte: Autor.

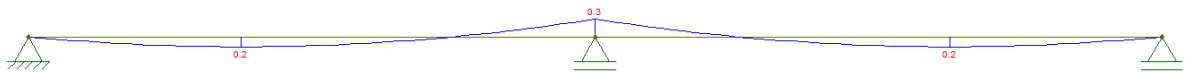
Figura 37 – Cortante y.





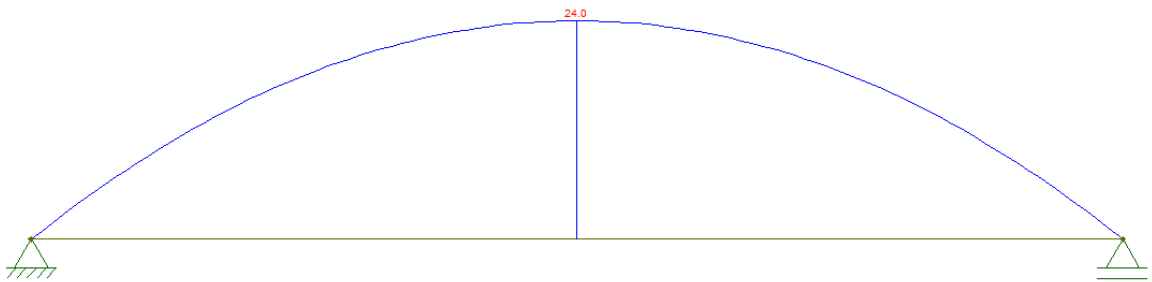
Fonte: Autor.

Figura 38 – Momento fletor x.



Fonte: Autor.

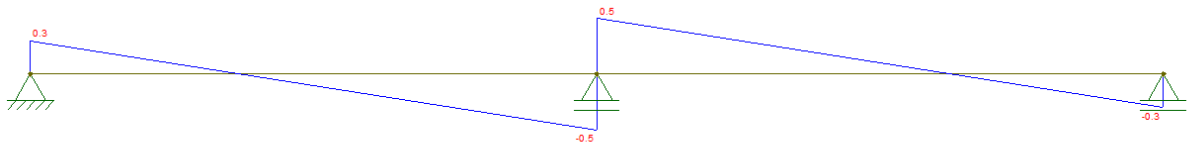
Figura 39 – Momento fletor y.



Fonte: Autor.

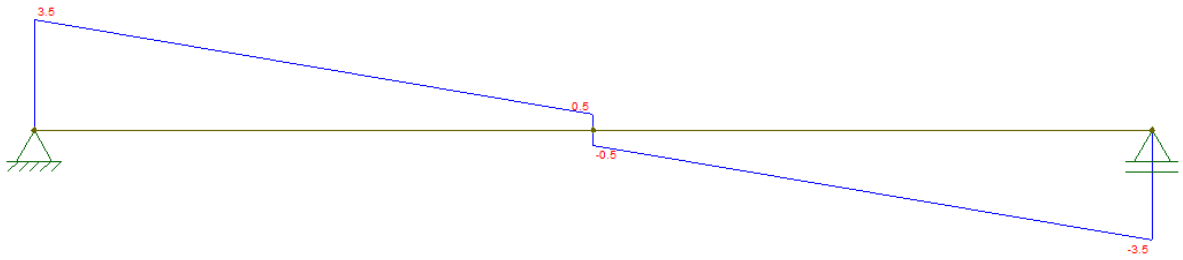
- Combinação 3 ( $F_{d3}$ ):

Figura 40 – Cortante x.



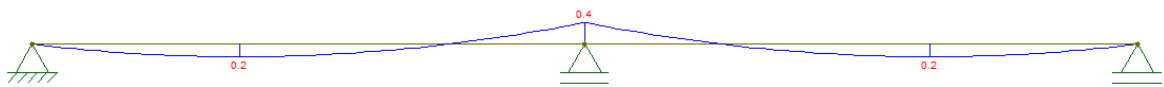
Fonte: Autor.

Figura 41 – Cortante y.



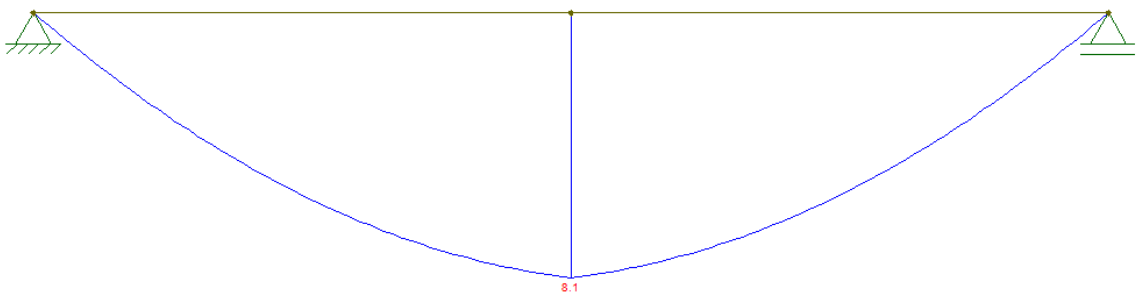
Fonte: Autor.

Figura 42 – Momento fletor x.



Fonte: Autor.

Figura 43 – Momento fletor y.



Fonte: Autor.

-Perfil dimensionado: U 254,0 x 6,1

- Cortante:

Em x:

$$\lambda = \frac{66,04}{11,1} = 5,95$$

$$\lambda_p = 1,10 * \sqrt{\frac{1,2 * 20000}{34,5}} = 29,01$$

$$\lambda < \lambda_p$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 * 14,66 * 34,5}{1,1} = 275,89 \text{ kN}$$

Então:

$$V_{Rd} > V_{Sd} = 1,1 \text{ kN} \rightarrow \text{ok!}$$

Em y:

$$\lambda = \frac{231,80}{6,10} = 38,00$$

$$\lambda_p = 1,10 * \sqrt{\frac{5 * 20000}{34,5}} = 59,22$$

$$\lambda < \lambda_p$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 * 15,49 * 34,5}{1,1} = 291,57 \text{ kN}$$

Então:

$$V_{Rd} > V_{Sd} = 12,00 \text{ kN} \rightarrow \text{ok!}$$

- Flexão:

No eixo x:

Momento máximo:

$$M_{Rd} = \frac{1,50 * 220,47 * 34,5}{1,1} = 103,72 \text{ kN}$$

FLA:

$$\lambda = \frac{231,80}{6,10} = 38,00$$

$$\lambda_p = 3,36 * \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 90,53$$

$$\lambda < \lambda_p$$

$$M_{Rd} = \frac{2,60 * 34,5}{1,1} = 81,54 \text{ kN.m}$$

FLM:

$$\lambda = \frac{66,04}{11,10} = 5,95$$

$$\lambda_p = 0,38 * \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 9,15$$

$$\lambda < \lambda_p$$

$$M_{Rd} = \frac{2,60 * 34,5}{1,1} = 81,54 \text{ kN.m}$$

FLT:

$$\lambda = \frac{400}{2,01} = 198,40$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 * \sqrt{95 * 7,78}}{2,01 * 7,78 * 3,4} * \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 * 12331 * 3,4}{95}}} = 140,54$$

$$\lambda < \lambda_r$$

$$M_{Rd} = \frac{1 * \pi^2 * 20000 * 95}{1,1 * 400^2} * \sqrt{\frac{12331}{95} * \left(1 + 0,039 * \frac{7,78 * 400^2}{12331}\right)}$$

$$= 26,97 \text{ kN.m}$$

Então:

$$M_{Rd} = 26,97 \text{ kN.m}$$

$$M_{Rd} > M_{Sd} = 24,00 \text{ kN.m}$$

No eixo y:

Momento máximo:

$$M_{Rd} = \frac{1,50 * 19,90 * 34,5}{1,1} = 9,36 \text{ kN}$$

FLA:

$$\lambda = \frac{231,80}{6,10} = 38,00$$

$$\lambda_r = 1,40 * \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 33,71$$

$$\lambda > \lambda_r$$

$$M_{Rd} = \frac{19,73^2 * 34,5}{1,1 * 19,90} = 6,14 \text{ kN.m}$$

FLM:

$$\lambda = \frac{66,04}{11,10} = 5,95$$

$$\lambda_p = 0,38 * \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 9,15$$

$$\lambda < \lambda_p$$

$$M_{Rd} = \frac{0,45 * 34,5}{1,1} = 13,98 \text{ kN.m}$$

Então:

$$M_{Rd} = 6,14 \text{ kN.m}$$

$$M_{Rd} > M_{Sd} = 0,9 \text{ kN.m}$$

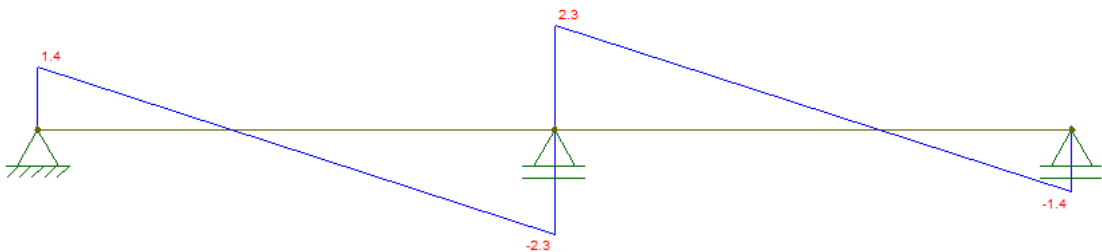
## APÊNDICE E – DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS DE TAPAMENTO

A seção e os procedimentos de cálculos são os mesmos utilizados para as terças, sendo assim apresentado as hipóteses e resultados a seguir.

Combinações utilizadas:

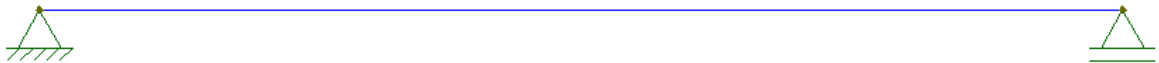
- $F_{d1,vt} = 1,25 * F_G + 1,5 * F_{Q1}$
- $F_{d2,vt} = 1,00 * F_G + 1,4 * W_0(C_{pi} = 0,2)$
  
- $G = Q = 0,12 * 2,7 = 0,33 \text{ kN/m}$
- $W_0(C_{pi} = 0,2) = -1,00 * 1,05 * 2,7 = -2,84 \text{ kN/m}$
  
- Combinação 1 ( $F_{d1}$ ):

Figura 44 – Cortante x.



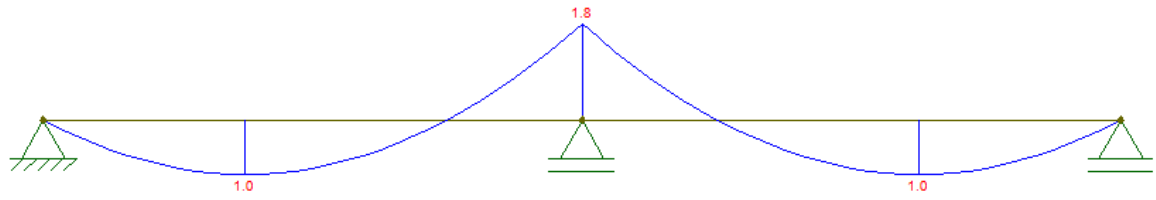
Fonte: Autor.

Figura 45 – Cortante y.



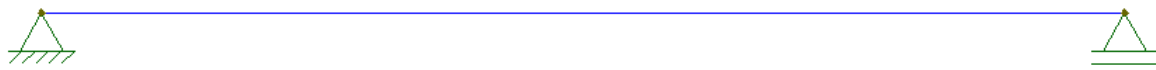
Fonte: Autor.

Figura 46 – Momento fletor x.



Fonte: Autor.

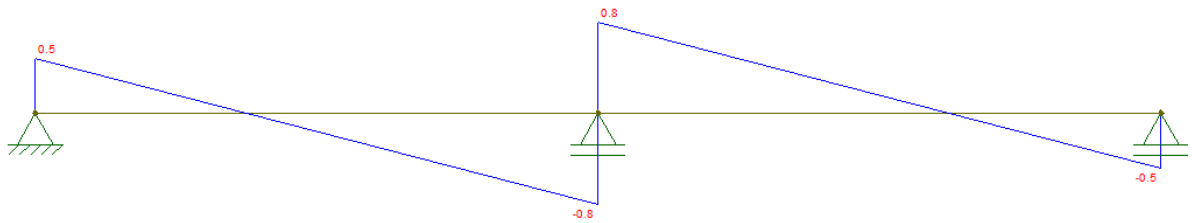
Figura 47 – Momento fletor y.



Fonte: Autor.

- Combinação 2 ( $F_{d2}$ ):

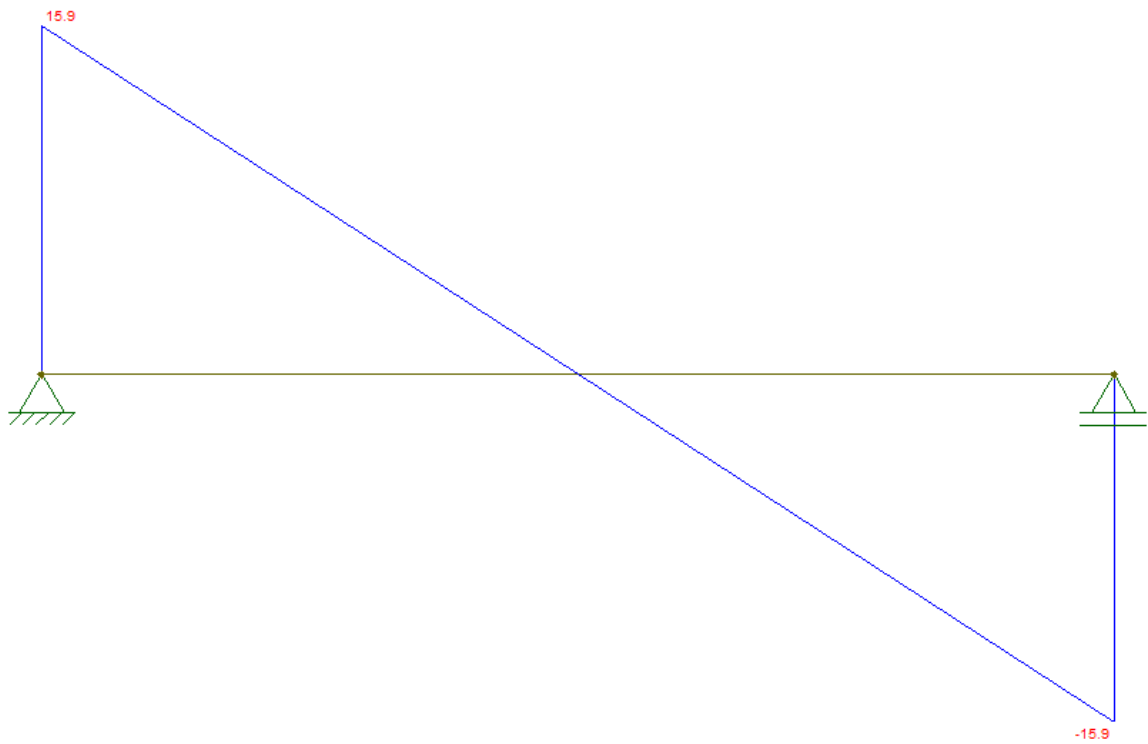
Figura 48 – Cortante x.



Fonte: Autor.

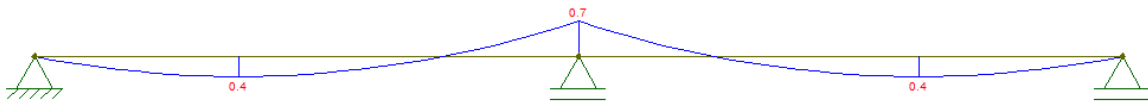
Figura 49 – Cortante y.





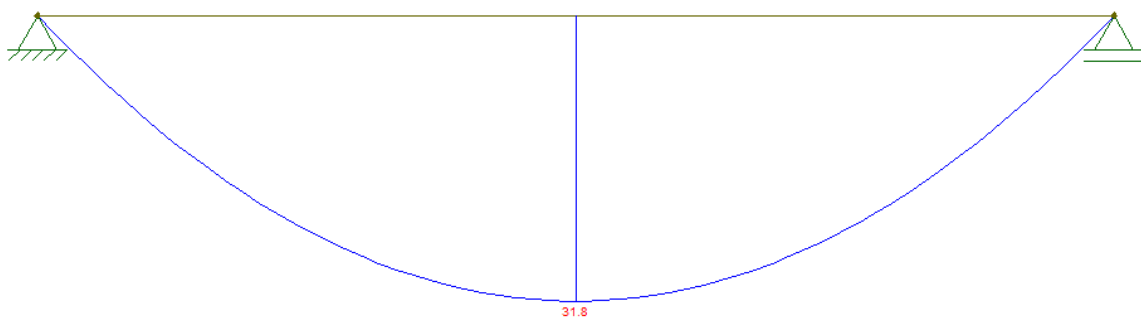
Fonte: Autor.

Figura 50 – Momento fletor x.



Fonte: Autor.

Figura 51 – Momento fletor y.



Fonte: Autor.

- Cortante

$$V_{Sd,x} = 2,30 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,x} = 275,89 \text{ kN}$$

$$V_{Sd,y} = 15,90 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,y} = 291,57 \text{ kN}$$

- Flexão:

$$M_{Sd,x} = 1,80 \text{ kN}$$

$$M_{Rd,x} = 6,14 \text{ kN}$$

$$M_{Sd,y} = 36,97 \text{ kN}$$

$$M_{Rd,y} = 31,8 \text{ kN}$$

## APÊNDICE F – DIMENSIONAMENTO DOS CONTRAVENTAMENTOS

Contraventamento em formato de X.

-Cobertura:

- Diâmetro dimensionado:  $\varnothing 22,25$  mm

$$F_{contrav} = 1,40 * \left( 13,89 * \frac{5}{2} \right) * 1,05 = 51,05 \text{ kN}$$

$$N_{t,sd} = \frac{51,05}{\cos 32^\circ} = 60,20 \text{ kN}$$

- Seção bruta:

$$F_{Rd,b} = \frac{\frac{\pi * (22,25 * 10^{-1})^2}{4} * 34,5}{1,1} = 121,95 \text{ kN}$$

-Seção líquida:

$$F_{Rd,b} = \frac{0,75 \frac{\pi * (22,25 * 10^{-1})^2}{4} * 45}{1,35} = 129,61 \text{ kN}$$

Com isso, temos  $F_{Rd,b} > N_{t,sd} \rightarrow ok!$

-Vertical:

- Diâmetro dimensionado:  $\varnothing 38,10$  mm

$$F_{contrav} = 1,40 * \frac{240,41}{2} * 1,05 = 176,98 \text{ kN}$$

$$N_{t,sd} = \frac{176,98}{\cos 45^\circ} = 249,89 \text{ kN}$$

- Seção bruta:

$$F_{Rd,b} = \frac{\frac{\pi * (38,10 * 10^{-1})^2}{4} * 34,5}{1,1} = 357,57 \text{ kN}$$

-Seção líquida:

$$F_{Rd,b} = \frac{0,75 * \frac{\pi * (38,10 * 10^{-1})^2}{4} * 45}{1,35} = 285,02 \text{ kN}$$

Com isso, temos  $F_{Rd,b} > N_{t,Sd} \rightarrow ok!$

Contraventamento em formato de Y.

Diâmetro adotado para todos  $\varnothing 15,88$ .

Cobertura:

$$F_{contrav} = 1,25 * 0,12 * \frac{8}{2} + 1,5 * 0,25 * \frac{8}{2} = 2,10 \text{ kN/m}$$

$$F_{contrav,N} = 2,10 * \text{sen}15^\circ = 0,54 \text{ kN/m}$$

$$F_{T1} = \frac{0,54 * (20,01 + 4,69)}{\text{sen}31,38^\circ} = 12,81 \text{ kN}$$

$$F_{T2} = 0,54 * 20,01 = 10,81 \text{ kN}$$

- Seção bruta:

$$F_{Rd,b} = \frac{\frac{\pi * (15,88 * 10^{-1})^2}{4} * 34,5}{1,1} = 62,12 \text{ kN}$$

-Seção líquida:

$$F_{Rd,b} = \frac{0,75 * \frac{\pi * (15,88 * 10^{-1})^2}{4} * 45}{1,35} = 49,51 \text{ kN}$$

Com isso, temos  $F_{Rd,b} > F_{T1} > F_{T2} \rightarrow ok!$

Vertical:

$$F_{contrav} = 1,25 * 0,12 * \frac{8}{2} = 0,60 \text{ kN/m}$$

$$F_{T1} = \frac{0,60 * (6,49 + 4,26)}{2 \cdot \text{sen}20,11^\circ} = 9,38 \text{ kN}$$

$$F_{T2} = 0,60 * 6,49 = 3,90 \text{ kN}$$

- Seção bruta:

$$F_{Rd,b} = \frac{\frac{\pi * (15,88 * 10^{-1})^2}{4} * 34,5}{1,1} = 62,12 \text{ kN}$$

-Seção líquida:

$$F_{Rd,b} = \frac{0,75 * \frac{\pi * (15,88 * 10^{-1})^2}{4} * 45}{1,35} = 49,51 \text{ kN}$$

Com isso, temos  $F_{Rd,b} > F_{T1} > F_{T2} \rightarrow ok!$

Escoras de compressão:

Conforme 5.6.3:

$$F_{esc} = 1,4 * 84,19 * 1,05 = 123,76 \text{ kN}$$

Perfil utilizado: 2U203,2x7,7 (I)

Conforme Tabela F.1 da NBR 8800 (2008):

- Flambagem local da alma (FLA):

$$\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{241,80}{6,10} = 39,64$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} = 1,40 * \sqrt{\left(\frac{20000}{34,5}\right)} = 35,87$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) > \left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}}$$

$$b_{ef} = 1,92 * 6,10 * \sqrt{\left(\frac{20000}{34,5}\right)} * \left[1 - \frac{0,38}{\frac{241,80}{6,10}} * \sqrt{\left(\frac{20000}{34,5}\right)}\right]$$

$$= 216,90 \text{ mm}$$

- Flambagem local da mesa (FLM):

$$\left(\frac{b}{t}\right) = \frac{109,88}{11,10} = 9,90$$

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}} = 1,49 * \sqrt{\left(\frac{20000}{34,5}\right)} = 9,90$$

$$\left(\frac{b}{t}\right) < \left(\frac{b}{t}\right)_{\text{lim}}$$

Dos elementos da seção transversal, apenas da alma tiveram (b/t) maior que os valores limites, tem-se  $Q = Q_a$ .

$$\text{Sendo assim, } Q = Q_a = \frac{54,56}{57,60} = 0,95$$

Conforme Anexo E da NBR 8800 (2008):

- Flambagem axial elástica:

-Flambagem por flexão no eixo X:

$$N_{ex} = \frac{(\pi)^2 * 20000 * 5594,25}{(1 * 800)^2} = 1725,41 \text{ kN}$$

-Flambagem por flexão no eixo Y:

$$N_{ey} = \frac{(\pi)^2 * 20000 * 1549,21}{(1 * 800)^2} = 477,81 \text{ kN}$$

-Flambagem por torção no eixo Z:

$$N_{ez} = \frac{1}{(9,85^2 + 5,19^2)} \left[ \frac{\pi^2 * 20000 * 0}{(1 * 800)^2} + 7700 * 3671,36 \right]$$

$$= 227951,17 \text{ kN}$$

Com isso:

$$N_e = N_y = 477,81 \text{ kN}$$

○ Esbeltez reduzida  $\lambda_0$ :

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{0,95 * 57,60 * 34,5}{477,81}} = 1,99$$

○ Fator de redução  $\chi$ :

$$\lambda_0 > 1,5 \rightarrow \chi = \frac{0,877}{1,99^2} = 0,22$$

○ Força axial resistente de cálculo  $N_{c,Rd}$ :

$$N_{c,Rd} = \frac{0,22 * 0,95 * 57,60 * 34,5}{1,1} = 380,95 \text{ kN}$$

Com isso, temos  $N_{c,Rd} > N_{c,Sd} \rightarrow \text{ok!}$

## APÊNDICE G – CATÁLOGOS

Tabela 20 – Perfil I.

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b <sub>f</sub> mm	ESPESSURA			d'	Área cm <sup>2</sup>	EIXO X - X				EIXO Y - Y			u m <sup>2</sup> /m	Bitola in x lb/ft
				t <sub>w</sub> mm	t <sub>f</sub> mm	h mm			I <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>x</sub> cm	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>	r <sub>y</sub> cm			
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	635	85,8	6,18	82	16,4	2,22	0,67	W 6 x 8,5	
W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	939	122,8	6,34	126	24,7	2,32	0,69	W 6 x 12	
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0	1.229	161,7	6,51	387	50,9	3,65	0,88	W 6 x 15	
W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	1.384	173,0	6,63	183	35,9	2,41	0,69	W 6 x 16	
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5	1.739	221,5	6,72	556	72,6	3,80	0,90	W 6 x 20	
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8	2.244	277,0	6,85	707	91,8	3,84	0,91	W 6 x 25	
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	1.305	130,5	8,20	87	17,4	2,12	0,77	W 8 x 10	
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	1.686	166,1	8,19	116	22,7	2,14	0,79	W 8 x 13	
W 200 x 22,5	22,5	206	102	6,2	8,0	190	170	29,0	2.029	197,0	8,37	142	27,9	2,22	0,79	W 8 x 15	
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	190	170	34,2	2.611	252,3	8,73	330	49,6	3,10	0,92	W 8 x 18	
W 200 x 31,3	31,3	210	134	6,4	10,2	190	170	40,3	3.168	301,7	8,86	410	61,2	3,19	0,93	W 8 x 21	
W 200 x 35,9 (H)	35,9	201	165	6,2	10,2	181	161	45,7	3.437	342,0	8,67	764	92,6	4,09	1,03	W 8 x 24	
W 200 x 41,7 (H)	41,7	205	166	7,2	11,8	181	157	53,5	4.114	401,4	8,77	901	108,5	4,10	1,04	W 8 x 28	
W 200 x 46,1 (H)	46,1	203	203	7,2	11,0	181	161	58,6	4.543	447,6	8,81	1.535	151,2	5,12	1,19	W 8 x 31	
W 200 x 52,0 (H)	52,0	206	204	7,9	12,6	181	157	66,9	5.298	514,4	8,90	1.784	174,9	5,16	1,19	W 8 x 35	
HP 200 x 53,0 (H)	53,0	204	207	11,3	11,3	181	161	68,1	4.977	488,0	8,55	1.673	161,7	4,96	1,20	HP 8 x 36	
W 200 x 59,0 (H)	59,0	210	205	9,1	14,2	182	158	76,0	6.140	584,8	8,99	2.041	199,1	5,18	1,20	W 8 x 40	
W 200 x 71,0 (H)	71,0	216	206	10,2	17,4	181	161	91,0	7.660	709,2	9,17	2.537	246,3	5,28	1,22	W 8 x 48	
W 200 x 86,0 (H)	86,0	222	209	13,0	20,6	181	157	110,9	9.498	855,7	9,26	3.139	300,4	5,32	1,23	W 8 x 58	
W 250 x 17,9	17,9	251	101	4,8	5,3	240	220	23,1	2.291	182,6	9,96	91	18,1	1,99	0,88	W 10 x 12	
W 250 x 22,3	22,3	254	102	5,8	6,9	240	220	28,9	2.939	231,4	10,09	123	24,1	2,06	0,89	W 10 x 15	
W 250 x 25,3	25,3	257	102	6,1	8,4	240	220	32,6	3.473	270,2	10,31	149	29,3	2,14	0,89	W 10 x 17	
W 250 x 28,4	28,4	260	102	6,4	10,0	240	220	36,6	4.046	311,2	10,51	178	34,8	2,20	0,90	W 10 x 19	
W 250 x 32,7	32,7	258	146	6,1	9,1	240	220	42,1	4.937	382,7	10,83	473	64,8	3,35	1,07	W 10 x 22	
W 250 x 38,5	38,5	262	147	6,6	11,2	240	220	49,6	6.057	462,4	11,05	594	80,8	3,46	1,08	W 10 x 26	
W 250 x 44,8	44,8	266	148	7,6	13,0	240	220	57,6	7.158	538,2	11,15	704	95,1	3,50	1,09	W 10 x 30	
HP 250 x 62,0 (H)	62,0	246	256	10,5	10,7	225	201	79,6	8.728	709,6	10,47	2.995	234,0	6,13	1,47	HP 10 x 42	
W 250 x 73,0 (H)	73,0	253	254	8,6	14,2	225	201	92,7	11.257	889,9	11,02	3.880	305,5	6,47	1,48	W 10 x 49	
W 250 x 80,0 (H)	80,0	256	255	9,4	15,6	225	201	101,9	12.550	980,5	11,10	4.313	338,3	6,51	1,49	W 10 x 54	
HP 250 x 85,0 (H)	85,0	254	260	14,4	14,4	225	201	108,5	12.280	966,9	10,64	4.225	325,0	6,24	1,50	HP 10 x 57	
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	4.841	378,2	6,52	1,50	W 10 x 60	
W 250 x 101,0 (H)	101,0	264	257	11,9	19,6	225	201	128,7	16.352	1.238,8	11,27	5.549	431,8	6,57	1,51	W 10 x 68	
W 250 x 115,0 (H)	115,0	269	259	13,5	22,1	225	201	146,1	18.920	1.406,7	11,38	6.405	494,6	6,62	1,53	W 10 x 77	
W 310 x 21,0	21,0	303	101	5,1	5,7	292	272	27,2	3.776	249,2	11,77	98	19,5	1,90	0,98	W 12 x 14	
W 310 x 23,8	23,8	305	101	5,6	6,7	292	272	30,7	4.346	285,0	11,89	116	22,9	1,94	0,99	W 12 x 16	
W 310 x 28,3	28,3	309	102	6,0	8,9	291	271	36,5	5.500	356,0	12,28	158	31,0	2,08	1,00	W 12 x 19	
W 310 x 32,7	32,7	313	102	6,6	10,8	291	271	42,1	6.570	419,8	12,49	192	37,6	2,13	1,00	W 12 x 22	
W 310 x 38,7	38,7	310	165	5,8	9,7	291	271	49,7	8.581	553,6	13,14	727	88,1	3,82	1,25	W 12 x 26	
W 310 x 44,5	44,5	313	166	6,6	11,2	291	271	57,2	9.997	638,8	13,22	855	103,0	3,87	1,26	W 12 x 30	
W 310 x 52,0	52,0	317	167	7,6	13,2	291	271	67,0	11.909	751,4	13,33	1.026	122,9	3,91	1,27	W 12 x 35	
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	5.258	343,7	7,25	1,77	HP 12 x 53	
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	6.387	414,7	7,32	1,78	HP 12 x 63	
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	7.286	477,8	7,68	1,79	W 12 x 65	
W 310 x 107,0 (H)	107,0	311	306	10,9	17,0	277	245	136,4	24.839	1.597,3	13,49	8.123	530,9	7,72	1,80	W 12 x 72	
HP 310 x 110,0 (H)	110,0	308	310	15,4	15,5	277	245	141,0	23.703	1.539,1	12,97	7.707	497,3	7,39	1,80	HP 12 x 74	
W 310 x 117,0 (H)	117,0	314	307	11,9	18,7	277	245	149,9	27.563	1.755,6	13,56	9.024	587,9	7,76	1,80	W 12 x 79	
HP 310 x 125,0 (H)	125,0	312	312	17,4	17,4	277	245	159,0	27.076	1.735,6	13,05	8.823	565,6	7,45	1,81	HP 12 x 84	
W 360 x 32,9	32,9	349	127	5,8	8,5	332	308	42,1	8.358	479,0	14,09	291	45,9	2,63	1,17	W 14 x 22	
W 360 x 39,0	39,0	353	128	6,5	10,7	332	308	50,2	10.331	585,3	14,35	375	58,6	2,73	1,18	W 14 x 26	
W 360 x 44,6	44,6	352	171	6,9	9,8	332	308	57,7	12.258	696,5	14,58	818	95,7	3,77	1,35	W 14 x 30	
W 360 x 51,0	51,0	355	171	7,2	11,6	332	308	64,8	14.222	801,2	14,81	968	113,3	3,87	1,36	W 14 x 34	
W 360 x 58,0	58,0	358	172	7,9	13,1	332	308	72,5	16.143	901,8	14,92	1.113	129,4	3,92	1,37	W 14 x 38	
W 360 x 64,0	64,0	347	203	7,7	13,5	320	288	81,7	17.890	1.031,1	14,80	1.885	185,7	4,80	1,46	W 14 x 43	
W 360 x 72,0	72,0	350	204	8,6	15,1	320	288	91,3	20.169	1.152,5	14,86	2.140	209,8	4,84	1,47	W 14 x 48	
W 360 x 79,0	79,0	354	205	9,4	16,8	320	288	101,2	22.713	1.283,2	14,98	2.416	235,7	4,89	1,48	W 14 x 53	
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	4.483	353,0	6,22	1,68	W 14 x 61	
W 360 x 101,0 (H)	101,0	357	255	10,5	18,3	320	286	129,5	30.279	1.696,3	15,29	5.063	397,1	6,25	1,68	W 14 x 68	
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	5.570	435,2	6,29	1,69	W 14 x 74	
W 360 x 122,0 (H)	122,0	363	257	13,0	21,7	320	288	155,3	36.599	2.016,5	15,35	6.147	478,4	6,29	1,70	W 14 x 82	
W 410 x 38,8	38,8	399	140	6,4	8,8	381	357	50,3	12.777	640,5	15,94	404	57,7	2,83	1,32	W 16 x 26	
W 410 x 46,1	46,1	403	140	7,0	11,2	381	357	59,2	15.690	778,7	16,27	514	73,4	2,95	1,33	W 16 x 31	
W 410 x 53,0	53,0	403	177	7,5	10,9	381	357	68,4	18.734	929,7	16,55	1.009	114,0	3,84	1,48	W 16 x 36	
W 410 x 60,0	60,0	407	178	7,7	12,8	381	357	76,2	21.707	1.066,7	16,88	1.205	135,4	3,98	1,49	W 16 x 40	
W 410 x 67,0	67,0	410	179	8,8	14,4	381	357	86,3	24.678	1.203,8	16,91	1.379	154,1	4,00	1,50	W 16 x 45	
W 410 x 75,0	75,0	413	180	9,7	16,0	381	357	95,8	27.616	1.337,3	16,98	1.559	173,2	4,03	1,51	W 16 x 50	
W 410 x 85,0	85,0	417	181	10,9	18,2	381	357	108,6	31.658	1.518,4	17,07	1.804	199,3	4,08	1,52	W 16 x 57	
W 460 x 52,0	52,0	450	152	7,6	10,8	428	404	66,6	21.370	949,8	17,91	634	83,5	3,09	1,47	W 18 x 35	
W 460 x 60,0	60,0	455	153	8,0	13,3	428	404	76,2	25.652	1.127,6	18,35	796	104,1	3,23	1,49	W 18 x 40	
W 460 x 68,0	68,0	459	154	9,1	15,4	428	404	87,6	29.851	1.300,7	18,46	941	122,2	3,28	1,50	W 18 x 46	
W 460 x 74,0	74,0	457	190	9,0	14,5	428	404	94,9	33.415	1.462,4	1						



Tabela 21 – Perfil U.

Bitola	Peso	ALMA		ABA		area	EIXO X			EIXO Y			
		Nominal	d	t <sub>w</sub>	b <sub>f</sub>		t <sub>f</sub>	l	W	r	l	W	r
pol	kg/m	mm	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm
3"	6,10	76,20	4,32	35,81	6,93	7,78	68,90	18,10	2,98	8,20	3,32	1,03	1,11
	7,44		6,55	38,05	6,93	9,48	77,20	20,30	2,85	10,30	3,82	1,04	1,11
4"	8,04	101,60	4,67	40,23	7,52	10,10	159,50	31,40	3,97	13,10	4,61	1,14	1,16
	9,30		6,27	41,83	7,52	11,90	174,40	34,30	3,84	15,50	5,10	1,14	1,15
6"	12,20	152,40	5,08	48,77	8,71	15,50	546,00	71,70	5,94	28,80	8,16	1,36	1,30
	15,62		7,98	51,66	8,71	19,90	632,00	82,90	5,63	36,00	9,24	1,34	1,27
8"	17,10	203,20	5,59	57,40	9,50	21,68	1344,30	132,70	7,87	54,10	12,94	1,42	1,47
	20,50		7,70	59,51	9,50	25,93	1490,00	147,50	7,59	62,40	14,09	1,42	1,42
10"	22,77	254,00	6,10	66,04	11,10	29,00	2800,00	221,00	9,84	95,00	19,00	1,81	1,61
	29,76		9,63	69,57	11,10	37,90	3290,00	259,00	9,31	117,00	21,60	1,76	1,54
12"	30,80	305,00	7,20	74,00	12,70	39,30	5370,00	352,00	11,70	161,00	28,30	2,03	1,77
	37,00		9,80	77,00	12,70	47,40	6010,00	394,00	11,30	186,00	30,90	1,98	1,71

Fonte: Gerdau®.

Tabela 22 – Barra redonda.

Bitolas			Peso Nominal			Bitolas			Peso Nominal			Bitolas			Peso Nominal		
pol	mm	kg/m	pol	mm	kg/m	pol	mm	kg/m	pol	mm	kg/m	pol	mm	kg/m	pol	mm	kg/m
1/4"	6,35	0,25	1.5/16"	33,34	6,85	2.7/16"	61,91	23,63									
5/16"	7,94	0,39	1.3/8"	34,93	7,52	2.1/2"	63,50	24,86									
3/8"	9,53	0,56	1.7/16"	36,51	8,22	2.9/16"	65,08	26,11									
1/2"	12,70	0,99	1.1/2"	38,10	8,95	2.5/8"	66,68	27,40									
9/16"	14,29	1,26	1.9/16"	39,69	9,71	2.3/4"	69,85	30,08									
5/8"	15,88	1,56	1.5/8"	41,28	10,50	2.13/16"	71,44	31,45									
11/16"	17,46	1,88	1.11/16"	42,86	11,32	2.7/8"	73,03	32,87									
3/4"	19,05	2,24	1.3/4"	44,45	12,18	3"	76,20	35,79									
13/16"	20,64	2,63	1.13/16"	46,40	13,06	3.1/16"	77,79	37,30									
7/8"	22,23	3,05	1.7/8"	47,63	13,98	3.1/8"	79,38	38,84									
15/16"	23,81	3,49	2"	50,80	15,91	3.1/4"	82,55	42,01									
1"	25,40	3,98	2.1/16"	52,39	16,92	3.7/16"	87,31	46,99									
1.1/16"	26,99	4,49	2.1/8"	53,98	17,96	3.1/2"	88,90	48,73									
1.1/8"	28,58	5,04	2.1/4"	57,15	20,14	3.3/4"	95,35	55,94									
1.3/16"	30,16	5,60	2.5/16"	58,74	21,27	4"	101,60	63,64									
1.1/4"	31,75	6,21	2.3/8"	60,33	22,43	4.1/16"	103,19	65,65									

Fonte: Gerdau®.

Tabela 23 – Parafusos de alta resistência.

Diâm. d pol	Área Nominal Ab cm <sup>2</sup>	Designação															
		A325							A490							A307(a)	
		Tração Pt Ft= 3,10	Cisalhamento simples (b) (c)						Tração Pt Ft= 3,80	Cisalhamento simples (b) (c)						Tração Pt Ft= 1,40	Cis. simples Fv= 0,70
			Fricção (F)							Fricção (F)							
P	A, AC	AL	ALP	Fp= 1,48	P	A, AC	AL	ALP	Fp= 1,97	P	A, AC	AL	ALP	Fp= 1,97			
1/2	1,267	3,93	1,52	1,34	1,08	0,89	1,87	4,81	1,87	1,61	1,34	1,15	2,50	1,77	0,89		
5/8	1,979	6,13	2,37	2,10	1,68	1,38	2,93	7,52	2,93	2,51	2,10	1,80	3,90	2,77	1,38		
3/4	2,850	8,83	3,42	3,02	2,42	2,00	4,22	10,83	4,22	3,62	3,02	2,59	5,61	3,99	2,00		
7/8	3,879	12,02	4,65	4,11	3,30	2,71	5,74	14,73	5,74	4,93	4,11	3,53	7,64	5,43	2,71		
1	5,067	15,71	6,08	5,37	4,31	3,55	7,50	19,25	7,50	6,43	5,37	4,61	9,98	7,09	3,55		
1 1/8	6,413	19,88	7,69	6,80	5,45	4,49	9,49	24,37	9,49	8,14	6,80	5,83	12,63	8,98	4,49		
1 1/4	7,917	24,54	9,50	8,39	6,73	5,54	11,72	30,08	11,72	10,05	8,39	7,20	15,60	11,08	5,54		
1 3/8	9,578	29,69	11,49	10,15	8,14	6,70	14,17	36,39	14,17	12,16	10,15	8,71	18,87	13,41	6,70		
1 1/2	11,401	35,34	13,68	12,08	9,69	7,98	16,87	43,32	16,87	14,48	12,08	10,37	22,46	15,96	7,98		

Fonte: BELLEI (1988).

Tabela 24 – Telhas metálicas.

**TELHA TRAPEZOIDAL 40 - Conforme Norma NBR 14514**  
**Tabela de Cargas Admissíveis (kgf/m<sup>2</sup>) - Telhas revestidas com Zn-Al**

Esp. (mm)	Peso* (kg/m <sup>2</sup> )	Peso (kg/ml)	I (cm <sup>4</sup> /m)	W (cm <sup>3</sup> /m)	Nº de apoios	Distância entre Apoios (mm)											
						1750		2000		2250		2500		2750		3000	
						F	C	F	C	F	C	F	C	F	C	F	C
0,43	3,90	3,86	10,4898	3,746	2	176	158	135	106	107	74	86	54	65	41	50	31
					3	176	176	135	135	107	107	86	86	71	71	60	60
					4	220	220	169	169	133	133	108	102	89	77	75	59
0,50	4,56	4,52	12,1631	4,344	2	204	183	156	123	124	86	100	63	75	47	58	36
					3	204	204	156	156	124	124	100	100	83	83	70	70
					4	255	255	195	195	154	154	125	119	103	89	87	69
0,65	6,00	5,94	15,7169	5,613	2	264	236	202	158	160	111	129	81	98	61	75	47
					3	264	264	202	202	160	160	129	129	107	107	90	90
					4	330	330	253	253	200	200	162	153	134	115	112	89
0,80	7,43	7,36	19,2278	6,867	2	323	289	247	194	195	136	158	99	119	75	92	57
					3	323	323	247	247	195	195	158	158	131	131	110	110
					4	404	404	309	309	244	244	198	187	163	141	137	108
0,95	8,86	8,77	22,6961	8,106	2	381	341	292	229	231	161	187	117	141	88	108	68
					3	381	381	292	292	231	231	187	187	154	154	130	130
					4	476	476	365	365	288	288	233	221	193	166	162	128
1,25	11,69	11,58	29,5074	10,538	2	496	444	379	297	300	209	243	152	183	114	141	88
					3	496	496	379	379	300	300	243	243	201	201	169	169
					4	619	619	474	474	375	375	303	288	251	216	211	166

\* = incluindo sobreposição (Larg. útil de 980 mm)

F - Fechamento C - Cobertura

NOTA: A flecha máxima admissível é de 300 mm.

Valores obtidos para cobertura e fechamento obedecendo ao menor valor nos seguintes critérios:

- Flecha máxima L/200 para cobertura e L/125 para fechamento (L - vão entre terças) ou tensão máxima admissível de 1400 kgf/cm<sup>2</sup>.

Fonte: ABCEM (2009).

## APÊNDICE H – PLANILHA DE CARREGAMENTO DE VENTO

Tabela 25 – Carregamento de vento nos pórticos.

Espaçamento	8	m
q	1,05	kN/m <sup>2</sup>
q_linear	8,4	kN/m

Resultante de coeficientes de pressão

	PAR ESQ	COB ESQ	COB DIR	PAR DIR
Cpe 0° + Cpi (0,2)	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
Cpe 0° + Cpi (-0,3)	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50
Cpe 90° + Cpi (0,2)	0,50	-1,2	-0,6	-0,67
Cpe 90° + Cpi (-0,3)	1,00	-0,7	-0,1	-0,17

Carregamentos [kN/m]

	PAR ESQ	COB ESQ	COB DIR	PAR DIR
Cpe 0° + Cpi (0,2)	-8,40	-8,40	-8,40	-8,40
Cpe 0° + Cpi (-0,3)	-4,20	-4,20	-4,20	-4,20
Cpe 90° + Cpi (0,2)	4,20	-10,08	-5,04	-5,63
Cpe 90° + Cpi (-0,3)	8,40	-5,88	-0,84	-1,43

Fonte:Autor.

# **APÊNDICE I**

## **PRANCHAS DE DETALHAMENTOS**

