

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

HENRIQUE ALVES MONTEIRO MORAIS MENDES

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE
COBERTURAS PARA GALPÕES INDUSTRIAIS**

GOIÂNIA
2026



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

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

Identificação da Produção Técnico-Científica

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

Nome Completo do Autor: Henrique Alves Monteiro Morais Mendes

Matrícula: 20201011050101

Título do Trabalho: Análise técnico-econômica de diferentes configurações de coberturas para galpões industriais

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

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

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

Goiânia, 12/03/2026.

Local

Data



Documento assinado digitalmente

HENRIQUE ALVES MONTEIRO MORAIS MENDES

Data: 13/03/2026 19:38:37-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

HENRIQUE ALVES MONTEIRO MORAIS MENDES

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE
COBERTURAS PARA GALPÕES INDUSTRIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Corpo Docente do curso de Engenharia Civil
do Instituto Federal de Goiás, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador:

Prof. Dr. Elias Calixto Carrijo

Coorientador:

Marcus Vinícius Araújo da Silva Mendes

GOIÂNIA

2026

M538a Mendes, Henrique Alves Monteiro Moraes.
Análise técnico-econômica de diferentes configurações de coberturas para galpões industriais / Henrique Alves Monteiro Moraes Mendes. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2026.
120 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Elias Calixto Carrijo.
Coorientador: Prof. Dr. Vinícius Araújo da Silva Mendes.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Bacharelado em Engenharia Civil, Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Galpões industriais. 2. Coberturas metálicas. 3. Estruturas de aço. I. Carrijo, Elias Calixto (orientador). II. Mendes, Vinícius Araújo da Silva (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. IV. Título.

CDD 624.182

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

ATA DE DEFESA DE RELATÓRIO DE PROJETO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Relatório de Projeto intitulado **ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE COBERTURAS PARA GALPÕES INDUSTRIAIS**, sob orientação de Elias Calixto Carrijo e coorientação de Marcus Vinicius Araujo da Silva Mendes, apresentado pelo aluno **Henrique Alves Monteiro Morais Mendes (20201011050101)** do Curso **Bacharelado em Engenharia Civil (Câmpus Goiânia)**. Os trabalhos foram iniciados às **16:00** do dia **13/02/2026** pelo Professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Elias Calixto Carrijo** (Presidente)
- **Paulo Francinete Silva Junior** (Examinador Interno)
- **Phablo Verissimo Inacio Dias** (Examinador Externo)
- **Marcus Vinicius Araujo da Silva Mendes** (Coorientador e Examinador Suplente Interno)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Relatório de Projeto, passou à arguição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

☒ Aprovado

☐ Reprovado

Nota : 9,2

Observação / Apreciações:

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Elias Calixto Carrijo** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Paulo Francinete Silva Junior**, em **09/03/2026 07:22:44** com chave **e97ef6141ba111f1b529005056a537a4**.
- **Elias Calixto Carrijo**, em **06/03/2026 17:48:59** com chave **e67ad4a2199d11f1885a005056a537a4**.
- **Marcus Vinicius Araujo da Silva Mendes**, em **06/03/2026 20:15:10** com chave **525d015e19b211f1b86d005056a537a4**.
- **Phablo Verissimo Inacio Dias**, em **08/03/2026 01:04:01** com chave **d700ef641aa311f180f8005056a537a4**.

Este documento foi emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifg.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Ata de Projeto Final

Data da Emissão: 09/03/2026

Código de Autenticação: 603495



RESUMO

O emprego de estruturas de aço na indústria da construção civil configura-se como um importante método construtivo estimulador da economia, integrando diferentes setores industriais e comerciais na implantação de edificações em estrutura de aço. Além disso, parâmetros executivos como a pré-fabricação dos elementos, rapidez de execução, necessidade reduzida de mão de obra, bem como parâmetros sustentáveis, como menor geração de resíduos e a possibilidade de reciclagem dos materiais, caracterizam o aço como um material vantajoso na implementação de diversas edificações. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo analisar duas diferentes configurações de coberturas em um modelo de edificação no qual o aço é amplamente destacado como material construtivo: os galpões industriais. Os casos analisados e comparados são 6 (seis) combinações de pórticos em galpões, formadas por 2 (duas) configurações estruturais de cobertura (treliçada e viga de perfil laminado) e 3 (três) dimensões de vãos (20, 25 e 30 metros) amplamente comercializadas. As configurações estruturais de cobertura e as dimensões dos vãos foram criteriosamente escolhidas por sua ampla utilização no mercado. A partir do desenvolvimento deste trabalho e estudo dos casos propostos, identificou-se que a estrutura de cobertura treliçada se sobressai em cada um dos vãos propostos, isto é, 20 25 e 30 metros, considerando os critérios de maior eficiência de peso da estrutura e quantitativo de aço empregado. Os parâmetros analisados para determinar a maior eficiência foram: taxa de aço (kg/m^2), quantitativo de aço utilizado e peso total da estrutura (kg).

Palavras-Chave: estruturas de aço; galpões industriais; eficiência; custo.

ABSTRACT

The use of steel structures in the civil construction industry represents an important construction method that stimulates the economy, integrating different industrial and commercial sectors in the implementation of steel-framed buildings. Furthermore, operational parameters such as the prefabrication of elements, speed of construction, and reduced need for labor, as well as sustainable parameters like lower waste generation and the possibility of material recycling, characterize steel as a highly advantageous material for various building types. Given the above, this study aimed to analyze two different roof configurations in a building model where steel is widely prominent as a construction material: industrial warehouses. The analyzed and compared cases consist of 6 (six) combinations of portal frames in warehouses, formed by 2 (two) structural roof configurations (trussed and rolled steel beam) and 3 (three) widely commercialized span dimensions (20, 25, and 30 meters). The structural roof configurations and span dimensions were carefully chosen due to their widespread use in the market. Through the development of this work and the study of the proposed cases, it was identified that the trussed roof structure outperformed the other configuration in each of the proposed spans, i.e., 20, 25, and 30 meters, considering the criteria of structural weight efficiency and the amount of steel used. The parameters analyzed to determine the highest efficiency were: steel ratio (kg/m^2), total quantity of steel used, and total weight of the structure (kg).

Keywords: steel structures; industrial warehouses, cost-efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Faturamento anual por porte de empresa	20
Figura 2 - Obras em estruturas de aço por segmento	21
Figura 3 - Processo simplificado da formação do aço por lingotamento contínuo	26
Figura 4 - Representação dos cilindros em um processo de laminação de um perfil de aço ...	26
Figura 5 - Exemplo de conformação de perfis laminados pelo processo de laminação	27
Figura 6 - Perfis laminados mais utilizados para finalidade estrutural.....	30
Figura 7 - Dimensões usuais em metros para implementação de um galpão industrial.....	31
Figura 8 - Esquematização geral das dimensões de um galpão industrial.....	32
Figura 9 - Pórtico de coluna e viga de perfil laminado de alma cheia	33
Figura 10 - Galpão com estrutura de cobertura de viga de perfil laminado de alma cheia	33
Figura 11 - Pórtico com coluna de perfil laminado e estrutura de cobertura de treliça metálica	34
Figura 12 - Galpão com estrutura de cobertura de treliça metálica.....	35
Figura 13 - Dimensões principais da arquitetura dos galpões	40
Figura 14 - Imagem de catálogo TP-40 Kingspan Isoeste	42
Figura 15 - Telha TP-40 Kingspan Isoeste aplicada.....	42
Figura 16 - Esquematização de suporte das terças para recebimento de telhas	44
Figura 17 - Sobrecarga admissível da TP-40	45
Figura 18 - Sobrecarga admissível da telha de 0,50mm.....	46
Figura 19 - Esquematização de dimensões PERFIL W Gerdau.....	47
Figura 20 - Mapa de isopletras básicas de vento (NBR 6123)	52
Figura 21 - Mapa de isopletras de vento no VisualVentos	53
Figura 22 - Fator topográfico S1 no VisualVentos	54
Figura 23 - Fator de rugosidade S2 no VisualVentos.....	55
Figura 24 - Fatores de Rajada (Fr) e Parâmetros meteorológicos (b e p) da ANBR NBR 6123	56
Figura 25 - Fator estatístico S3 no VisualVentos	57
Figura 26 - Interface do VisualVentos para geometria do galpão	59
Figura 27 - Coeficientes de Pressão Externa nas faces das paredes externas da edificação (exemplo do vão de 20 metros)	60
Figura 28 - Coeficientes de Pressão Externa nas faces do telhado externo da edificação (exemplo do vão de 20 metros)	61

Figura 29 - Coeficiente de pressão interna no VisualVentos	62
Figura 30 - Esforços resultantes para o vão de 20 metros	63
Figura 31 - Esforços resultantes para o vão de 25 metros	63
Figura 32 - Esforços resultantes para o vão de 30 metros	64
Figura 33 - Parâmetros de pré-dimensionamento proposto por D'alambert (2012)	67
Figura 34 - Esquematização dos deslocamentos máximos das estruturas dos galpões	75
Figura 35 - Interface de definição normativa no Cype 3D	76
Figura 36 - Definição dos aços estruturais no Cype 3D	77
Figura 37 - Geometria do galpão com vão de 20 metros e cobertura de viga de alma cheia ...	83
Figura 38 - Definição dos aços estruturais dos elementos dos galpões.....	84
Figura 39 - Catálogo da GERDAU no Cype3D	85
Figura 40 – Definição do pórtico do galpão de vão de 20 metros e viga de alma cheia	86
Figura 41 - Categorização de cargas no Cype3D	88
Figura 42 – Inserção dos carregamentos no Cype3D	89
Figura 43 - Falha por flambagem global nas colunas.....	90
Figura 44 - Falha no perfil W 400 38,8 e evidência de que o perfil W 610 155 atende aos requisitos.....	90
Figura 45 - Pórtico final do galpão com vão de 20 metros e cobertura de viga de alma cheia	91
Figura 46 - Tabela resumo de aço extraída do Cype3D para o pórtico de 20 metros de vão e cobertura de viga de alma cheia	92
Figura 47 - Geometria do pórtico vão de 20 metros e cobertura de treliça	93
Figura 48 – Definição dos aços estruturais para as colunas e treliça	94
Figura 49 - esquematização dos aços estruturais no pórtico com cobertura treliçada.....	95
Figura 50 - Pórtico com perfis atribuídos do pré-dimensionamento	96
Figura 51 - Carregamentos atuantes no pórtico.....	97
Figura 52 - Pórtico final do galpão com vão de 20 metros e cobertura de treliça.....	98
Figura 53 - Tabela resumo de aço extraída do Cype3D para o pórtico de 20 metros de vão e cobertura de treliça	99
Figura 54 - Geometria do galpão com vão de 25 metros e cobertura de viga de alma cheia ...	99
Figura 55 - Atendimento do perfil W 350 44.8 nas colunas do vão de 25 metros e cobertura de alma cheia	101
Figura 56 - Esquematização do pórtico de vão com 25 metros e cobertura de viga de alma cheia	102

Figura 57 - Tabela resumo de aço extraída do Cype3D para o pórtico de 25 metros de vão e cobertura de viga de alma cheia	102
Figura 58 - Geometria do pórtico com vão de 25 metros e cobertura de treliça	103
Figura 59 - Configuração estrutural do pórtico com vão de 25 metros e cobertura de treliça	104
Figura 60 - Pórtico com vão de 25 metros e cobertura de treliça com perfis do pré-dimensionamento.....	105
Figura 61 - Pórtico final do galpão com vão de 25 metros e cobertura de treliça.....	106
Figura 62 - Tabela resumo de aço extraída do Cype3D para o pórtico de 25 metros de vão e cobertura de treliça	107
Figura 63 - Geometria do galpão com vão de 30 metros e cobertura de viga de alma cheia .	107
Figura 64 - Análise estrutural do galpão com vão de 30 metros e viga de alma cheia	109
Figura 65 - Pórtico do galpão com vão de 30 metros e viga de alma cheia, destacando que o perfil não foi aprovado	110
Figura 66 - Tabela resumo de materiais da configuração de vão de 30 metros e cobertura de viga de alma cheia	111
Figura 67 - Geometria do galpão com vão de 30 metros e cobertura de treliça.....	111
Figura 68 - Aços estruturais do pórtico com vão de 30 metros e cobertura de treliça	112
Figura 69 - Esquematização do pórtico com vão de 30 metros e cobertura de treliça com os perfis arbitrados no pré-dimensionamento	113
Figura 70 - Categorização das cargas no CYPE3D comum a todas as configurações de galpões	114
Figura 71 - Inserção das cargas atuantes no pórtico com vão de 30 metros e cobertura de treliça	115
Figura 72 - Esquematização do pórtico com os perfis finais validados na análise estrutural	116
Figura 73 - Tabela resumo de materiais da configuração de vão de 30 metros e cobertura de treliça	116

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais normas da ABNT para coberturas em estrutura metálica	23
Quadro 2 - Principais associações e entidades da construção em aço no Brasil	24
Quadro 3 - Percentual de custo de cada etapa de implantação de uma obra de estrutura metálica	37
Quadro 4 - Resumo dos parâmetros de projeto	48
Quadro 5 - Ações permanentes na estrutura dos galpões	66
Quadro 6 - Valores característicos para pré-dimensionamento (CBCA, 2018)	68
Quadro 7 - Carregamentos permanentes atuantes	69
Quadro 8 - Deslocamentos máximos dos elementos estruturais em função das dimensões	74
Quadro 9 - Etapas para análise estrutural dos pórticos no Cype 3D	78
Quadro 10 - Categorização de cargas no Cype 3D.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais aços estruturais empregados no Brasil	29
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço estrutural.....	30
Tabela 3 - Dados técnicos da telha definida	43
Tabela 4 - Aços e materiais aplicados na estrutura dos galpões.....	48
Tabela 5 - Parâmetros de pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998).....	67
Tabela 6 - Síntese da análise comparativa.....	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCEM	Associação Brasileira da Construção Metálica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Minerais e Mineração
ABS	Associação Brasileira de Soldagem
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBCA	Centro Brasileiro de Construção em Aço
FEM	Fábrica de Estruturas Metálicas
IABR	Instituto Aço Brasil
INDA	Instituto Nacional dos Distribuidores de Aço
NBR	Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

MPa	Megapascal
F_u	Resistência à ruptura
F_y	Limite de escoamento
E_a	Módulo de elasticidade do aço
ν	Coefficiente de Poisson
G	Módulo de elasticidade transversal
ρ_a	Massa específica do aço
β_a	Coefficiente de dilatação térmica
V_0	Velocidade básica do vento
V_k	Velocidade característica do vento
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator de rugosidade do terreno
S_3	Fator estatístico
q	Pressão dinâmica do vento
C_{pe}	Coefficiente de pressão externa
C_{pi}	Coefficiente de pressão interna
$F_{G_i,k}$	Ação permanente principal da combinação de ações
$F_{Q_1,k}$	Ação variável principal da combinação de ações
$F_{G_j,k}$	Ações variáveis que podem atuar concomitantemente a ação principal
ψ	Fator de combinação das ações variáveis
γ_g	Coefficiente de ponderação das ações permanentes
γ_q	Coefficiente de ponderação das ações variáveis
Δ	Deslocamento da estrutura
$\Delta_{hor.}$	Deslocamento horizontal máximo
$\Delta_{vert.}$	Deslocamento vertical máximo
$P-\Delta$	Efeitos de 2º ordem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Justificativa.....	20
1.2	Objetivos	21
1.2.1	Objetivo geral	21
1.2.2	Objetivos específicos	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Normatização e regulamentação	23
2.2	O aço como material estrutural.....	25
2.2.1	Produção do aço	25
2.2.2	Características do aço estrutural	28
2.3	Galpões industriais em estrutura metálica	31
2.3.1	Estrutura de cobertura em viga de alma cheia e em treliça	32
2.3.2	Viabilidade econômica para implantação de um galpão industrial	35
3	METODOLOGIA.....	38
4	PARÂMETROS DE PROJETO	39
4.1	Localização	39
4.2	Parâmetros gerais	39
4.3	Arquitetura dos galpões	39
4.4	Características do telhado.....	41
4.5	Definição dos materiais estruturais.....	47
4.6	Conclusão dos parâmetros de projeto.....	48
5	DEFINIÇÃO DAS AÇÕES E COMBINAÇÕES DE AÇÕES.....	50
5.1	Cargas devido ao vento.....	50
5.2	Cargas acidentais verticais (Sobrecarga)	64
5.3	Cargas permanentes	65
5.3.1	Peso próprio dos elementos do pórtico.....	66
5.3.2	Peso próprio das terças	68
5.3.3	Peso próprio das telhas	68
5.3.4	Peso próprio das placas fotovoltaicas	69
5.4	Cargas devido a pontes rolantes	70
5.5	Cargas devido à temperatura	70
5.6	Combinações de ações	70

6	ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS	74
6.1	Análise estrutural no Cype3D.....	75
6.1.1	Vão de 20 metros e cobertura de viga de alma cheia	83
6.1.2	Vão de 20 metros e cobertura em treliça	92
6.1.3	Vão de 25 metros e cobertura de viga de alma cheia	99
6.1.4	Vão de 25 metros e cobertura em treliça	103
6.1.5	Vão de 30 metros e cobertura de viga de alma cheia	107
6.1.6	Vão de 30 metros e cobertura em treliça	111
7	RESULTADOS E ANÁLISE COMPARATIVA.....	117
7.1	Vão de 20 metros.....	118
7.2	Vão de 25 metros.....	118
7.3	Vão de 30 metros.....	118
8	CONCLUSÕES E APONTAMENTOS.....	120
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

1 INTRODUÇÃO

O aço é uma liga de ferro-carbono com teor de carbono variando entre 0,008% até 2,11% (Chiaverini, 1996). É amplamente considerado como um dos primeiros materiais conhecidos, manipulados e empregados pelo homem desde a Antiguidade, todavia, não era considerado um material competitivo por falta de um processo industrial de fabricação (Pfeil, 2014). A sofisticação nos meios de produção advinda da Primeira Revolução Industrial (1760 a meados de 1850) permitiu no meio do século XIX o que seria o início do aço como material estrutural aplicado em empreendimentos da Engenharia Civil.

Pfeil (2014) apresenta como fator importante para o início da utilização do aço a invenção em 1856 pelo inglês Henry Bessemer, de um forno que permitiu a produção do aço em larga escala e a introdução dos laminadores para barras em 1880. Esse domínio das técnicas e criação de ferramentas para a produção em escala proporcionou no fim do século XIX a construção de obras que foram grandes referências para os primórdios do aço como material principal, como a ponte Firth of Forth construída em 1890 na Escócia, com 521 metros de vão. (PFEIL, 2014)

No Brasil, Bellei (1998) destaca a criação da Companhia Siderúrgica Nacional e a Fábrica de Estruturas Metálicas (FEM) no meio do século XX como marcos importantes para a difusão do aço como material estrutural e fomento da atividade no país. De acordo com o autor, a criação dessas instituições iniciou a formação de mão de obra qualificada e formação do ciclo completo do aço, permitindo o estabelecimento do poderio econômico do aço no país com o surgimento de empresas, fabricantes, projetistas e profissionais do ramo.

Na atualidade, o emprego de edificações com aço estrutural em larga escala é motivado por vantagens que o emprego deste material pode oferecer. Para Fakury (2016), as principais vantagens do aço como material estrutural são as propriedades de elevada resistência mecânica e elevada ductilidade. Entretanto, o autor em sua obra também destaca aspectos como alto grau de confiança, possibilidade de um canteiro de obras menor, limpo e organizado, facilidade de reforços e ampliações, possibilidade de reciclagem e reaproveitamento do material e rapidez de execução.

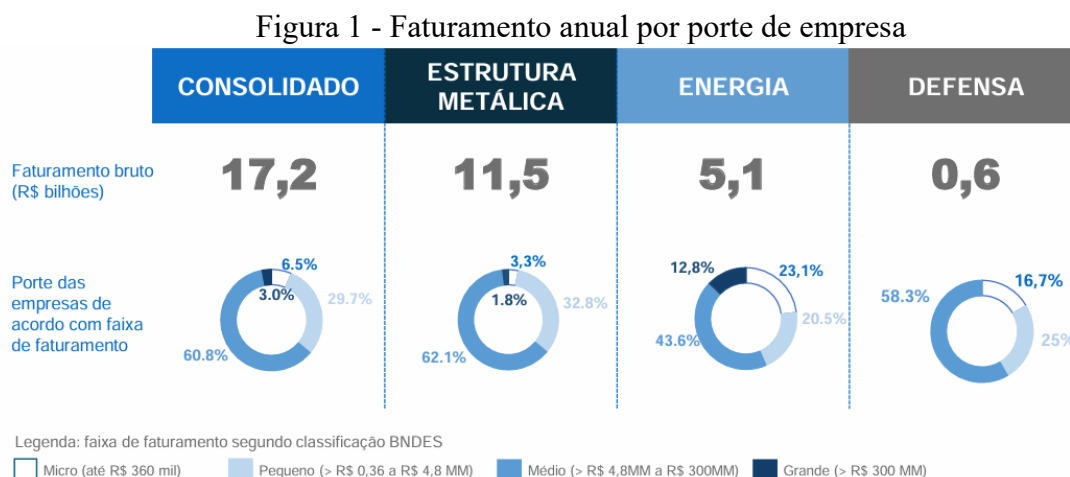
Grande parcela das obras industriais que empregam o aço como elemento estrutural principal são os galpões de estrutura metálica, no qual se mostram como uma solução versátil e econômica por sua característica de cobrir grandes áreas. Ademais, D’Alambert (2012) comenta em sua obra “Coletânea do Uso do Aço – Galpões em Pórticos com Perfis Estruturais Laminados”, iniciativa da Gerdau Açominas:

No mercado brasileiro da construção em aço, um dos segmentos que tem maior demanda é o de galpões. Utilizados tanto para simples armazenagem como para a infraestrutura industrial de uma maneira geral, os galpões estruturados em aço oferecem inúmeras vantagens em relação a outras soluções, atendendo as mais diversas modulações e composições.

1.1 Justificativa

O aço empregado na construção civil tem como poder um estímulo relevante à economia, no qual é utilizado majoritariamente em cenários de edificações com finalidades comerciais, logísticas, de infraestrutura e industriais. A partir dessa destacada aplicação em edificações industriais, a indústria do aço na construção civil integra diferentes setores da economia e interessados, desde o governo e órgãos públicos para o fomento da infraestrutura, quanto empresas privadas de variados portes, fornecedores de materiais, prestadores de serviço, empreendedores e clientes.

O Centro Brasileiro de Construção em Aço (CBCA) desenvolve anualmente a pesquisa “Cenário dos Fabricantes de Estruturas de Aço”, no qual visa colher dados de empresas da construção em aço e traçar um panorama da economia no setor. No ano base de 2024, a pesquisa elaborada pela e8 Inteligência (empresa especializada em pesquisas técnicas e mercadológicas no setor da construção civil) apontou um faturamento anual do setor na ordem de R\$ 17,2 bilhões, e dado relevante obtido na pesquisa e apresentado na Figura 1, é que 90,5% do faturamento anual apontado são de empresas consideradas de porte Pequeno e Médio (Faixas de faturamento entre R\$ 360.000,00 a R\$ 300.000.000,00).

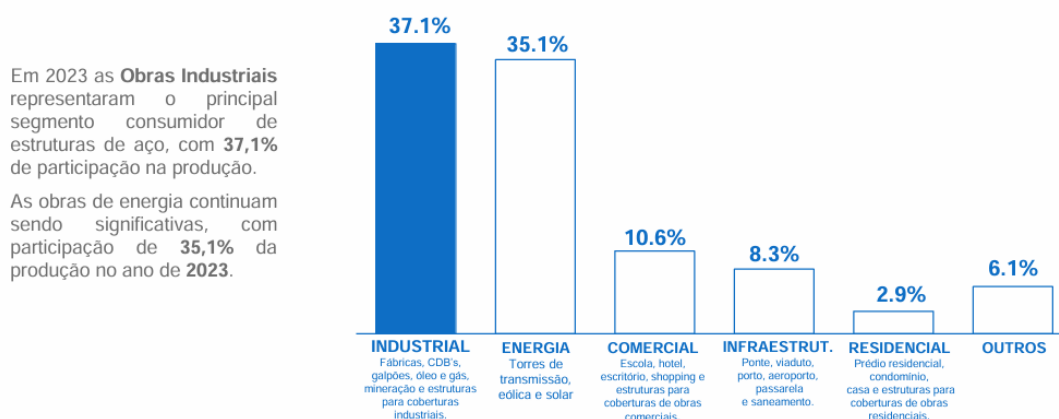


Fonte: Centro Brasileiro de Construção em Aço (2024).

A pesquisa também aponta a participação do aço como estrutura por segmentos de obras apresentados na Figura 2, dados obtidos em 2023 revelam que a maior parcela das construções em aço é destinada para o setor industrial (37,1%), seguidas pelo setor de energia (35,1%). Os galpões industriais de estruturas metálicas, objeto de estudo deste trabalho, são uma aplicação de grande destaque do aço na construção civil, e parcela relevante para o desenvolvimento econômico nas esferas locais, regionais e nacional.

Figura 2 - Obras em estruturas de aço por segmento

Participação de estruturas de aço por tipos de obras (%)



Fonte: Centro Brasileiro de Construção em Aço (2024).

Partindo do pressuposto, a proposta deste trabalho, assim como os resultados almejados, são de contribuir para o desenvolvimento dessa modalidade, apresentando soluções estruturais de cobertura usualmente empregadas no projeto e na construção de obras industriais de galpões metálicos, com análises de apelo econômico, no que tange a quantidade de aço empregada em diferentes configurações estruturais. Por fim, munir empreendedores, construtores, projetistas e profissionais da indústria sobre as configurações de coberturas mais viáveis em quantidade de aço empregado para dimensões de vãos pré-determinadas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar seis configurações estruturais de galpões industriais e determinar a metodologia construtiva de cobertura que se sobressai em eficiência para determinadas dimensões de vãos comerciais, avaliando parâmetros de taxa de aço e peso total da estrutura.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver o cálculo e dimensionamento de seis configurações de galpões em estrutura metálica para aplicação comercial e industrial;
- Realizar uma análise técnica comparativa para determinar qual metodologia de estrutura de cobertura se sobressai em eficiência de peso e quantidade de aço para cada um dos três vãos propostos;
- Contribuir para o desenvolvimento do emprego de estruturas metálicas na construção civil, ao apresentar um estudo que forneça a empreendedores, profissionais e clientes, possibilidades de galpões que propiciem a redução de custos e materiais empregados;
- Fortalecer a bibliografia existente no que tange à eficiência nos projetos e execuções de galpões industriais em estrutura metálica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Normatização e regulamentação

No contexto do Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) regula e fornece as diretrizes a serem atendidas para a implantação de obras de estruturas metálicas por meio das Normas Brasileiras ABNT NBR 8800 (ABNT, 2024) e ABNT NBR 14762 (ABNT, 2010), em conjunto com outras normas listadas no Quadro 1, que também abrangem diferentes aspectos regulamentadores e parâmetros mínimos de projetos e obras de engenharia. No Quadro 1, também estão listadas as Normas técnicas da ABNT recomendadas pela Associação Brasileira da Construção Metálica (ABCEM) que devem servir de orientação para o projeto e construção de estruturas metálicas para cobertura.

Quadro 1 - Principais normas da ABNT para coberturas em estrutura metálica

NBR / Ano	Título
NBR 8800:2024	Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios
NBR 14762:2010	Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio
NBR 6123:2023	Forças devidas ao vento em edificações
NBR 6120:2019	Cargas para o cálculo de estruturas de edificações
NBR 8681:2003	Ações e segurança nas estruturas - Procedimento
NBR 16239:2013	Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares
NBR 14513:2022	Telhas de aço de seção ondulada e trapezoidal - Procedimento
NBR 14323:2013	Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço concreto de edifícios em situações de incêndio

NBR 14432:2001	Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento
NBR 15980:2011	Perfis laminados de aço para uso estrutural – Dimensões e tolerâncias
NBR 5884:2013	Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico – Requisitos gerais
NBR 5419:2005	Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas

Fonte: Elaborado pelo autor.

Existem também diferentes associações e entidades que possuem a missão de promover e desenvolver o mercado da construção em estruturas metálicas no país. Essas instituições contribuem ativamente para os processos de evolução técnica e tecnológica, congregam fabricantes, construtores, empreendedores, bem como difundem conhecimento e boas práticas para o aprimoramento da indústria no país. No quadro 2 estão dispostas as principais associações e entidades que contribuem para o desenvolvimento do setor de construção em aço no Brasil.

Quadro 2 - Principais associações e entidades da construção em aço no Brasil

Sigla	Descrição
ABCEM	Associação Brasileira da Construção Metálica
ABECE	Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
ABS	Associação Brasileira de Soldagem
CBCA	Centro Brasileiro da Construção em Aço
IABR	Instituto Aço Brasil
INDA	Instituto Nacional dos Distribuidores de Aço

Fonte: Elaborado pelo autor.

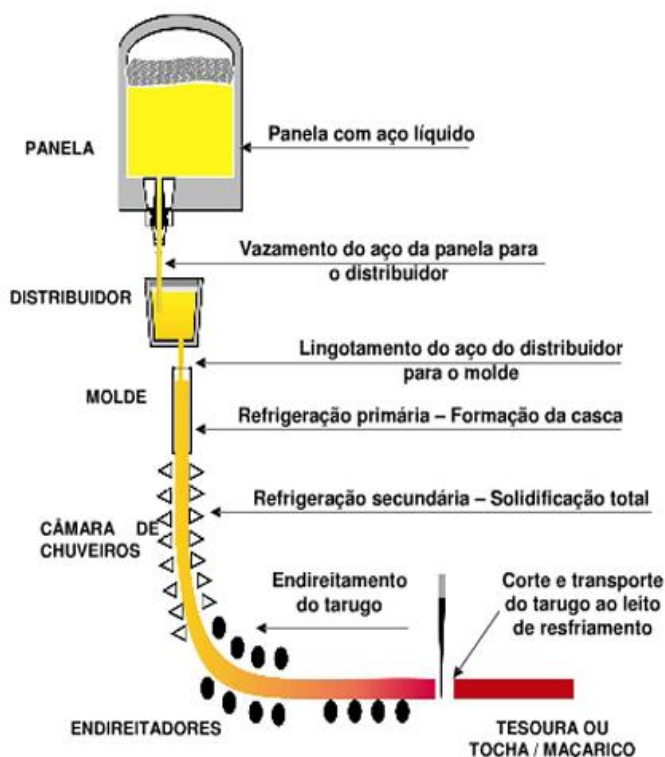
2.2 O aço como material estrutural

2.2.1 Produção do aço

A liga metálica do aço é formada a partir da produção e refino do ferro fundido até atingir a liga metálica com teor de carbono entre 0,008% até 2,11%. Pfeil (2014) explica que a matéria principal é obtida a partir da produção de ferro fundido em um forno de alta temperatura ou por sucata fundida em fornos elétricos cuja energia é obtida por arcos voltaicos. Ainda de acordo com Pfeil, após a formação do aço, ele é conformado em um processo de lingotamento (convencional ou contínuo), no qual o aço é moldado no formato de lingotes a partir de um processo industrial. De acordo com o artigo “Comparação entre as rotas de lingotamento convencional e contínuo” conduzido pela Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), o processo de lingotamento contínuo foi implementado nas indústrias a partir da década de 1960 por conferir uma gama de vantagens em comparação ao lingotamento convencional, e estima-se que atualmente, 95% das produções de aço em todo o mundo adotam o processo de lingotamento contínuo. (ABM, 2006)

Nascimento; Pimentel; Jochelavicius (2006) afirmaram que o processo de lingotamento contínuo é responsável por promover uma redução significativa no número de etapas do lingotamento, além de conferir uma redução de perdas na ordem de 15% e uma redução de custos na ordem de 22%. Na Figura 3 está apresentado o processo simplificado da formação do aço por lingotamento contínuo antes do processo final de laminação.

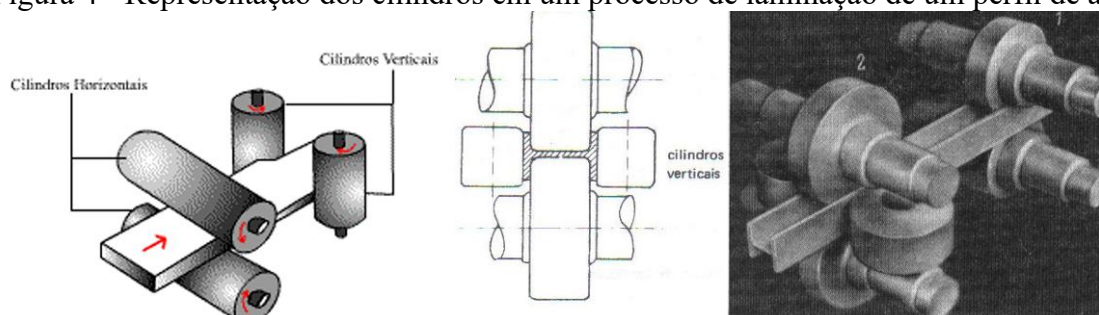
Figura 3 - Processo simplificado da formação do aço por lingotamento contínuo



Fonte: Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo (EEL – USP) (s.d.).

Após o processo de lingotamento contínuo, inicia-se o processo final de laminação, que é a conformação do aço nos principais produtos siderúrgicos utilizados na construção civil, como as chapas e os perfis metálicos. O processo de laminação consiste na redução da área da seção transversal, com consequente alongamento do produto recebido do lingotamento, para conformá-lo na apresentação desejada. (Oliveira, s.d.) O processo básico de laminação consiste na compressão do aço em cilindros rotacionais que moldarão os produtos siderúrgicos como as chapas e perfis metálicos, a Figura 4 apresenta uma esquematização simplificada dos cilindros de conformação em um processo de laminação de um perfil metálico.

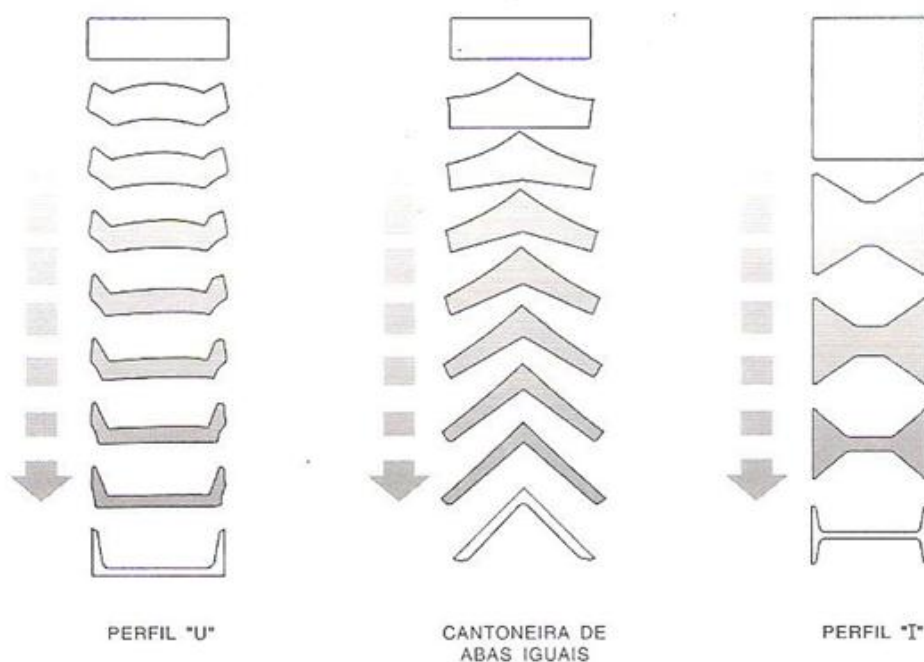
Figura 4 - Representação dos cilindros em um processo de laminação de um perfil de aço



Fonte: Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) – Notas de aula (s.d.).

De acordo com Bellei (1998), o processo de laminação pode ser feito a quente e a frio, na laminação a quente, o aço é aquecido a uma temperatura acima da temperatura de recristalização, e o principal propósito desta técnica é reduzir as seções transversais da peça em grandezas maiores do que a laminação a frio, pelo fato de o aço estar mais maleável pela alta temperatura. Entretanto, a laminação a quente não confere acabamento equivalente a laminação a frio, e as tolerâncias dimensionais são maiores pela menor precisão da laminação a quente. A ABNT NBR 8800 normatiza os perfis de aço laminados a quente para o emprego estrutural no Brasil. Em contrapartida, a laminação a frio possui menos margem de trabalhabilidade no que tange à redução de seção e mudanças bruscas de formato pelo fato de o aço estar mais resistente em temperatura fria. Contudo, o propósito da laminação a frio é conferir acabamento aos produtos siderúrgicos e grande precisão na padronização das dimensões das chapas e perfis. Por sua vez, a ABNT NBR 14762 normatiza os perfis laminados a frio para emprego em estruturas metálicas no Brasil. A Figura 5 apresenta um processo simplificado de conformação dos principais perfis metálicos obtidos a partir do processo de laminação.

Figura 5 - Exemplo de conformação de perfis laminados pelo processo de laminação



Fonte: Oliveira, Estruturas Metálicas: Notas de Aula (s.d.).

2.2.2 Características do aço estrutural

De acordo com Fakury (2016), são três os principais tipos de aços estruturais utilizados no Brasil, a saber: Aços-carbono, aços de baixa liga e aços resistentes a corrosão atmosférica.

- **Aços-Carbono:** São os aços mais usuais e possuem uma resistência de escoamento até 300 MPa, as ligas são compostas por carbono e manganês, sendo ainda permitido a presença em menor escala de silício, cobre, fósforo e enxofre. (FAKURY, 2016) Os principais tipos são o ASTM A36, A570.
- **Aços de Baixa Liga:** São aços-carbono com a adição de elementos como cromo, níquel, nióbio, titânio, entre outros. (FAKURY, 2016) A adição desses elementos em determinadas quantidades aprimora as propriedades mecânicas da liga metálica em comparação aos aços-carbono, sobretudo a resistência ao escoamento.
- **Aços Resistentes à Corrosão Atmosférica:** Também chamados de aços patináveis, são aços-carbono e aços de baixa liga com tratamento especial a partir da adição de elementos que conferem uma resistência a corrosão atmosférica superior aos aços-carbono/aços de baixa liga convencionais. De acordo com Oliveira (s.d.), quando expostos ao clima em um ciclo alternado de molhamento (chuva, nevoeiro, umidade, secagem), desenvolvem na superfície uma camada de óxido compacta e aderente, funcionando como uma barreira contra o processo corrosivo.

Na Tabela 1, estão representados os principais tipos de aços preconizados pela ABNT NBR 8800 (ABNT, 2024) para finalidade estrutural. Os aços estão representados por tipo e denominação no mercado, produtos siderúrgicos originados, Limites de escoamento (f_y) e Resistência à ruptura (f_u).

Tabela 1 - Principais aços estruturais empregados no Brasil

Tipo	Denominação	Produto	Fy (MPa)	Fu (MPa)
Aço-carbono	ABNT MR250	Perfis laminados e soldados	250	400
Aço resistente à corrosão atmosférica	ASTM A242	Perfis laminados	345	485
Aço resistente à corrosão atmosférica	ASTM A242	Chapas e barras redondas lisas	345	480
Aço-carbono	ASTM A307	Parafusos	-	415
Aço-carbono	ASTM A325	Parafusos	635	825
Aço-carbono	ASTM A36	Perfis laminados	250	400
Aço de baixa liga	ASTM A572*	Perfis laminados	290 - 450	415 - 550
Aço de baixa liga	ASTM A572*	Chapas e barras redondas lisas	290 - 450	415 - 550
Aço resistente à corrosão atmosférica	ASTM A588	Perfis laminados	345	485
Aço resistente à corrosão atmosférica	ASTM A588	Chapas e barras redondas lisas	345	485
Aço de baixa liga	ASTM A992	Perfis laminados	345 - 450	450

* Depende do grau variando entre 42, 50, 55, 60, 65

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme abordado por Pfeil (2014), as usinas siderúrgicas produzem aço para utilização estrutural em diversas formas: chapas, barras, perfis laminados, fios trefilados, cordoalhas e cabos.

As chapas, barras e perfis são produzidos nos laminadores, também sobre os perfis, eles podem ser dobrados (perfis de chapa dobrada) e por associação de chapas soldadas (perfis soldados). Bellei (1998) informa que o emprego de perfis estruturais é destacado pela alta resistência aos esforços, mesmo com dimensões reduzidas de suas seções transversais, por este motivo, as estruturas de aço, apesar de sua grande densidade (7.850 kg/m^3), podem ter seus elementos mais leves do que elementos de concreto armado.

A ABNT NBR 8800 (ABNT, 2024) normatiza os diferentes perfis metálicos utilizados na estrutura de edificações, para as peças laminadas (perfis, barras e chapas), a norma preconiza um limite máximo de 450 MPa para a Resistência ao Escoamento (f_y) e uma relação mínima de 1,18 entre a Resistência de Ruptura (f_u) e a Resistência ao Escoamento (f_y). (ABNT NBR 8800:2008, item 4.5.2.2.1)

A complementar, a norma estabelece propriedades mecânicas que devem ser adotadas para efeitos de projeto e cálculo em todos os elementos de aço que são por ela normatizados. Na Tabela 2, estão relacionados os valores das propriedades mecânicas do aço que devem ser adotadas para o cálculo e dimensionamento de estruturas metálicas.

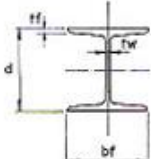
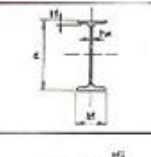
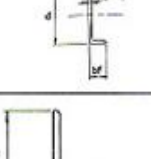
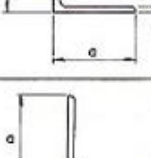
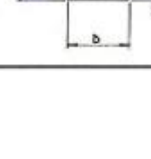
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço estrutural

Propriedades mecânicas do aço			
Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
Ea	Módulo de Elasticidade	200000	MPa
v	Coeficiente de Poisson	0,3	adimensional
G	Módulo de Elasticidade Transversal	77000	MPa
β_a	Coeficiente de Dilação Térmica	$1,2 \times 10^{-5}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
v	Massa Específica	7850	kg/m^3

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8800 (2024).

De acordo com Bellei (1998) os perfis laminados são utilizados amplamente para vigas, colunas, estacas, contraventamentos e se destacam pelas suas amplas dimensões longitudinais, e pela sua alta resistência apesar das seções transversais reduzidas. Também, o autor cita os perfis metálicos mais utilizados para finalidade estrutural, no qual são os que estão relacionados na Figura 6.

Figura 6 - Perfis laminados mais utilizados para finalidade estrutural

		Dimensões	Designação (exemplo)
	Perfil H	d = 152 mm	H de 152 x 37,1 Perfil H com d = 152 mm e 37,10 kg/m
	Perfil I	d = 76 a 305 mm	I de 152 x 18,5 Perfil I com d = 152 mm e 18,50 kg/m
	Perfil U	d = 76 a 381 mm	U de 203 x 17,1 Perfil U com d = 203 mm e 17,10 kg/m
	Cantoneira de abas iguais	a = 25 a 203 mm t = 3 a 25 mm	L de 50 x 6,3 Cantoneira de abas iguais com a = 50 mm e t = 6,3 mm
	Cantoneira de abas desiguais	a x b = 89 x 64 a 203 x 102 mm t = 6 a 25 mm	L de 102 x 76 x 7,9 Cantoneira de abas desiguais com a = 102 mm b = 76 mm e t = 7,9 mm

Fonte: Bellei (1998).

2.3 Galpões industriais em estrutura metálica

Galpões ou edifícios industriais são 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. (PRAVIA; DREHMER; JÚNIOR, 2018)

A grande finalidade de um galpão metálico é de cobrir grandes áreas e vãos com uma estrutura modular de pórticos com colunas e estruturas de cobertura metálicas, e por este motivo, é amplamente empregado para finalidades comerciais, industriais e agrícolas.

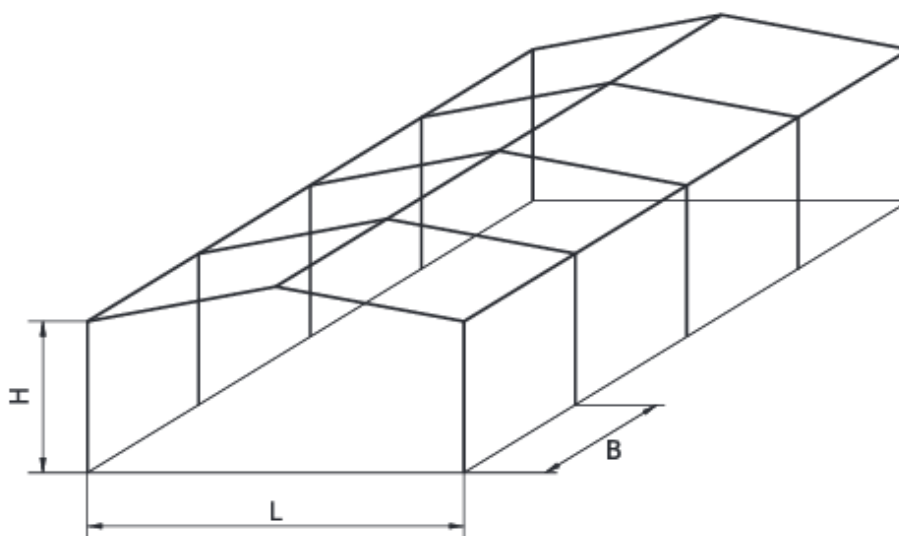
D'alambert (2012) cita no manual “Galpões em Pórticos com Perfis Estruturais Laminados”, iniciativa da GERDAU Açominas que existem dimensões amplamente utilizadas no mercado para a implementação de um galpão metálico com finalidade industrial e comercial, também pela sua característica modular, as dimensões de um galpão podem ser facilmente customizadas e adaptadas. Nas Figuras 7 e 8, D'alambert (2012) apresenta as principais dimensões de vão dos pórticos, distância entre pórticos e alturas de colunas adotadas para a implantação de um galpão metálico.

Figura 7 - Dimensões usuais em metros para implementação de um galpão industrial

Vão dos Pórticos	Altura das Colunas	Distância entre Pórticos
L 1 = 15,00	H 1 = 6,0	B 1 = 6,00
L 2 = 20,00	H 2 = 9,0	B 2 = 9,00
L 3 = 25,00	H 3 = 12,0	B 3 = 12,00
L 4 = 30,00		
L 5 = 35,00		
L 6 = 40,00		
L 7 = 45,00		

Fonte: D'alambert (2012).

Figura 8 - Esquematisação geral das dimensões de um galpão industrial



Fonte: D'alambert (2012).

Conforme apresentado no manual “Galpões em Pórticos com Perfis Estruturais Laminados” da GERDAU Açominas, a grande variabilidade de dimensões possíveis a se adotar para o vão dos pórticos, requer que ocorra um estudo prévio para adoção de um sistema estrutural de cobertura que seja eficaz para uma ampla gama de dimensões de vãos.

É sensato afirmar que um pórtico com um vão de 15 metros possui um comportamento mecânico diferente de um pórtico com um vão de 30 metros, ao mesmo tempo em que as dimensões e resistência da estrutura de cobertura para um vão de 30 metros deve ser demasiadamente maior do que a estrutura de cobertura de um vão de 15 metros. Ademais, não somente as dimensões irão variar, mas também, configurações do sistema estrutural deverão se apresentar mais eficientes para determinados tamanhos de vãos.

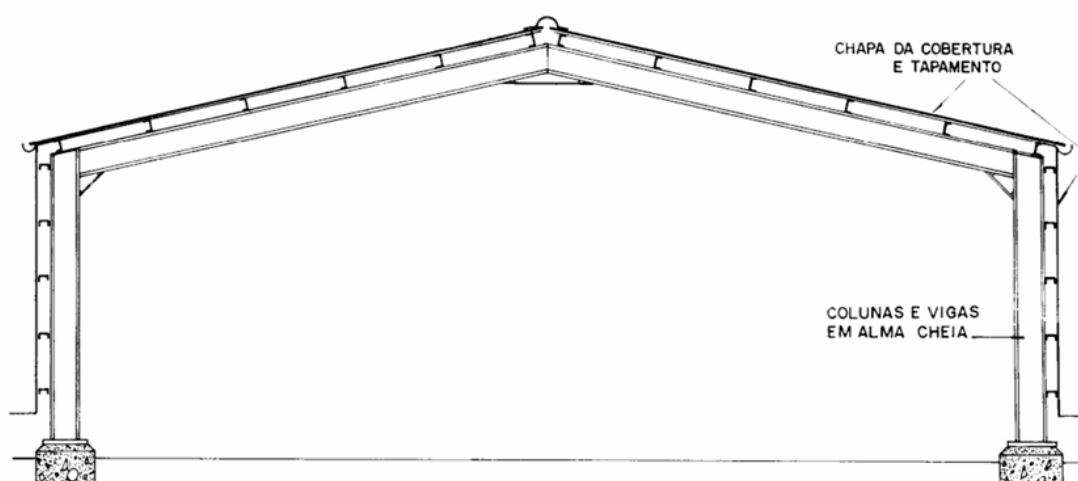
A partir deste pretexto, este trabalho visa contribuir com um estudo comparativo para determinar a eficiência de duas configurações usuais de estruturas de coberturas para galpões industriais de acordo com a arquitetura e tamanho do vão do pórtico do galpão a ser implementado.

2.3.1 Estrutura de cobertura em viga de alma cheia e em treliça

Os tipos mais comuns de galpões em aço são os formados por pórticos com um único vão transversal e pórticos com coberturas em duas águas. (PRAVIA; DREHMER; JÚNIOR, 2018) Os pórticos são o elemento estrutural principal de um galpão e são os elementos que mais

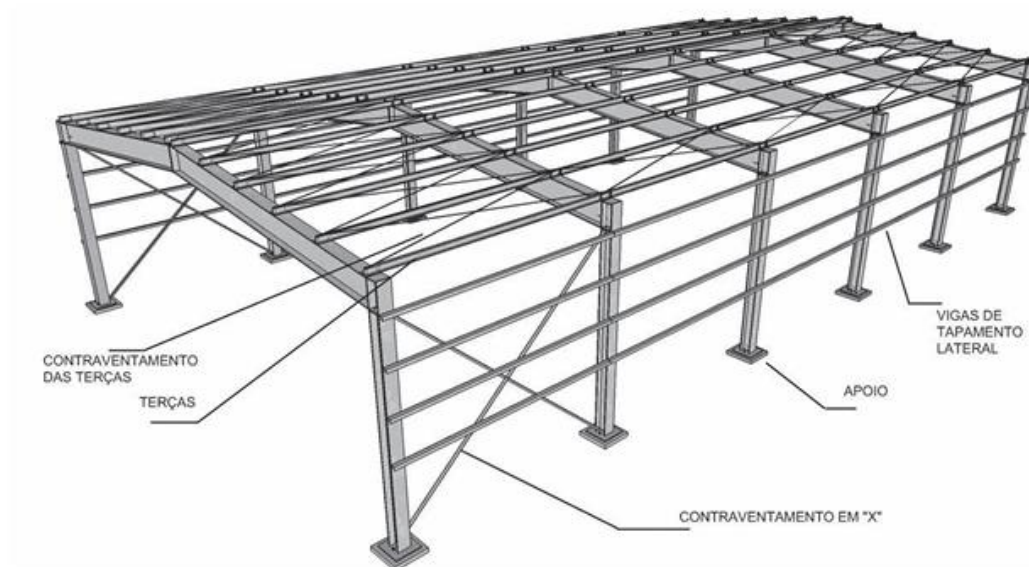
interferem no comportamento mecânico da estrutura e na eficiência de custo e prazo, afinal, a grande parcela dos materiais necessários para a execução da estrutura são partes dos pórticos. As Figuras 9 e 10 apresentam uma esquematização da primeira configuração de estrutura de cobertura que será abordada neste trabalho e uma das mais utilizadas no mercado, um pórtico de duas águas com colunas e vigas de perfil laminado de alma cheia.

Figura 9 - Pórtico de coluna e viga de perfil laminado de alma cheia



Fonte: Bellei (1998).

Figura 10 - Galpão com estrutura de cobertura de viga de perfil laminado de alma cheia

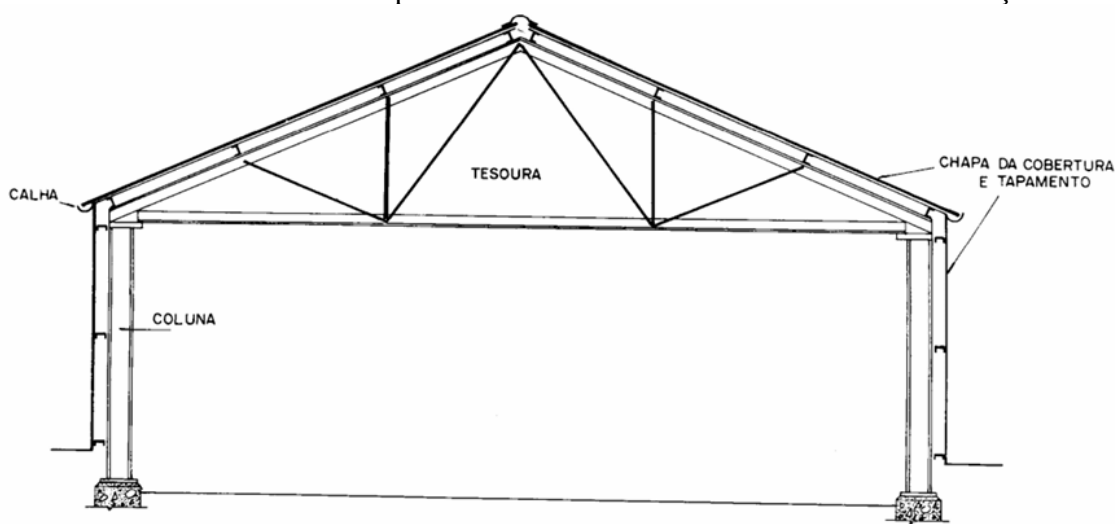


Fonte: Centro Brasileiro da Construção em Aço (2018).

Bellei (1998) cita em sua obra “Edifícios Industriais em Aço” que coberturas de vigas de perfil laminado em alma cheia podem ser economicamente viáveis até vãos de 25 metros. Partindo do pressuposto, coberturas com estruturas de treliças seriam economicamente mais viáveis para vãos acima de 25 metros pelo teórico menor peso da estrutura treliçada. Portanto, a partir do estudo de caso proposto neste trabalho, almeja-se justificar essa afirmação analisando o peso e taxa de aço gerada por uma cobertura de viga de perfil laminado e uma cobertura de estrutura treliçada nos vãos de 20, 25 e 30 metros e determinar qual configuração de cobertura demanda o menor emprego de aço para a estrutura dos pórticos.

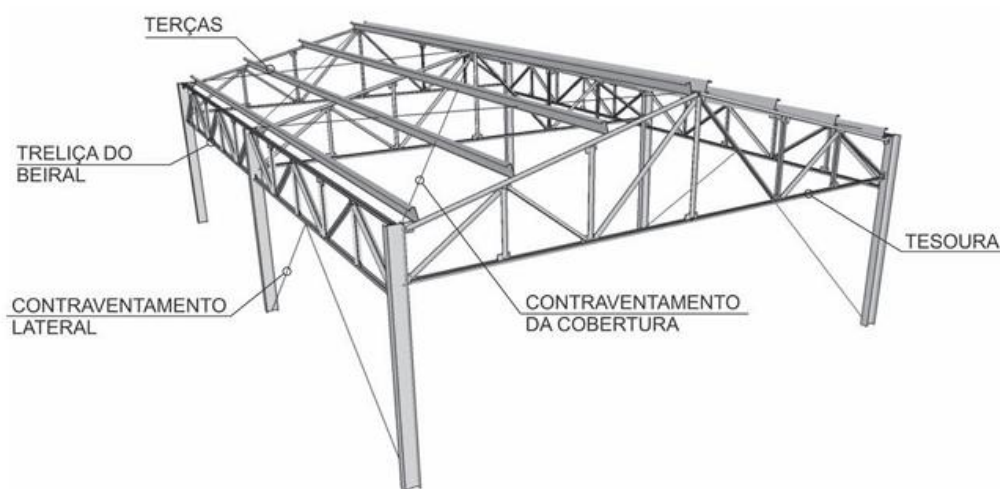
As Figuras 11 e 12 apresentam a esquematização da segunda configuração de estrutura de cobertura que será abordada neste trabalho, e uma das mais usuais na implementação de um galpão industrial, as coberturas treliçadas.

Figura 11 - Pórtico com coluna de perfil laminado e estrutura de cobertura de treliça metálica



Fonte: Bellei (1998).

Figura 12 - Galpão com estrutura de cobertura de treliça metálica



Fonte: Centro Brasileiro da Construção em Aço (2018).

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho, será apresentado o dimensionamento de um galpão em estrutura metálica abordando as duas configurações estruturais apresentadas para os mesmos tamanhos de vão de pórtico. Os detalhes do dimensionamento, determinação das ações e carregamentos, escolha dos perfis da viga de alma cheia e perfis das tesouras da estrutura treliçada, definição da taxa de aço e peso da estrutura que fornecerão dados para a comparação da eficiência de ambas as configurações, serão apresentados nos próximos capítulos.

2.3.2 Viabilidade econômica para implantação de um galpão industrial

A escolha do Sistema estrutural para a implantação de uma edificação requer uma série de análises de cunho estrutural, econômico, disponibilidade de materiais, fornecedores, prestadores de serviço e rapidez construtiva. Pinho e Penna (2008) sugerem que a mais forte característica das estruturas de aço é a rapidez construtiva, diferente da construção convencional que normalmente apresenta caminho crítico na fase de estrutura e que conseqüentemente limita o andamento da obra. Este fato por ser justificado pela característica modular da maioria das construções em aço, sobretudo nos galpões metálicos, cujo muito comumente apresentam pórticos padronizados e regularmente espaçados. Outro fator a se observar, é a pré-fabricação dos elementos nas indústrias, no qual as peças que irão compor a estrutura chegam no canteiro de obras apenas para serem integradas e montadas no local da obra.

Contudo, essa característica intrínseca das estruturas metálicas traz uma necessidade de logística e organização extremamente importantes, a fabricação, transporte e montagem possuem um peso muito relevante no custo global para a implantação dessas edificações, e um processo eficaz de carga, transporte, descarga, conferência e armazenagem das peças é fundamental para o sucesso econômico da obra.

Além da esquematização de transporte e montagem, a predefinição da arquitetura e dimensões da edificação também impactarão significativamente na definição dos elementos e das características econômicas da obra. Como sugere Pinho (2008), no manual “Transporte e Montagem”, iniciativa do CBCA para difusão do aprimoramento da indústria de estruturas metálicas no país, um sistema estrutural todo em aço (ou misto de concreto e aço) deve ser feito a partir da escolha dos seguintes itens:

- Tipo de aço;
- Tipo de perfil;
- Modulação e tamanho de vãos;
- Tipo de laje;
- Tipo de vedação;
- Estabilidade horizontal;
- Tipo de ligação;
- Vigas e pilares;
- Tipo de proteção contra corrosão;
- Tipo de proteção contra incêndio;
- Durabilidade;
- Esquema de transporte e montagem.

Bellei (1998), também sugere que a viabilidade econômica de uma estrutura metálica vai além da determinação e precificação da estrutura pelo peso do aço em toneladas. Para o autor, os seguintes elementos são fundamentais para uma eficiência de custo na implantação de uma edificação em estrutura metálica:

- Seleção do sistema estrutural;
- Projeto dos elementos estruturais individuais;
- Projeto e detalhe das conexões;
- Processo de fabricação;

- Especificações para fabricação e montagem;
- Sistema de proteção contra corrosão;
- Sistema de proteção contra incêndio.

A partir das principais etapas que interferem na eficiência de custo e prazo de uma edificação em estrutura metálica, no Quadro 3 está apresentado uma estimativa de percentual de custo de cada etapa no custo global de uma obra.

Quadro 3 - Percentual de custo de cada etapa de implantação de uma obra de estrutura metálica

Etapa	custo (%) em referência ao custo global
Projeto estrutural	1 a 3
Detalhamento	2 a 6
Materiais e insumos	20 a 50
Fabricação	20 a 40
Limpeza e pintura	10 a 25
Transporte	1 a 3
Montagem	20 a 35

Fonte: Adaptado de Bellei (1998).

Diante do exposto, e aplicando uma análise de Curva ABC, atribuída ao economista italiano Vilfredo Pareto, e amplamente utilizada na Gestão de projetos e custos de uma obra de engenharia, pode-se afirmar que as etapas mais representativas e que ditarão a eficiência de custo são os materiais, e a mão de obra de fabricação, transporte e montagem.

Partindo do pressuposto, a proposta deste trabalho é de avaliar justamente a etapa mais representativa da “Curva ABC”, ou seja, os materiais, obtendo a quantidade de aço estrutural empregado a partir do desenvolvimento do dimensionamento do galpão com cobertura de viga de alma cheia e galpão com cobertura de estrutura treliçada. Por fim, um estudo comparativo para determinar qual das soluções de estrutura de cobertura demandam o emprego de menor quantidade de aço estrutural.

3 METODOLOGIA

Para o alcance dos resultados propostos, este trabalho terá como metodologia um estudo comparativo para analisar duas diferentes configurações de coberturas em um modelo de edificação cujo aço é amplamente destacado como material construtivo, os galpões industriais. Serão analisadas e comparadas seis combinações de pórticos formadas entre duas configurações estruturais de coberturas (treliçada e viga laminada de alma cheia) em três dimensões comerciais de vãos (20, 25 e 30 metros) para a cobertura dos galpões metálicos. As configurações de estrutura da cobertura e as dimensões dos vãos foram criteriosamente escolhidas por ampla utilização no mercado nacional.

Como primeira etapa, foi feita uma revisão bibliográfica com enfoque nas características gerais de um galpão metálico, sobretudo nas configurações que serão abordadas neste trabalho, que são galpões formados por pórticos de colunas e vigas de alma cheia e colunas de alma cheia e estruturas de cobertura treliçadas, com duas águas e pórticos regularmente espaçados. Ressalta-se que o foco deste trabalho será na análise comparativa dos elementos primários das estruturas dos galpões, isto é, os pórticos formados pelas colunas e estrutura de cobertura, não contemplando ligações, fechamentos e estruturas de fundações.

Em segundo momento, será feito o dimensionamento dos sistemas estruturais das seis combinações de pórticos propostas. O dimensionamento será feito a partir das diretrizes da ABNT NBR 6123, ABNT NBR 8800 e ABNT NBR 14762, além de Normas Complementares abordadas no Quadro 1. Como apoio para o dimensionamento, definição das ações e carregamentos e obtenção dos resultados, serão utilizados os softwares VisualVentos®, Ftool®, Cype 3D®, Microsoft Excel para cálculos e verificação dos perfis a partir da ABNT NBR 8800, e outros softwares e ferramentas que se fizerem necessários e pertinentes para obtenção do melhor resultado possível e cumprimento da proposta.

Após a obtenção dos resultados estruturais dos galpões, serão analisados os dados obtidos de taxa de aço e peso total da estrutura, e será feito uma análise comparativa sobre a solução de estrutura de cobertura mais eficiente em peso total e quantidade de aço empregado. Por fim, para a conclusão do trabalho serão apresentados os resultados das estruturas de cobertura e determinação da solução mais eficiente para cada vão proposto, para esta determinação, serão discutidos os dados obtidos e possíveis fatores externos que podem contribuir para esta discussão, como necessidades diferentes de mão de obra em cada uma das duas soluções.

4 PARÂMETROS DE PROJETO

Como início do desenvolvimento da metodologia proposta, serão definidos e fixados os parâmetros de projeto principais que serão utilizados para o dimensionamento da estrutura e obtenção dos resultados que antecederão a análise comparativa. Esta etapa é de suma importância para fixação e padronização das variáveis que não serão analisadas neste trabalho. Com esta padronização, fica-se em evidência as variáveis que serão consideradas para obtenção da análise comparativa almejada, isto é, o vão e a estrutura de cobertura dos galpões.

4.1 Localização

Para a consideração da ação do vento no dimensionamento dos galpões a partir da ABNT NBR 6123, será considerado a localização na cidade de Goiânia-GO, situado em terreno plano em uma zona industrial.

4.2 Parâmetros gerais

Por se tratar de um galpão com localização em zona industrial, a finalidade dele será para armazenamento de materiais, e apresentará características comuns para um galpão conforme apontado por Pravia, Drehmer e Júnior (2018), isto é, único pavimento, telhado de duas águas, e constituídos de sistemas estruturais compostos por pórticos regularmente espaçados.

Para alcançar os objetivos deste trabalho e garantir o desenvolvimento do dimensionamento estrutural das 6 (seis) configurações propostas, o galpão será simplificado em dois fundamentos importantes para a sua concepção: Não possuirá mezanino e será considerado sem aberturas com portão metálico estanque.

4.3 Arquitetura dos galpões

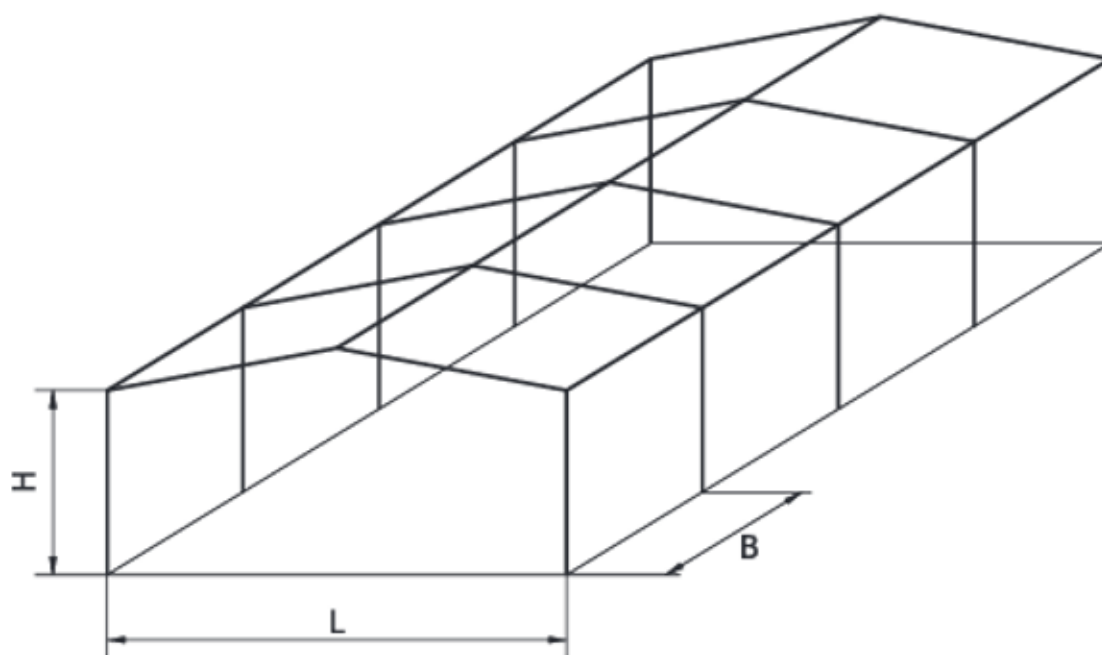
“Os galpões ou edifícios industriais são construções em aço geralmente de um único pavimento, constituídos de sistemas estruturais compostos por pórticos regularmente espaçados” (Pravia, Drehmer e Júnior, 2018, p. 10).

A partir desta definição de galpões enfatizada, e pela característica modular de construção dos galpões metálicos, pode-se afirmar que um dos parâmetros mais importantes

para a definição da arquitetura de um galpão é a distância entre os pórticos. A obra de propriedade da GERDAU Açominas intitulada “Galpões em Pórticos com Perfis Estruturais Laminados” traz as dimensões de 6, 9 e 12 metros como as mais usuais no Brasil para a distância entre pórticos. Ademais, como pode ser observado na Figura 7 do capítulo de Revisão Bibliográfica, além da distância entre pórticos, a GERDAU Açominas traz neste manual também as dimensões usuais de altura das colunas (pé direito) e vãos dos pórticos.

Como definição da arquitetura e padronização das dimensões dos galpões, foram assumidas as dimensões de 6 (seis) metros para a distância entre pórticos e 6 (seis) metros para a altura das colunas (pé direito). Os vãos, por serem uma das variáveis fundamentais para o estudo comparativo proposto, terão dimensões variáveis entre 20, 25 e 30 metros. Na Figura 13 a seguir estão apresentadas as dimensões principais da arquitetura dos galpões.

Figura 13 - Dimensões principais da arquitetura dos galpões



B (m)	6
H (m)	6
L (m)	Variável entre 20, 25 e 30

Fonte: Adaptado de D'alambert (2012).

Com a definição das principais dimensões da arquitetura dos galpões e determinação da dimensão dos 3 (três) vãos propostos para o estudo comparativo, resta a definição do comprimento do galpão, no qual a dimensão se dá sumariamente pelo espaçamento e quantidade de pórticos presentes no sistema estrutural do galpão. Para concluir a determinação da arquitetura do galpão e padronização das dimensões, foi definido o comprimento de 60 metros.

4.4 Características do telhado

Conforme apresentado nos parâmetros gerais, o galpão possuirá telhado com duas águas, e de acordo com Pravia, Drehmer e Júnior (2018) no manual do Centro Brasileiro de Construção em Aço: “Galpões de usos gerais”, a inclinação do telhado depende da telha definida para o fechamento da cobertura.

Além da determinação dos autores no manual “Galpões de usos gerais”, há recomendações da ABNT NBR 8800 para uma inclinação mínima de 5% com a finalidade de evitar o acúmulo de água da chuva empossada. De acordo com a ABNT NBR 8800 (2024, p. 117):

Todas as coberturas e pisos de edifícios sujeitos ao recebimento de água de chuva, com inclinação inferior a 5% (ver Anexo C), devem ser verificados para assegurar que a água não venha a se acumular em poças em decorrência dos deslocamentos da estrutura. Nessa verificação, devem ser levados em conta possíveis imprecisões construtivas e recalques de fundação, flechas dos materiais de revestimento e a deformação da própria estrutura sob a carga da água acumulada.

Ademais, para telhas metálicas certificadas pela ABNT NBR 14513, os fabricantes trazem em seus catálogos e manuais técnicos, inclinações mínimas necessárias para a instalação de suas telhas nos sistemas de coberturas. A telha definida para os galpões objeto de estudo deste trabalho foi a telha: **Telha Metálica TP-40 kingspan Isoeste**.

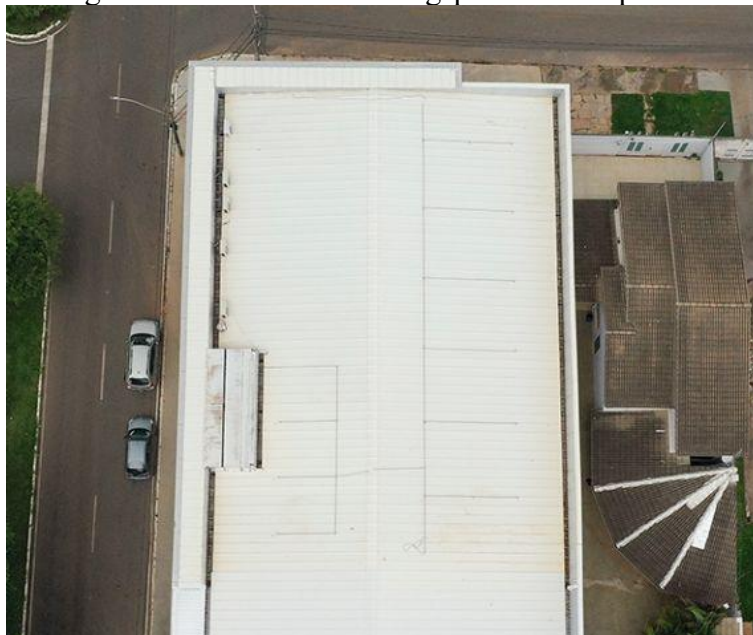
Nas Figuras 14 e 15 podem-se conferir imagens de catálogo da Telha Metálica TP-40 da Kingspan Isoeste.

Figura 14 - Imagem de catálogo TP-40 Kingspan Isoeste



Fonte: Kingspan Isoeste (2025).

Figura 15 - Telha TP-40 Kingspan Isoeste aplicada



Fonte: Kingspan Isoeste (2025).

A Kingspan Isoeste é uma fabricante mundial de telhas e bastante conceituada e utilizada na região de Goiânia, Goiás, onde os galpões propostos estão situados. Outro detalhe importante para a escolha desta telha e consultado diretamente no site oficial da fabricante, é o fato dela ser fabricada na sede da **Kingspan Isoeste** na cidade de Anápolis, Goiás, região de proximidade dos galpões.

Para a sua aplicação, a fabricante recomenda inclinação mínima de 8% e dimensão máxima da água de 20 metros para a instalação da TP-40, dimensão esta, plenamente atendida pela arquitetura dos galpões propostos, cujo a maior dimensão da água do telhado será de 15 metros. Acrescentar, de acordo com a **Kingspan Isoeste**:

“A Telha Metálica TP-40 é indicada para coberturas industriais, comerciais, galpões, armazéns, centros logísticos, instalações agrícolas e residenciais com laje. Sua configuração permite adaptação a diferentes tipos de projeto, conciliando desempenho mecânico e flexibilidade de aplicação.

Além das características principais consultadas no catálogo da Kingspan Isoeste para definição da TP-4, na Tabela 3 também serão apresentados os dados técnicos da telha para as etapas posteriores de levantamento das cargas e dimensionamento estrutural.

Tabela 3 - Dados técnicos da telha definida		
Dados técnicos da Telha Metálica TP-40 Kingspan Isoeste		
Item	Valor	Unidade
Largura útil	980	mm
Largura total	1032	mm
Espessura do aço	0,43 mm 0,50 mm 0,65 mm	mm
Peso	4,13 Kg/m ² 4,81 Kg/m ² 6,25 Kg/m ²	kg/m ²

Fonte: Adaptado de Kingspan Isoeste (2025).

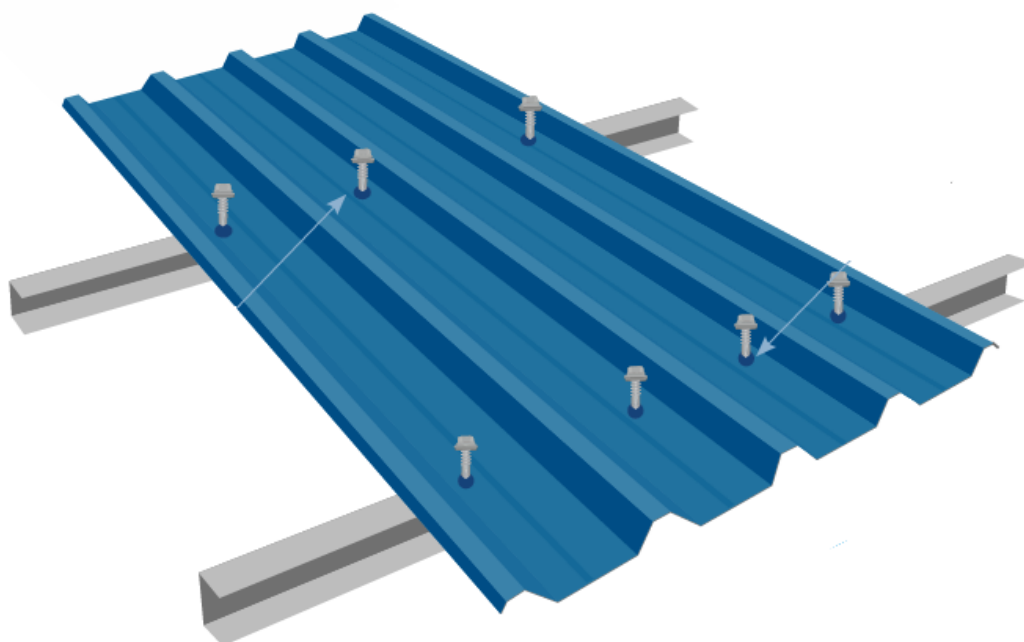
Diante do exposto, a partir das recomendações da ABNT NBR 8800, ABNT NBR 14513 e a partir das características técnicas da telha definida, foi fixada a inclinação da água do telhado em 10% para todos os galpões propostos.

Para a espessura da chapa de aço da telha, Miranda e Cardoso (2022) citam na obra de iniciativa da ABCEM: “Manual Técnico de Telhas de Aço”, que se recomenda a utilização de espessuras a partir de 0,50mm para telhados técnicos, isto é, características do telhado proposto nos galpões deste trabalho, que são de finalidade industrial e receberão cargas de placas solares

e caminhabilidade para eventuais manutenções. Diante do exposto, para as telhas TP-40 da Kingspan Isoeste, fixou-se a espessura de 0,50mm.

Outro elemento fundamental constituinte da estrutura de cobertura dos galpões são as terças, que são vigas horizontais colocadas na cobertura, com a finalidade de suportar os elementos de cobertura (Bellei, 1998, p. 139). Na Figura 16 a seguir, está a esquematização de como as terças cumprem a sua função principal de servir como suporte e receber as cargas das telhas e demais elementos de cobertura. Ademais, as terças cumprem o papel de travar lateralmente a estrutura do galpão contra deslocabilidade, uma vez que são elementos que conectam os pórticos subsequentes uns aos outros.

Figura 16 - Esquematização de suporte das terças para recebimento de telhas



Fonte: Associação Brasileira da Construção Metálica (ABCEM) (2022).

Apesar de serem um elemento estrutural imprescindível para a concepção de um galpão, as terças não serão dimensionadas para o cumprimento da proposta deste trabalho, isto pelo fato de as terças não serem pertencentes a estrutura do pórtico principal, sendo mais caracterizadas como uma estrutura secundária. Por este motivo, será adotado para as terças um perfil metálico padrão preconizado pela ABNT NBR 14762 e será considerado o peso linear deste perfil metálico para as etapas de dimensionamento da estrutura apresentadas adiante neste trabalho.

Outro fator importante a ser ponderado, as terças serão consideradas no dimensionamento do pórtico principal como cargas pontuais e permanentes, uma vez que estruturalmente, as terças seguem um espaçamento padrão de dois apoios para cumprir sua principal função de servir como estrutura para os elementos da cobertura como telhas e sobrecargas, como placas de energia solar.

D'alambert (2012) cita no manual “Galpões em Pórticos com Perfis Estruturais Laminados” que o máximo espaçamento das terças deve ser de 2,5m para garantir o efetivo travamento lateral dos pórticos estruturais dos galpões. Outro fator determinante para consideração do espaçamento das terças, é a telha que será utilizada na cobertura, e quais são os dados técnicos da telha para diferentes espaçamentos das terças de apoio.

Na Figura 17 a seguir, está apresentada a sobrecarga admissível (kg/m^2) da TP-40 de acordo com a espessura da telha e distância entre apoios (espaçamento das terças).

Figura 17 - Sobrecarga admissível da TP-40

Figura 17 – Sobrecarga admissível da H 11-16

Sobrecarga máxima admissível (kg/m²) de acordo com a aplicação e distância entre apoios

ESPESSURA (mm)	DISTÂNCIA ENTRE APOIOS OU VÃOS (mm)															
	1,80		2,00		2,20		2,40		2,60		2,80		3,00		3,20	
–	C	F	C	F	C	F	C	F	C	F	C	F	C	F	C	F
2 APOIOS	2 APOIOS															
0,43	142	142	114	106	94	78	94	78	78	–	–	–	–	–	–	–
0,50	168	168	135	125	111	93	92	70	78	–	–	–	–	–	–	–
0,65	223	223	180	167	147	124	123	94	104	73	89	–	76	–	–	–
3 APOIOS	3 APOIOS															
0,43	142	142	114	106	94	78	78	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,50	168	168	135	125	111	93	92	70	78	–	–	–	–	–	–	–
0,65	223	223	180	167	147	124	123	94	104	73	89	–	76	–	–	–
4 APOIOS OU +	4 APOIOS OU +															
0,43	226	226	169	169	138	137	113	115	95	97	82	82	–	–	–	–
0,50	264	264	195	195	162	161	133	133	113	112	96	96	83	83	–	–
0,65	292	292	256	256	210	210	178	176	149	149	127	127	110	110	96	96

C= cobertura – Flecha de L/120 | F= Fechamento – Flecha de L/200

C= cobertura – Flecha de L/120 | F= Fechamento – Flecha de L/200

Fonte: Kingspan Isoeste (2025).

Por se tratar de um galpão com finalidade industrial, a TP-40 selecionada estará sujeita a recebimento de ação permanente adicional proveniente de placa de energia solar. A ABNT NBR 6120 recomenda o valor de 15 kg/m^2 de carga permanente de placas fotovoltaicas para o

cálculo de estruturas de edificações. Além disto, a ABNT NBR 8800:2024 preconiza a consideração de sobrecarga em telhados de edifícios de aço e mistos de aço e concreto. De acordo com a ABNT NBR 8800 (2024, p. 112):

Nas coberturas comuns (telhados), na ausência de especificação mais rigorosa, deve ser prevista uma sobrecarga característica mínima de 0,25 kN/m², em projeção horizontal. Admite-se que essa sobrecarga englobe as cargas decorrentes de instalações elétricas e hidráulicas, de isolamentos térmico e acústico e de pequenas peças eventualmente fixadas na cobertura, até um limite superior de 0,05 kN/m².

Ao acrescentar os 0,25 kN/m² (25 kg/m²) da sobrecarga e os 15 kg/m² de carga permanente das placas fotovoltaicas, há 40 kg/m² de carregamento a ser suportado pela TP-40. Na Figura 18 está evidenciada a sobrecarga máxima admissível da TP-40 com espessura de 0,50mm para uma distância entre apoios (espaçamento das terças) adotada de 2,0m.

Sobrecarga máxima admissível (kg/m²) de acordo com a aplicação e distância entre apoios										
ESPESSURA (mm)	DISTÂNCIA ENTRE APOIOS OU VÃOS (mm)									
	1,80		2,00		2,20		2,40		2,60	
	C	F	C	F	C	F	C	F	C	F
2 APOIOS	2 APOIOS									
0,43	142	142	114	106	94	78	94	78	78	–
0,50	168	168	135	125	111	93	92	70	78	–
0,65	223	223	180	167	147	124	123	94	104	73
3 APOIOS	3 APOIOS									
0,43	142	142	114	106	94	78	78	–	–	–
0,50	168	168	135	125	111	93	92	70	78	–
0,65	223	223	180	167	147	124	123	94	104	73
4 APOIOS OU +	4 APOIOS OU +									
0,43	226	226	169	169	138	137	113	115	95	97
0,50	264	264	195	195	162	161	133	133	113	112
0,65	292	292	256	256	210	210	178	176	149	149
C= cobertura – Flecha de L/120 F= Fechamento – Flecha de L/200										

Fonte: Adaptado de Kingspan Isoeste (2025).

Nessas condições, a sobrecarga admissível da telha TP-40 é de 135 kg/m², o que é suficiente para suportar o carregamento proveniente das placas fotovoltaicas, da sobrecarga prevista na ABNT NBR 8800, e de caminhabilidade de funcionários e prestadores de serviço para eventuais manutenções. Diante disso, o espaçamento adotado das terças constituintes da estrutura do galpão será de 2,0 metros.

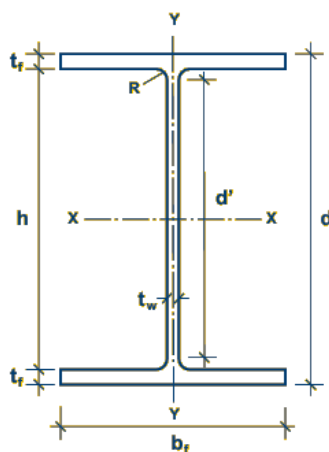
4.5 Definição dos materiais estruturais

Por fim, para concluir os parâmetros de projeto, serão especificados os tipos de aço e perfis que serão utilizados para o sistema estrutural dos galpões. Bellei (1998, p. 18) indica os principais aços empregados no Brasil com especificação ASTM (American Society for Testing and Materials) e que são aceitos pela ABNT NBR 8800.

Os destaques ficam para os aços ASTM A572 Grau 50, um aço de Baixa Liga e Alta Resistência Mecânica e o aço ASTM A36, um Aço Carbono, que são os aços estruturais mais usados no Brasil (Pravia, Drehmer e Júnior, 2018, p. 18).

A GERDAU traz em seu catálogo perfis laminados em W (formato I com mesas paralelas) que utilizam o aço ASTM A572 Grau 50 em sua fabricação, além de uma ampla variedade de dimensões e bitolas, o que permitirá obter como resultado após o dimensionamento dos galpões, uma flexibilidade de tamanho de perfis a serem definidos para a finalidade de obter o menor peso da estrutura. A Figura 19 a seguir apresenta a seção transversal do **Perfil Estrutural W GERDAU** com destaque para as dimensões variáveis amplamente disponíveis em seu catálogo.

Figura 19 - Esquematização de dimensões PERFIL W Gerdau



Fonte: Adaptado de Gerdau (2025).

O aço carbono ASTM A36 é a matéria-prima principal para fabricação dos perfis formados a frio (perfis em U e cantoneiras), segundo Bellei (1998), o aço A36 é amplamente empregado em estruturas de pequeno e médio porte devido a sua excelente soldabilidade e custo-benefício, sendo a escolha padrão para elementos secundários e elementos trabalhados como as treliças de galpões industriais.

Diante do exposto, a Tabela 4 a seguir apresenta os aços, tipologia dos perfis e elementos em que serão aplicados para a estrutura dos galpões propostos.

Tabela 4 - Aços e materiais aplicados na estrutura dos galpões

Aço	Tipologia dos perfis	Fy (MPa)	Fu (MPa)	Elementos estruturais
ASTM A572 Gr. 50	Perfis Laminados W (I)	345	450	Colunas e vigas
ASTM A36	Cantoneiras e Perfis U	250	400	Treliças e terças

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 Conclusão dos parâmetros de projeto

No Quadro 4 a seguir está a síntese da definição dos parâmetros de projeto dos galpões.

Quadro 4 - Resumo dos parâmetros de projeto

Item	Descrição
Localização	Goiânia-GO
Terreno	Terreno plano em zona industrial
Finalidade	Armazenamento de materiais
Pavimento	Único
Telhado	Duas águas
Modelo estrutural	Pórticos estruturais regularmente espaçados
Características	Sem mezanino e com portão estanque/sem aberturas
Distância entre pórticos	6 metros
Altura das colunas (Pé direito)	6 metros
Largura dos vãos	20, 25 e 30 metros
Comprimento do galpão	60 metros
Inclinação do telhado	10%

Tipo de Telha	Telha Metálica TP-40 Kingspan Isoeste
Espessura da telha	0,50mm
Carga permanente extra	Previsão de placas fotovoltaicas para geração de energia solar
Espaçamento das terças	2 metros
Aços estruturais	ASTM A572 Gr. 50 para colunas e vigas, ASTM A36 para treliças e terças
Tipos de perfis	Perfis laminados W (I) GERDAU para colunas e vigas, cantoneiras e perfis em U para elementos da treliça e terças

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 DEFINIÇÃO DAS AÇÕES E COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Neste capítulo, serão definidas e quantificadas todas as ações que conferem carregamento para a estrutura dos galpões e que serão utilizadas no dimensionamento e verificação dos elementos estruturais, seguindo todas as diretrizes das Normas Técnicas evidenciadas no Quadro 1. A síntese para o dimensionamento da estrutura dos galpões será a ABNT NBR 8800, no que tange ao atendimento dos elementos estruturais aos Estados Limites Último e de Serviço preconizados na Norma.

Bellei (1998, p. 78) indica que os galpões industriais estão sujeitos as seguintes influências de cargas, além de outras que possam surgir em casos especiais:

- 1 – Cargas devido ao vento;
- 2 – Cargas acidentais verticais (sobrecarga);
- 3 – Cargas permanentes;
- 4 – Cargas devido a pontes rolantes;
- 5 – Cargas devido à temperatura.

No capítulo 5 serão detalhadas estas cargas atuantes na estrutura, a iniciar pelas cargas devido ao vento, e no capítulo 6 serão realizadas as conferências dos elementos estruturais quanto ao atendimento à ABNT NBR 8800, para que se resulte no dimensionamento propriamente dito da estrutura dos 6 (seis) galpões propostos.

5.1 Cargas devido ao vento

A ação devido ao vento nas edificações é normatizada pela ABNT NBR 6123, e ela fornece as diretrizes para determinação da carga do vento cujo as edificações estão sujeitas. As principais variáveis para a determinação do vento são a localização da edificação, características de localidade e topográficas do terreno em que ela está situada, dimensões da edificação e presenças de aberturas frontais e laterais.

A ação do vento na edificação é decomposta em duas direções, que incide perpendicularmente (a 90°) e longitudinalmente (a 0°) na edificação. Para a determinação das cargas a 90° e a 0° provenientes do vento será utilizado o software VisualVentos®, de propriedade da Universidade de Passo Fundo, em acordo com as diretrizes da ABNT NBR 6123:2023.

Para início do cálculo das forças devido ao vento ao qual a edificação está sujeita, deve-se considerar os valores numéricos da velocidade do vento (m/s) atribuídos pela ABNT NBR 6123, a partir da localização e características do terreno em que a edificação está situada. Conforme apresentado no item 4.2 da ABNT NBR 6123, a velocidade característica do vento (V_k) é uma multiplicação da velocidade básica do vento (V_0), pelos fatores de características do terreno: S_1 (Fator topográfico), S_2 (Fator de rugosidade) e S_3 (Fator probabilístico).

$$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3$$

Gonçalves et al. (2004) define a velocidade do vento como “a velocidade de uma rajada de 3s, a 10m acima do terreno, em campo aberto, e excedida na média uma vez em 50 anos”.

A ABNT NBR 6123 define os fatores S_1 , S_2 e S_3 como sendo:

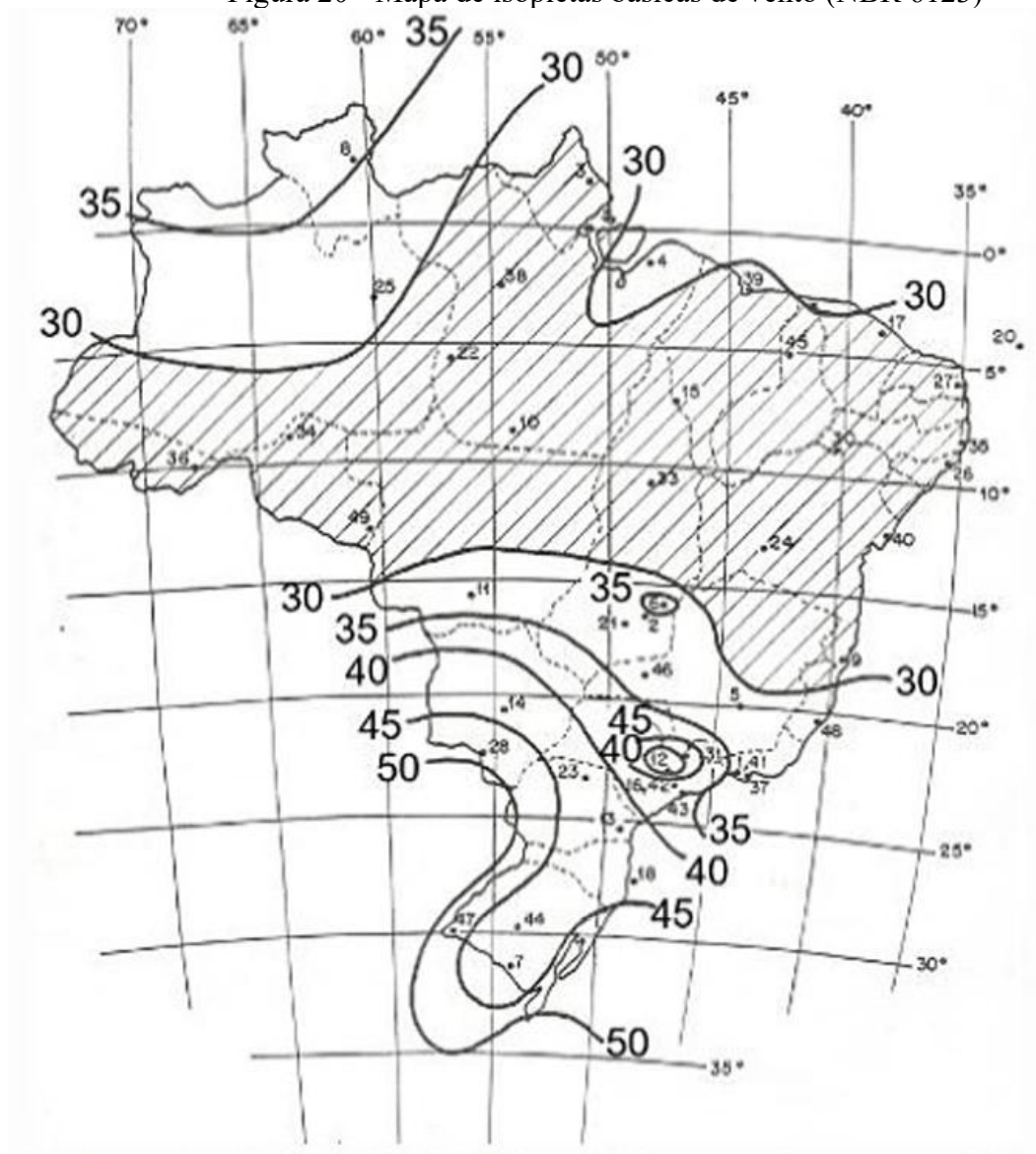
S_1 : Fator topográfico

S_2 : Fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação, estrutura ou componente de estudo, e de sua altura sobre o terreno

S_3 : Fator baseado em conceitos probabilísticos

Para obtenção dos valores da velocidade básica do vento, a ABNT NBR 6123 disponibiliza o “Mapa de Isopletas de velocidade básica V_0 (m/s)”, conforme mostrado na Figura 20, cujo confere-se a velocidade básica aproximada do vento a partir da localização geográfica da edificação no território brasileiro.

Figura 20 - Mapa de isopletas básicas de vento (NBR 6123)

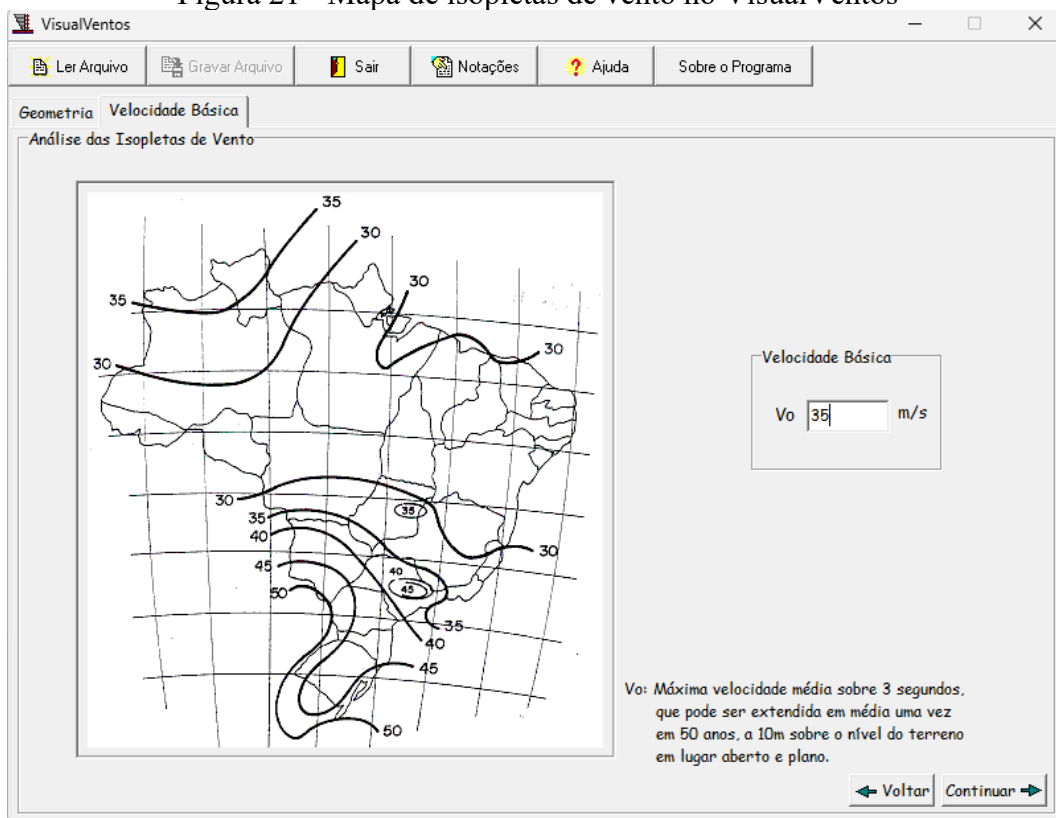


Fonte: ABNT (2023)

Para prosseguimento na determinação dos esforços do vento, será utilizado o software VisualVentos®, de propriedade da Universidade de Passo Fundo, em acordo com as diretrizes da ABNT NBR 6123:2023. O VisualVentos® fornece de uma forma dinâmica e sistematizada os valores característicos que serão utilizados para a determinação das cargas do vento, e auxilia no cálculo do carregamento em si.

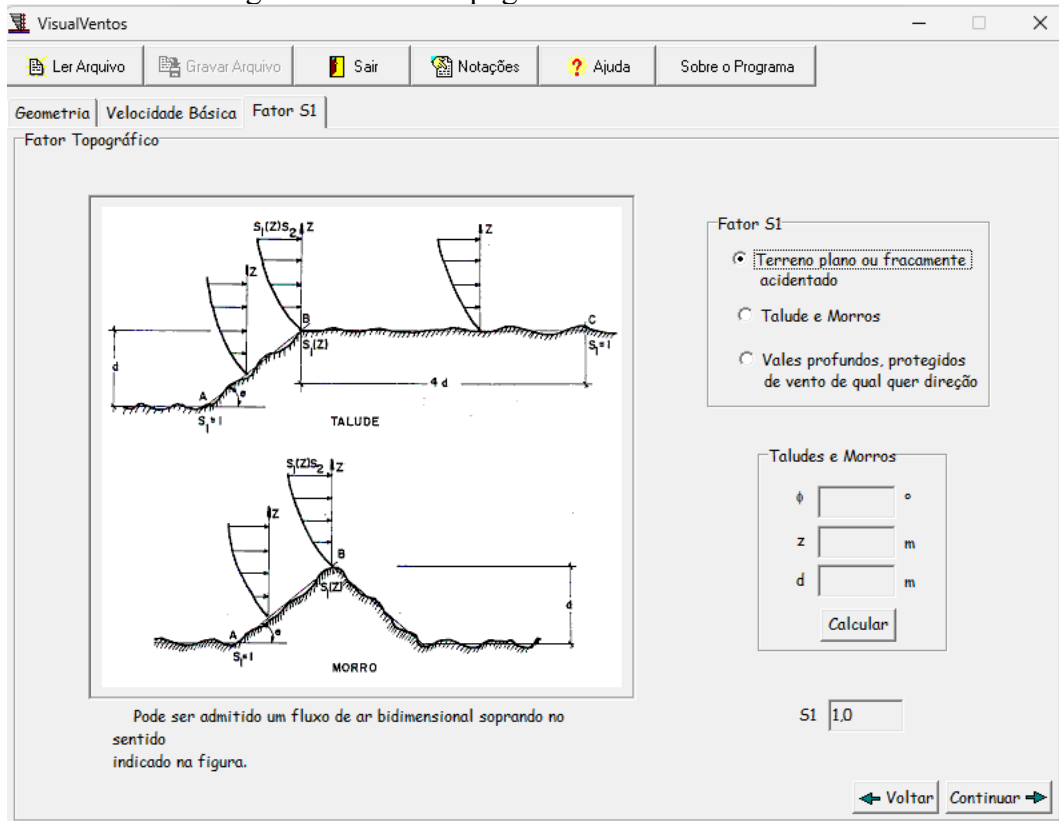
Na Figura 21 a seguir, está a interface inicial do VisualVentos® com o Mapa de Isopletas de velocidade básica, em que se pode conferir que a velocidade básica do vento (V_0) para os galpões objetos de estudo deste trabalho, situados na cidade de Goiânia-GO, possuem como $V_0=35$ m/s.

Figura 21 - Mapa de isopletas de vento no VisualVentos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 22 a seguir, está a interface do VisualVentos® para a determinação do S_1 : Fator topográfico. Conforme apresentado no Capítulo 4: Parâmetros de Projeto, os galpões estão situados em terreno plano e em zona industrial. Logo, o dado de entrada no software será a opção: *Terreno plano ou fracamente acidentado*.

Figura 22 - Fator topográfico S_1 no VisualVentos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para terreno plano ou fracamente acidentado, a ABNT NBR 6123 indica que o fator topográfico S_1 é: $S_1 = 1,00$.

Na Figura 23 a seguir, está a interface do VisualVentos® para a determinação do S_2 : Fator de rugosidade.

Figura 23 - Fator de rugosidade S2 no VisualVentos

VisualVentos

Geometria | Velocidade Básica | Fator S1 | Fator S2

Fator de Rugosidade

Categoria do terreno

Categoria	Descrição do ambiente
☐ I	Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente.
☐ II	Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1m. Exemplos: zonas costeiras planas; pântanos com vegetação rala; campos de aviação; pradarias e charnecas; fazendas sem sebes ou muros.
☐ 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 considerada igual a 3m. Exemplos: granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos, fazendas com sebes e/ou muros, subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas.
☒ IV	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados em zona florestal, industrial ou urbanizada. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10m. Exemplos: zonas de parques e bosques com muitas árvores; cidades pequenas e seus arredores; subúrbios densamente construídos de grandes cidades; áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.
☐ V	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25m. Exemplos: florestas com árvores altas de copas isoladas; centros de grandes cidade; complexo industriais bem desenvolvidos.

Classe de edificação

Classe	Descrição
☐ A	Maior dimensão menor ou igual a 20m
☐ B	Maior dimensão entre 20 e 50m
☒ C	Maior dimensão maior ou igual 50m

Maior dimensão: 60,00 m

Fator S2: 0,76

Calcular

Voltar Continuar

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme apresentado no Capítulo 4: Parâmetros de Projeto, os galpões estarão situados em terreno plano e em zona industrial. Logo, o dado de entrada no software para o Fator de Rugosidade em relação a Categoria do terreno será a opção: *Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados em zona florestal, industrial ou urbanizada. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10m. Exemplos: zonas de parques e bosques com muitas árvores; cidades pequenas e seus arredores; subúrbios densamente construídos de grandes cidades; áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.*

O Fator de rugosidade também leva em consideração a Classe de edificação. A ABNT NBR 6123 apresenta no item 5.3.2 a separação em três classes, classificadas de acordo com a maior dimensão da edificação, sendo elas:

Classe A: Toda edificação, estrutura, parte de edificação ou de 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 de estrutura, cuja maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal seja maior do que 20 m e menor do que 50 m.

Classe C: Toda edificação, estrutura, parte de edificação e estrutura, cuja maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

Diante do exposto na norma e de acordo com a maior dimensão dos galpões objetos de estudo deste trabalho, isto é, o comprimento de 60 metros, o dado de entrada no software para a Classe da edificação será: *Classe C, Maior dimensão maior ou igual a 50 metros.*

O VisualVentos® calcula automaticamente o Fator de rugosidade S2 a partir da determinação da Categoria do Terreno e Classe da Edificação explicadas anteriormente. O software utiliza a seguinte expressão apresentada no item 5.3.3 da ANBT NBR 6123 para a determinação de S2:

$$S2(z) = b * Fr * (z/10)^p$$

A expressão leva em consideração uma altura z acima do nível geral do terreno, que no caso dos galpões propostos é de 6 metros acima do nível do terreno, além do mais, o Fator de rugosidade leva em consideração um Fator de Rajada (Fr) e Parâmetros Meteorológicos (b e p), cujo valores podem ser consultados nas Tabelas 1 e 2 da ABNT NBR 6123, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 24 - Fatores de Rajada (Fr) e Parâmetros meteorológicos (b e p) da ANBR NBR 6123

Tabela 1 – Parâmetros meteorológicos

Categoria	Zg (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b_m	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b_m	1,00	1,00	1,00
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b_m	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b_m	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b_m	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Tabela 2 – Fator de rajada

F_r	Classes		
	A	B	C
	1,00	0,98	0,95

Fonte: ANBT (2023).

Por fim, o VisualVentos® calcula o Fator de Rugosidade a partir dos dados de entrada e interpolação com as Tabelas da ABNT NBR 6123 e o resultado para S_2 é: $S_2 = 0,76$.

Na Figura 25 a seguir, está a interface do VisualVentos® para a determinação do S_3 : Fator estatístico.

Figura 25 - Fator estatístico S_3 no VisualVentos

Grupo	Descrição
☐ 1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros, centrais de comunicação, etc)
☒ 2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação
☐ 3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc)
☐ 4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc)
☐ 5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção

S3

Fonte: Elaborado pelo autor.

A ABNT NBR 6123 determina o Fator estatístico de acordo com conceitos estatísticos considerando o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Logo, a determinação de S_3 é fundamentada na finalidade da edificação. O padrão é o Grupo II para edificações com finalidade comercial e industrial conforme apresentado na Figura 28, portanto: O Fator estatístico S_3 é: $S_3 = 1,00$.

Diante do exposto, a partir da Velocidade Básica de Vento (V_0), e os fatores S_1 , S_2 e S_3 calcula-se a Velocidade Característica do Vento (V_k):

$$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3$$

$$V_k = 35 \text{ m/s} * 1,00 * 0,76 * 1,00$$

$$V_k = 26,6 \text{ m/s}$$

Com o cálculo da Velocidade Característica do Vento, calcula-se a **Pressão Dinâmica (q)**, que incide sobre as paredes e telhado dos galpões. A ANBT NBR 6123 no item 4.2 cita: “A velocidade característica do vento permite determinar a pressão dinâmica pela expressão:”

$$q = 0,613V_k^2$$

Logo, a pressão dinâmica (q), é:

$$q = 0,613.26,6^2 = 0,43 \text{ kN/m}^2$$

Até o momento, o cálculo da velocidade característica de vento (V_k) e pressão dinâmica (q) incidem igualmente em todas as 6 (seis) configurações de galpões propostas, pois as variáveis para elas são a localização e as características do terreno, que são comuns a todos os galpões.

A partir deste momento, para a determinação dos esforços de vento, deve-se levar em consideração as dimensões arquitetônicas do galpão, logo, ocorrerão divergências do valor das cargas para os diferentes vãos de (20, 25 e 30 metros). Por este motivo, com o emprego do VisualVentos®, será calculado os esforços de vento para cada um dos vãos de 20, 25 e 30 metros. A Figura 26 a seguir apresenta a interface do software para os dados de entrada da geometria do galpão, nesta etapa inclui-se como dados de entrada as dimensões da arquitetura do galpão e a distância entre pórticos conforme apresentado na Figura 13, e a inclinação do telhado do galpão conforme apresentado no Quadro 4.

Figura 26 - Interface do VisualVentos para geometria do galpão

VisualVentos

Menu: Ler Arquivo, Gravar Arquivo, Sair, Notações, Ajuda, Sobre o Programa

Geometria

Dimensões

Medidas: **b** 20 m, a 60 m, h 6 m, Distância entre pórticos p 6 m

b1 m, a1 m, **β 5,71°**, h1 m

Confirmar

Área das aberturas

Face	Fixa	Móvel
A1	0 m²	0 m²
A2	0 m²	0 m²
A3	0 m²	0 m²
B1	0 m²	0 m²
B2	0 m²	0 m²
B3	0 m²	0 m²
C1	0 m²	0 m²
C2	0 m²	0 m²
D1	0 m²	0 m²
D2	0 m²	0 m²

Continuar <>

Fonte: Elaborado pelo autor.

A dimensão “b” destacada de vermelho na Figura 29 é a dimensão do vão (ou largura) do galpão, cujo será variável entre 20, 25 e 30 metros. Por este motivo, serão levantados e determinados os esforços de vento para os galpões com dimensão de cada um dos três vãos propostos.

O ângulo de inclinação do telhado está destacado em verde e o dado de entrada para os galpões propostos é de **5,71°** (10%), confirme inclinação definida no item 4.4.

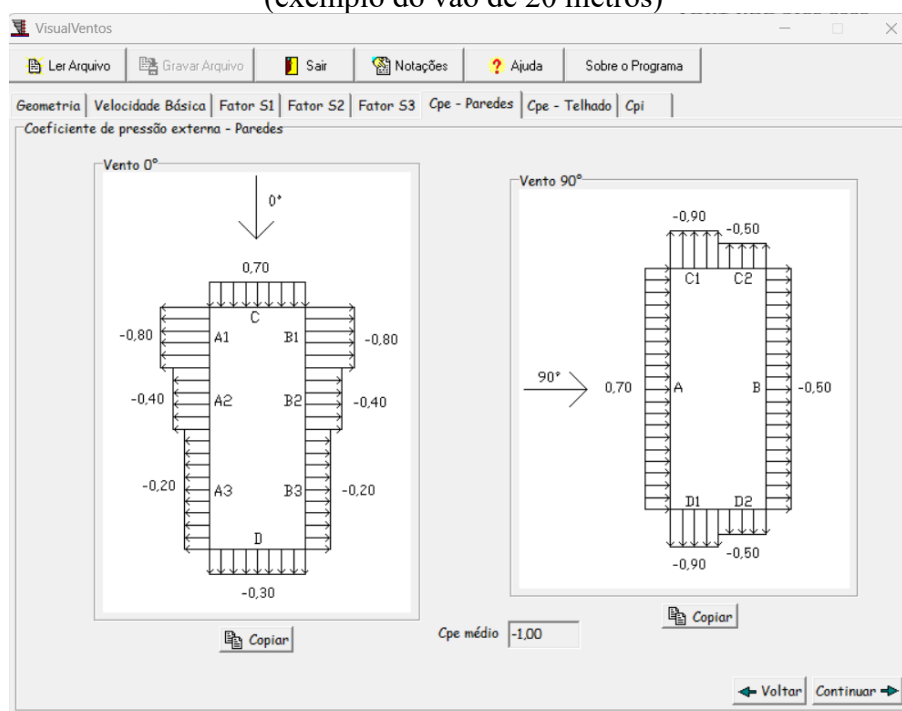
Outro fator de destaque na definição da arquitetura do galpão e entrada no VisualVentos® são as áreas de aberturas frontais e laterais dos galpões, cujo campos para os dados de entrada no software estão destacados em amarelo na Figura 29. Conforme definição no item 4.2: “Parâmetros gerais”, os galpões, por serem destinados ao armazenamento de materiais, foram considerados com portão metálico estanque para efeito de simplificação no dimensionamento das 6 (seis) configurações propostas, isto, é não haverá presença de aberturas para consideração do efeito da carga de vento.

Continuando o preenchimento de dados no VisualVentos®, assim como determina a ANBT NBR 6123, a próxima etapa a ser verificada são os **Coefficientes Aerodinâmicos** para Edificações correntes. Segundo o item 4.3 da ABNT NBR 6123:2023: “*Como a força do vento depende da diferença de pressão nas faces opostas da parte da edificação em estudo, os coeficientes de pressão são dados para superfícies externas e superfícies internas.*”

O item 6.1 da norma detalha a determinação dos **Coefficientes de Pressão Externa** (C_{pe}) para diferentes arquiteturas de edificações, desde edificações com arestas vivas ou levemente arredondadas como os galpões, até diferentes edificações como arcos e abóbadas.

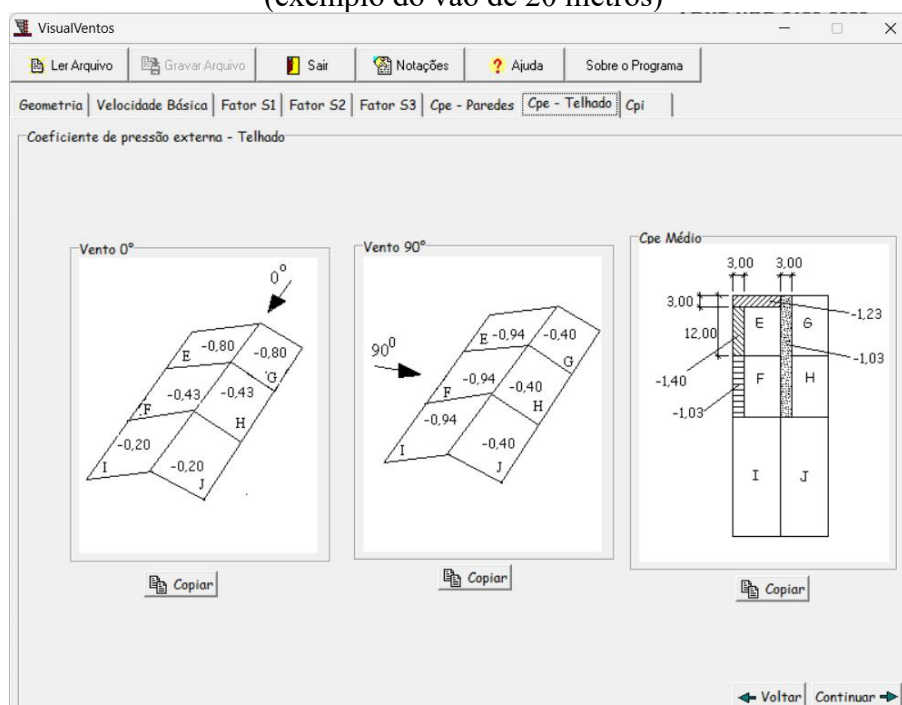
O VisualVentos® determina automaticamente os Coeficientes de Pressão Externa (C_{pe}), que os galpões estão sujeitos a partir dos dados de entrada da arquitetura do galpão, conforme ilustrado na Figura 26. Os Coeficientes de Pressão Externa incidem nas paredes externas e nas faces externas do telhado da edificação. As Figuras 27 e 28 apresentadas posteriormente mostram a interface do VisualVentos® com o retorno dos Coeficientes de Pressão Externa para o exemplo de vão de 20 metros.

Figura 27 - Coeficientes de Pressão Externa nas faces das paredes externas da edificação (exemplo do vão de 20 metros)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Coeficientes de Pressão Externa nas faces do telhado externo da edificação (exemplo do vão de 20 metros)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para consideração dos **Coeficientes de Pressão Interna (C_{pi})**, o item 6.3.1 da ABNT NBR 6123:2023 diz:

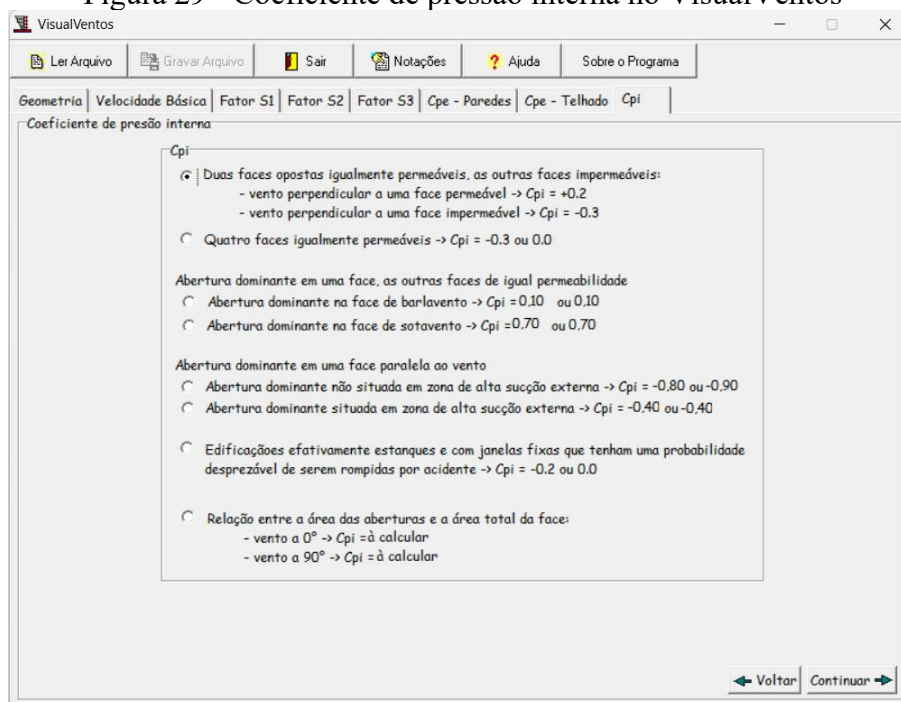
Se a edificação for totalmente impermeável ao ar, a pressão no interior desta será invariável no tempo e independente da corrente de ar externa. Porém, usualmente as paredes e/ou a cobertura de edificações consideradas como fechadas, em condições normais de serviço ou em consequência de acidentes, permitem a passagem de ar.

Por este motivo, mesmo pelo fato de os galpões serem considerados estanques e sem aberturas para simplificação do cálculo de vento conforme determinado no item 4.2 deste trabalho, o Coeficiente de Pressão Interna não pode ser desconsiderado.

Um $C_{pi} = 0$, ou seja, uma edificação totalmente estanque seria apenas alcançada em condições extremamente controladas e com probabilidades desprezíveis de acidentes como por exemplo, janelas fixas serem rompidas. (ABNT NBR 6123:2023, p. 44)

Diante do exposto, a Figura 29 a seguir mostra a interface do VisualVentos® para a determinação do Coeficiente de Pressão Interna, para as opções a serem consideradas, o software traz o texto do item 6.3.2: “Coeficientes de pressão interna – Método simplificado”.

Figura 29 - Coeficiente de pressão interna no VisualVentos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a entrada de dados, a opção que a norma traz, cujo há maior aproximação com os galpões estanques objetos de estudo deste trabalho, mas ainda assim considerando a opção *efetivamente estanque* como irreal é: “*Duas faces opostas igualmente permeáveis, as outras faces impermeáveis*”:

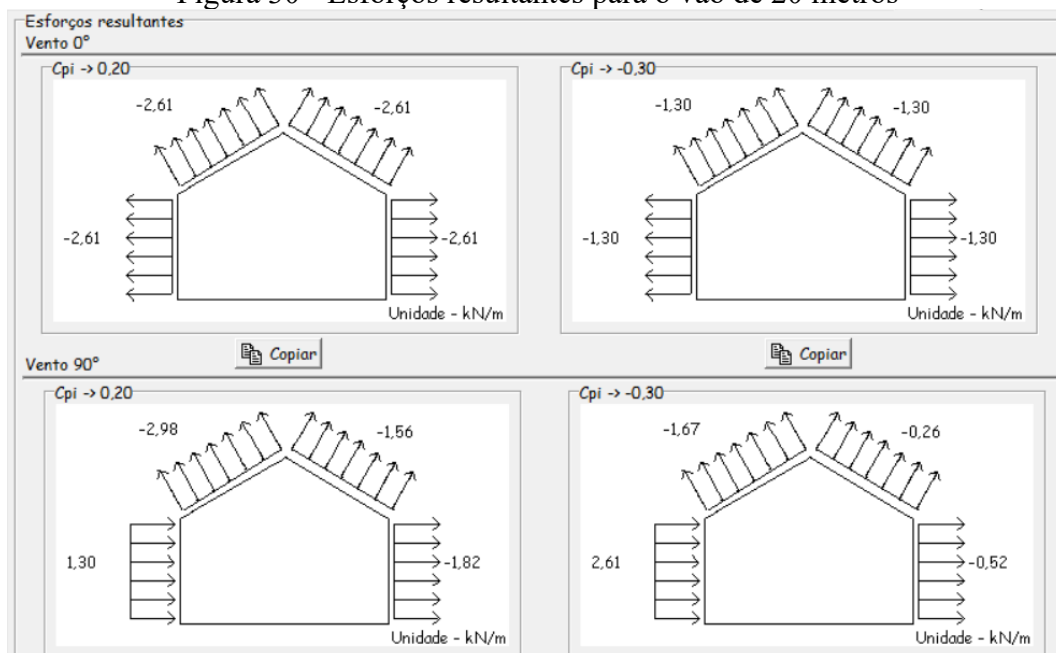
- *Vento perpendicular a uma face permeável* -> $C_{pi} = +0.2$
- *Vento perpendicular a uma face impermeável* -> $C_{pi} = -0.3$

Por fim, com todos os dados necessários para determinação dos esforços de vento a partir das diretrizes da ABNT NBR 6123: Pressão dinâmica do vento obtida a partir da Velocidade Característica do Vento, Coeficientes de Pressão externa, Coeficientes de Pressão interna e a área de influência da pressão do vento (distância entre pórticos), calcula-se os esforços finais para os ventos a 0° e 90° .

O cálculo para os esforços finais de vento indicado no item 4.1 da norma é obtido através da multiplicação da pressão dinâmica (q), pela diferença dos coeficientes aerodinâmicos ($C_{pe} - C_{pi}$), pela distância entre os pórticos (**6m**), afinal, a distância entre os pórticos é considerada a área de influência da pressão do vento nas paredes e telhados do galpão.

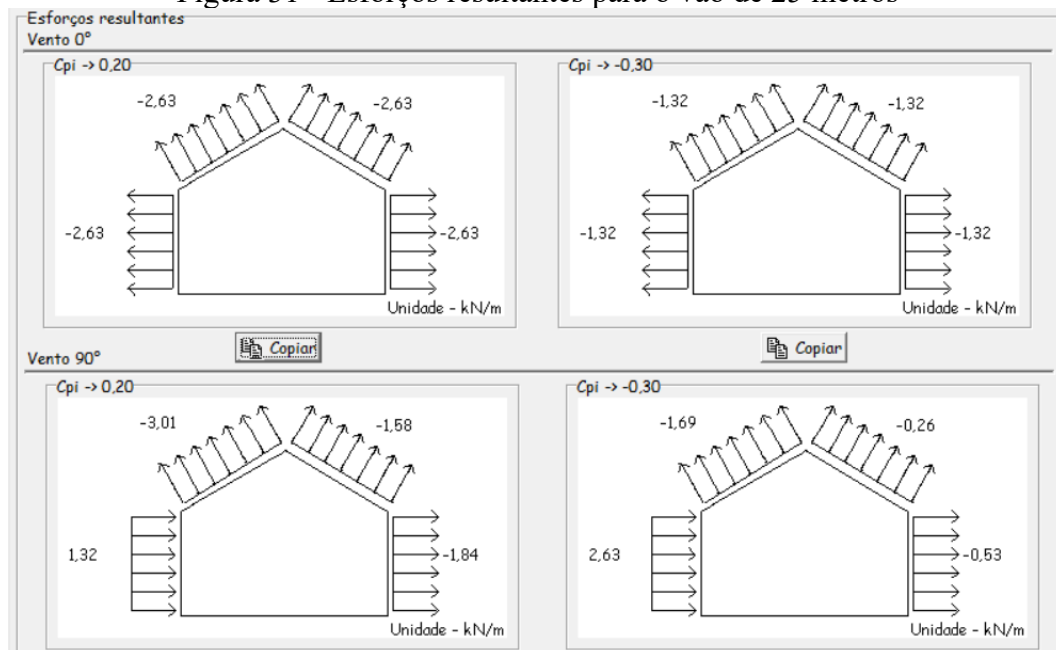
O VisualVentos® fornece os diagramas com os esforços de vento finais que incidem a 0° e a 90° , as Figuras 30, 31 e 32 a seguir mostram os diagramas finais das ações de vento respectivamente para os galpões de 20, 25 e 30 metros.

Figura 30 - Esforços resultantes para o vão de 20 metros



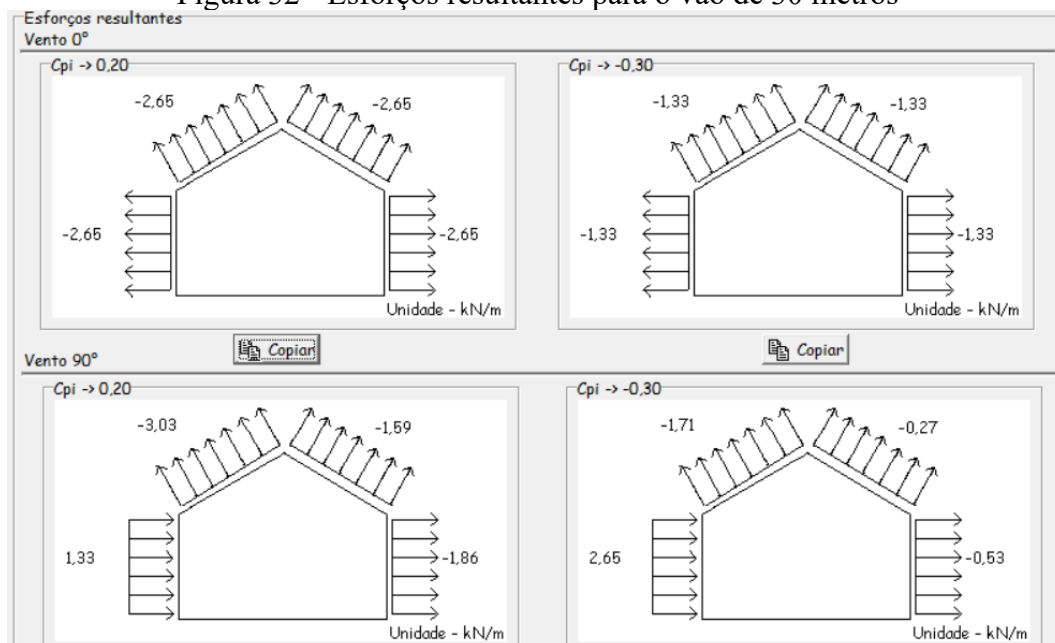
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 - Esforços resultantes para o vão de 25 metros



Fonte elaborado pelo autor.

Figura 32 - Esforços resultantes para o vão de 30 metros



Fonte: Elaborado pelo autor.

As combinações das ações do vento no qual verificam-se as situações mais críticas de pressão (esforços positivos) e sucção (esforços negativos) serão realizadas no decorrer deste capítulo no item 5.6 “Combinações das ações”.

5.2 Cargas acidentais verticais (Sobrecarga)

A ABNT NBR 8800:2024 no item B.5: “Sobrecarga em coberturas”, indica uma sobrecarga característica de $0,25 \text{ kN/m}^2$ a ser considerada na projeção da cobertura dos galpões, esta carga prevê o recebimento de instalações, isolamentos e pequenas peças que eventualmente podem ser instaladas na cobertura das edificações. A complementar, a ABNT NBR 6120:2019 que normatiza a determinação e cálculo das ações para estruturas de edificações, também considera uma sobrecarga de $0,25 \text{ kN/m}^2$ para coberturas comuns de galpões, com acesso restrito de pessoas apenas para manutenção.

Logo, será considerada a sobrecarga de $0,25 \text{ kN/m}^2$ para as combinações das ações cujo galpões estão sujeitos e para o dimensionamento dos elementos estruturais. Convertendo a sobrecarga em área (kN/m^2) disposta na norma para a carga linear (kN/m), cujo de fato é a carga no qual o pórtico está sujeito, basta multiplicar a sobrecarga pela distância entre os pórticos (6 metros), portanto:

$$\text{Sobrecarga} = 0,25 \text{ kN/m}^2 \times 6 \text{ metros} = 1,5 \text{ kN/m}.$$

5.3 Cargas permanentes

De acordo com Bellei (1998): “A carga permanente é uma carga vertical composta pelo peso próprio da estrutura e pelo peso dos materiais de acabamento. A ABNT NBR 8800:2024 indica que as cargas permanentes são aquelas que se mantêm com valores praticamente constantes durante toda a vida útil projetada da construção. Para os galpões objetos de estudo deste trabalho, serão consideradas como cargas permanentes o peso próprio dos pórticos da estrutura, isto é, as colunas e estrutura de cobertura (vigas de alma cheia e treliças), além de elementos estruturais secundários como as terças que servirão para garantir o contraventamento lateral e travamento dos pórticos e suporte para o recebimento das telhas. Também como ação permanente, devem ser considerados o peso próprio das telhas escolhidas no projeto para fechamento da cobertura dos galpões.

Pela finalidade principal dos galpões sendo industriais, serão previstas placas fotovoltaicas na implantação dos galpões, e o peso próprio das placas fotovoltaicas deve ser considerado como carga permanente no dimensionamento da estrutura.

Um fator importante a ser considerado para as cargas permanentes, é que as 6 (seis) configurações de galpões propostas apresentarão valores característicos diferentes para as cargas permanentes, porque a principal influência para a determinação das cargas permanentes é o peso próprio da estrutura. Como as 6 (seis) combinações propostas possuem vãos distintos (20 x 25 x 30 metros) e estruturas de cobertura distintas (Viga de alma cheia e treliça), as cargas permanentes características terão valores diferentes para cada combinação, ao contrário da carga do vento abordada no item 5.1, que possui 3 (três) valores diferentes, um por vão. Isto ocorre porque ao contrário da carga permanente, que o peso próprio da estrutura de cobertura influencia, na carga do vento, apenas as diferenças de dimensões do vão influenciam na determinação do carregamento.

Diante do exposto, no Quadro 5 a seguir, está apresentado um resumo dos carregamentos permanentes atuantes na estrutura dos galpões e a forma como eles serão determinados para a posterior etapa de combinação das ações e análise da estrutura.

Quadro 5 - Ações permanentes na estrutura dos galpões

Carga	Determinação
Peso próprio dos elementos do pórtico - colunas	Peso dos perfis escolhidos a partir de método de pré-dimensionamento
Peso próprio dos elementos do pórtico – viga de alma cheia (configuração de galpão com cobertura de viga de alma cheia)	Peso dos perfis escolhidos a partir de método de pré-dimensionamento
Peso próprio dos elementos do pórtico – treliça de cobertura (configuração de galpão com cobertura de treliça)	Peso dos perfis escolhidos a partir de método de pré-dimensionamento dos perfis empregados na construção da treliça
Peso próprio das Terças	Referência de manual técnico
Peso próprio das Telhas	Catálogo do fabricante
Peso próprio das Placas fotovoltaicas	Referência normativa de peso das placas

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.1 Peso próprio dos elementos do pórtico

A definição do peso próprio da estrutura só é atingida quando há o dimensionamento completo, e por consequentemente elaboração de memorial descritivo e geração de lista de materiais. Entretanto, para o dimensionamento em si que antecede o projeto final, é necessário determinar e verificar nos estados limites da ABNT NBR 8800 os perfis metálicos que serão partes componentes da estrutura dos pórticos dos galpões. Para a definição dos perfis que serão utilizados, um dos procedimentos é realizar um pré-dimensionamento a partir de estimativas de alguma bibliografia ou método empírico, ou com o emprego de algum software de análise estrutural, e por fim, analisar o comportamento do perfil a partir da solicitação dos carregamentos determinados.

São várias as bibliografias de diferentes autores e manuais de diferentes fabricantes/entidades normativas para a realização de um pré-dimensionamento da estrutura, e o principal parâmetro para o pré-dimensionamento é arbitrar os valores de peso da estrutura por metro quadrado. Para arbitrar estes valores de peso por metro quadrado, as circunstâncias mais comuns são pré-determinar perfis normatizados (como os da GERDAU dispostos no item 4.5) e conferir no catálogo do fabricante o peso por metro quadrado do perfil. A exemplificar, Bellei (1998) cita em sua obra “Edifícios estruturais em aço: Projeto e cálculo” recomendações de pré-

dimensionamento para estruturas de galpões sem pontes rolantes. Os parâmetros estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998)

Parâmetros de Pré-Dimensionamento (Bellei, 1998)		
Elemento estrutural	Dimensão	Grandeza
Terças	$L < h < L$ 60 40	Onde L e o vão da terça e h a altura do perfil.
Treliças	$L < HT < L$ 15 8	Onde L e o comprimento do vão e HT a altura da treliça.
Colunas	$H < h < H$ 60 40	Onde H e a altura da coluna e h a altura para o perfil.
Vigas	$L < h < L$ 30 20	Onde L e o comprimento do vão e h a altura do perfil.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma outra abordagem empírica para o pré-dimensionamento é o disposto por D'alambert (2012) no manual da GERDAU AçoMinas intitulado “Galpões em Pórticos com Perfis Estruturais Laminados”. O autor apresenta na Figura 33 os seguintes valores característicos de peso próprio:

Figura 33 - Parâmetros de pré-dimensionamento proposto por D'alambert (2012)

Pórtico	Peso Estimado
Terças e tirantes	0,05 KN/m ² (5 kgf/m ²)
Contraventamentos	0,05 KN/m ² (5 kgf/m ²)
Telhas	0,06 a 0,12 KN/m ² (6 a 12kgf/m ²)

Fonte: D'alambert (2012).

Por fim, uma outra referência a ser consultada para o peso próprio é o disposto pelo Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), que indica no Quadro 6 a seguir os seguintes valores característicos de peso próprio dos elementos estruturais para efeito de pré-dimensionamento da estrutura:

Quadro 6 - Valores característicos para pré-dimensionamento (CBCA, 2018)

Elemento	Determinação
Telhas	0,10 kN/m ²
Contraventamentos	0,05 kN/m ²
Terças	0,10 kN/m ²
Vigas e colunas	0,20 kN/m ²

Fonte: Adaptado de CBCA (2018).

Para a definição do peso próprio dos elementos do pórtico, serão considerados os parâmetros de pré-dimensionamento dispostos por Bellei (1998) na Tabela 5. Com a finalidade de ganho de eficiência no dimensionamento estrutural dos seis galpões propostos, e também pelo fato de a ABNT NBR 8800 exigir a análise de 2º ordem de deslocamento da estrutura, o pré-dimensionamento será feito diretamente no software de análise estrutural Cype 3D®, o software permitirá incluir perfis pré-determinados a partir dos parâmetros da Tabela 5, e juntamente com as demais cargas determinadas neste capítulo, a ferramenta já irá realizar a análise estrutural para a verificação dos perfis pré-determinados.

O detalhamento da análise estrutural no software Cype 3D® será abordada no Capítulo 6 deste trabalho.

5.3.2 Peso próprio das terças

Para a determinação do peso próprio das terças, em prol da segurança (maior valor característico de referência) será utilizada a referência do Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) disposta no Quadro 6, logo:

$$\text{Peso próprio das terças} = 0,10 \text{ kN/m}^2 \times 6 \text{ metros} = \mathbf{0,6 \text{ kN/m.}}$$

5.3.3 Peso próprio das telhas

Apesar de haver a necessidade de pré-dimensionamento para os elementos estruturais principais dos pórticos, a partir das definições dos parâmetros de projeto dispostos no item 4, há valores característicos exatos para o peso das telhas e peso das placas fotovoltaicas que serão componentes dos galpões. Para o peso das telhas, será considerado o peso disposto na Tabela

3, obtido diretamente no catálogo do fabricante a partir da telha TP-40 escolhida, isto é 4,81 kg/m², (arredondamento para 5,0 kg/m², ou **0,05 kN/m²**):

$$\text{Peso próprio das telhas} = 0,05 \text{ kN/m}^2 \times 6 \text{ metros} = \mathbf{0,3 \text{ kN/m.}}$$

5.3.4 Peso próprio das placas fotovoltaicas

Para o peso próprio das placas fotovoltaicas, será considerado o valor característico referencial disposto na ABNT NBR 6120:2019: 15 kg/m², ou **0,15 kN/m²**):

$$\text{Peso próprio das placas fotovoltaicas} = 0,15 \text{ kN/m}^2 \times 6 \text{ metros} = \mathbf{0,9 \text{ kN/m.}}$$

Diante do exposto, o Quadro 7 a seguir apresenta as cargas permanentes que serão utilizadas para as combinações dos esforços e análise estrutural:

Quadro 7 - Carregamentos permanentes atuantes

Carga	Determinação
Peso próprio dos elementos do pórtico - colunas	Será determinado diretamente no software Cype 3D® na etapa de análise estrutural
Peso próprio dos elementos do pórtico – viga de alma cheia (configuração de galpão com cobertura de viga de alma cheia)	Será determinado diretamente no software Cype 3D® na etapa de análise estrutural
Peso próprio dos elementos do pórtico – treliça de cobertura (configuração de galpão com cobertura de treliça)	Será determinado diretamente no software Cype 3D® na etapa de análise estrutural
Peso próprio das Terças	0,6 kN/m
Peso próprio das Telhas	0,3 kN/m
Peso próprio das Placas fotovoltaicas	0,9 kN/m

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 Cargas devido a pontes rolantes

A ABNT NBR 8800:2024 trata a definição das cargas devido as pontes rolantes especificamente no item B.4.4, entretanto, não serão consideradas devido à ausência de ponte rolante nos galpões propostos. A complementar, Bellei (1998) sugere que: “As estruturas que suportam pontes rolantes, além do efeito das cargas verticais, deverão ser verificadas para os efeitos de forças horizontais atuantes ao nível do topo do trilho.” Diante do exposto, devido à ausência de pontes rolantes, serão consideradas apenas as cargas verticais oriundas do carregamento permanente e da sobrecarga, as únicas cargas horizontais atuantes na estrutura serão as cargas de vento.

5.5 Cargas devido à temperatura

Em estruturas metálicas convencionais, protegidas ou não, supõe-se, para o cálculo, que as variações de temperatura sejam uniformes ao longo da estrutura, salvo em casos de construções sujeitas a diferenças simultâneas de temperatura em pontos diversos. (BELLEI, 1998, p. 108).

A acrescentar, Bellei (1998) em sua obra ainda recomenda: “Em estruturas convencionais protegidas ou não de raios solares, para uso em temperatura ambiente, este efeito é desprezado”. Portanto, não serão consideradas atuantes na estrutura dos galpões propostos as cargas provenientes da temperatura.

5.6 Combinações de ações

De acordo com a ABNT NBR 8800:2024: “O objetivo da análise estrutural é determinar os efeitos das ações na estrutura, visando efetuar as verificações de estados limites último e de serviço”. (ABNT NBR 8800:2024, item 4.9.1 p. 24).

A combinação das ações deve ser feita de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura. A verificação dos estados limites últimos e estados limites de serviço deve ser realizada em função de combinações últimas e combinações de serviço respectivamente. (ABNT NBR 8800:2024, item 4.7.7 p. 19).

A ANBT NBR 8800:2024 classifica as ações de carregamento em estruturas nas seguintes categorias:

1 – Ações permanentes: são as decorrentes das características da estrutura, ou seja, o peso próprio da estrutura e dos elementos que a compõem, como telhas, forro, instalações etc.

2 – Ações variáveis: são as decorrentes do uso e da ocupação, tais como equipamentos, sobrecargas em coberturas, vento, temperatura etc.

3 – Ações excepcionais: são as decorrentes de incêndios, explosões, choques de veículos, efeitos sísmicos etc.

Para as ações dos carregamentos a que os galpões objetos de estudo deste trabalho estão sujeitas, além do peso próprio da estrutura e elementos secundários, será considerado carregamento permanente o peso próprio das placas fotovoltaicas, visto que, pela finalidade industrial, será previsto placas fotovoltaicas para geração de energia solar em toda a vida útil dos galpões. As ações do vento, e a sobrecarga prevista na ABNT NBR 8800 e apresentada no item 5.2, são consideradas ações variáveis.

As combinações de ações possuem como finalidade “simular” os efeitos mais desfavoráveis possíveis de ocorrer na estrutura, a partir da combinação dos carregamentos atuantes permanentes, com a ocorrência dos carregamentos variáveis de forma simultânea. Cada combinação a ser analisada na estrutura, deve seguir a expressão apresentada abaixo, que leva em consideração os carregamentos permanentes e variáveis, e coeficientes de ponderação e combinação que serão apresentados a seguir.

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

Onde:

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

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

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

Abaixo estão apresentados os coeficientes de ponderação e combinação que devem ser utilizados em cada combinação de ações:

γ_g coeficiente de ponderação das ações permanentes;

γ_q coeficiente de ponderação das ações variáveis;

ψ fator de combinação das ações variáveis.

Os valores dos coeficientes de ponderação e combinação são fornecidos pelas Tabelas 1 e 2 da ABNT NBR 8800:2024 e variam de acordo com o tipo de combinação, o tipo de ação e a tipologia do edifício (comercial, residencial, passarela etc.). O software Cype 3D® que será utilizado para o dimensionamento e verificação dos elementos estruturais, já simula as combinações mais desfavoráveis a estrutura de forma automática, a partir da entrada dos valores característicos e classificação dos carregamentos atuantes.

Diante do exposto, serão utilizados como dados de entrada no software para verificação dos esforços na estrutura os carregamentos dispostos no Quadro 7.

A acrescentar, o software Cype 3D® simula de forma automática as combinações mais desfavoráveis a partir da ABNT NBR 8800:2024 com a entrada de dados no software, também, D'alambert (2012) exemplifica no manual da GERDAU AçoMinas intitulado “Galpões em Pórticos com Perfis Estruturais Laminados” as seguintes combinações como sendo as que mais afetam a estrutura:

1 - 1,3 x Ações Permanentes

2 - 1,3 x Ações Permanentes + 1,5 x Sobrecargas

3 - 1,0 x Ações Permanentes + 1,4 x Vento (4 hipóteses)

4 - 1,3 x Ações Permanentes + 1,5 x Sobrecargas + 0,6 x 1,4 x Vento (4 hipóteses)

5 - 1,3 x Ações Permanentes + 1,4 x Vento (4 hipóteses) + 0,5 x 1,5 x Sobrecargas

De acordo com o autor, essas combinações representam o esforço máximo (Para analisar o Estado Limite Último, ou seja, se a estrutura cede), e simulam a ação máxima de

vento (Para analisar o Estado Limite de Serviço, ou seja, se a estrutura não se desloca ou deforma excessivamente).

6 ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Para a análise e dimensionamento dos elementos estruturais em aço e mistos de aço e concreto, a ABNT NBR 8800:2024 indica deslocamentos máximos que a estrutura pode tolerar em função das dimensões principais de elementos horizontais como vigas e terças, e de elementos verticais como os pilares. Os deslocamentos máximos para esses elementos estruturais estão apresentados no Anexo C da ABNT NBR 8800:2024, e no Quadro 8 a seguir estão destacados os limites de deslocamento para os elementos estruturais principais de um galpão metálico.

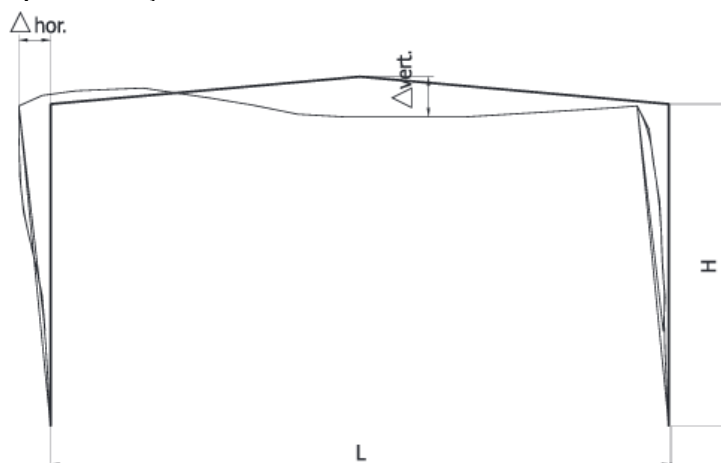
Quadro 8 - Deslocamentos máximos dos elementos estruturais em função das dimensões

Elemento	Δ máximo
Terças	$L / 180$
Vigas de cobertura	$L / 250$
Pilares	$H / 300$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8800 (2024).

Em que L são as dimensões horizontais (vãos das terças e vigas) e H é a dimensão vertical (altura dos pilares/columnas). Na Figura 34 a seguir está apresentada uma esquematização dos deslocamentos (Δ) extraída do manual “Galpões em Pórticos com Perfis Estruturais Laminados”, para análise da ordem de grandeza dos deslocamentos máximos permitidos pela ABNT NBR 8800. Em detalhe, $\Delta_{hor.}$ (Deslocamento horizontal máximo) e $\Delta_{vert.}$ (Deslocamento vertical máximo).

Figura 34 - Esquematisação dos deslocamentos máximos das estruturas dos galpões



Fonte: Gerdau (2012).

Entretanto, esta é uma análise simplificada para verificação do deslocamento máximo da estrutura a partir de parâmetros empíricos, de acordo com a ABNT NBR 8800:2024, estes parâmetros são valores práticos para verificação do atendimento ao Estado-Limite de serviço da estrutura.

Fato é, a ABNT NBR 8800:2024 requer uma análise dos efeitos de segunda ordem (*P-Δ*) que leva em consideração uma deformação plástica na estrutura, o que origina novos esforços de flexo-compressão devido a não linearidade geométrica dos perfis e elementos estruturais sujeitos a carregamentos horizontais como o vento. Por este motivo, faz-se pertinente o emprego de softwares e ferramentas capazes de fazer a análise do comportamento da estrutura levando em consideração efeitos de segunda ordem, isto é, novas ações a partir da deformação plástica dos elementos estruturais.

Diante do exposto, para cumprir o propósito de dimensionamento e análise estrutural das 6 (seis) configurações de galpões propostas, a partir de pleno atendimento as diretrizes da ABNT NBR 8800:2024 e ABNT NBR 14762:2010, será utilizado o software Cype 3D® para a obtenção dos resultados.

6.1 Análise estrutural no Cype3D

A partir dos parâmetros de projeto dos galpões dispostos no Capítulo 4 e as ações atuantes dispostas no Capítulo 5, foram realizadas a definição da geometria e análise estrutural no Cype 3D® de cada uma das seis configurações de galpões propostas neste trabalho. Cada uma das configurações possui diferentes comportamentos estruturais, que demandam o

emprego de diferentes elementos estruturais para que o dimensionamento da estrutura ocorra de maneira que atenda ao disposto na ABNT NBR 8800:2024 e que os Estados Limites Últimos e de Serviço sejam atendidos.

A entrada inicial no software é a realização da calibração para que as verificações estruturais se baseiem nas Normas brasileiras, mais especificamente a ABNT NBR 8800:2024 (perfis laminados) e ABNT NBR 14762:2010 (perfis conformados a frio). Nesta calibração inicial, também são definidos parâmetros básicos como unidades (No Sistema Internacional de Unidades), tais como (Metros, Quilonewton, Quilonewton x Metro, Megapascal) e seleciona-se a opção de verificação de “Efeitos de 2º Ordem ($P-\Delta$)” como dispõe a Norma brasileira. Na Figura 35 a seguir está a interface do Cype 3D® para a calibração das normas a serem baseadas no software.

Figura 35 - Interface de definição normativa no Cype 3D

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dando prosseguimento na calibração inicial, a próxima etapa é definir os materiais a serem empregados nas barras que servirão como elementos da estrutura dos pórticos, conforme apresentado na Tabela 4, os materiais são o aço ASTM A572 Gr. 50 (345 MPa) para os perfis laminados e o aço ASTM A36 (250 MPa) para os perfis dobrados, isto é, terças e treliças.

Na Figura 36 a seguir está a interface do Cype 3D® para a definição dos aços estruturais a serem analisados.

Figura 36 - Definição dos aços estruturais no Cype 3D

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a calibração inicial, no Quadro 9 estão dispostas as etapas que serão seguidas no software para que se obtenha a análise e dimensionamento da estrutura de cada uma das 6 (seis) configurações de galpões, para a finalidade de realizar a análise comparativa no Capítulo 7.

Quadro 9 - Etapas para análise estrutural dos pórticos no Cype 3D

Configuração de galpão	Etapa	Descrição
Vão: 20 metros Cobertura: Viga de alma cheia	Definição da geometria do pórtico	No editor de pórticos do Cype 3D®, foi definida a geometria do pórtico desta configuração, isto é, distância entre eixos de colunas de 20 metros, e cobertura em barra (viga) com inclinação de 10% (5,71°)
	Definição dos materiais (tipo de aço)	Entrada de dados do aço ASTM A572 Gr. 50 para as colunas e vigas, ASTM A36 para as terças conforme disposto no Item 4.5
	Definição dos perfis estruturais	Atribuição de perfil inicial para as barras que representam as colunas e vigas, Perfil laminado W (I) GERDAU para colunas e vigas, Perfil U enrijecidos para terças, com dimensões a partir do pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998) na Tabela 5
	Definição dos carregamentos	Nesta etapa serão inseridas as cargas atuantes dispostas no Quadro 7
	Definição dos deslocamentos máximos	Limitantes de deslocamento máximo horizontal e vertical (Δ_{hor} e $\Delta_{vert.}$) conforme ABNT NBR 8800:2024, disposto no Quadro 8 e na Figura 35
	Processamento dos elementos do pórtico	Nesta etapa o pórtico é processado para verificação do ELU e ELS
	Verificação dos perfis	Após o processamento dos pórticos, os perfis iniciais inseridos a partir do Pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998) são verificados quanto ao atendimento ou não ao ELU e ELS
	Dimensionamento otimizado	Após verificação da estrutura, o Cype 3D®, a partir do Dimensionamento Otimizado, aponta os perfis mais leves que “passam” na análise estrutural do pórtico verificada
	Conclusão do dimensionamento	Após o dimensionamento, o Cype 3D® irá gerar a lista de perfis, peso total da estrutura (kg), taxa de aço (kg / m ²) e desenhos estruturais
Vão: 20 metros Cobertura: Treliçada	Definição da geometria do pórtico	No editor de pórticos do Cype 3D®, foi definida a geometria do pórtico desta configuração, isto é, distância entre eixos de colunas de 20 metros, e geometria da treliça desta configuração para

		atendimento ao espaçamento das terças, inclinação de 10% (5,71°) e distância de 20 metros
	Definição dos materiais (tipo de aço)	Entrada de dados do aço ASTM A572 Gr. 50 para as colunas, ASTM A36 para as barras das tesouras da treliça e terças conforme disposto no Item 4.5
	Definição dos perfis estruturais	Atribuição de perfil inicial para as barras que representam as colunas, Perfil laminado W (I) GERDAU, Perfil U enrijecidos para terças, e cantoneira para as barras das tesouras da treliça com dimensões a partir do pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998) na Tabela 5
	Definição dos carregamentos	Nesta etapa serão inseridas as cargas atuantes dispostas no Quadro 7
	Definição dos deslocamentos máximos	Limitantes de deslocamento máximo horizontal e vertical (Δ_{hor} e $\Delta_{vert.}$) conforme ABNT NBR 8800:2024, disposto no Quadro 8 e na Figura 35
	Processamento dos elementos do pórtico	Nesta etapa o pórtico é processado para verificação do ELU e ELS
	Verificação dos perfis	Após o processamento dos pórticos, os perfis iniciais inseridos a partir do Pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998) são verificados quanto ao atendimento ou não ao ELU e ELS
	Dimensionamento otimizado	Após verificação da estrutura, o Cype 3D®, a partir do Dimensionamento Otimizado, aponta os perfis mais leves que “passam” na análise estrutural do pórtico verificada
	Conclusão do dimensionamento	Após o dimensionamento, o Cype 3D® irá gerar a lista de perfis, peso total da estrutura (kg), taxa de aço (kg / m ²) e desenhos estruturais
Vão: 25 metros Cobertura: Viga de alma cheia	Definição da geometria do pórtico	No editor de pórticos do Cype 3D®, será definida a geometria do pórtico desta configuração, isto é, distância entre eixos de colunas de 20 metros, e cobertura em barra (viga) com inclinação de 10% (5,71°)
	Definição dos materiais (tipo de aço)	Entrada de dados do aço ASTM A572 Gr. 50 para as colunas e vigas, ASTM A36 para as terças conforme disposto no Item 4.5
	Definição dos perfis estruturais	Atribuição de perfil inicial para as barras que representam as colunas e vigas, Perfil laminado W (I) GERDAU para colunas e vigas, Perfil U enrijecidos

		para terças, com dimensões a partir do pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998) na Tabela 5
	Definição dos carregamentos	Nesta etapa serão inseridas as cargas atuantes dispostas no Quadro 7
	Definição dos deslocamentos máximos	Limitantes de deslocamento máximo horizontal e vertical (Δ_{hor} e $\Delta_{vert.}$) conforme ABNT NBR 8800:2024, disposto no Quadro 8 e na Figura 35
	Processamento dos elementos do pórtico	Nesta etapa o pórtico é processado para verificação do ELU e ELS
	Verificação dos perfis	Após o processamento dos pórticos, os perfis iniciais inseridos a partir do Pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998) são verificados quanto ao atendimento ou não ao ELU e ELS
	Dimensionamento otimizado	Após verificação da estrutura, o Cype 3D®, a partir do Dimensionamento Otimizado, aponta os perfis mais leves que “passam” na análise estrutural do pórtico verificada
	Conclusão do dimensionamento	Após o dimensionamento, o Cype 3D® irá gerar a lista de perfis, peso total da estrutura (kg), taxa de aço (kg / m ²) e desenhos estruturais
Vão: 25 metros Cobertura: Treliçada	Definição da geometria do pórtico	No editor de pórticos do Cype 3D®, será definida a geometria do pórtico desta configuração, isto é, distância entre eixos de colunas de 25 metros, e geometria da treliça desta configuração para atendimento o espaçamento das terças e a inclinação de 10% (5,71°) e distância de 25 metros
	Definição dos materiais (tipo de aço)	Entrada de dados do aço ASTM A572 Gr. 50 para as colunas, ASTM A36 para as barras das tesouras da treliça e terças conforme disposto no Item 4.5
	Definição dos perfis estruturais	Atribuição de perfil inicial para as barras que representam as colunas, Perfil laminado W (I) GERDAU, Perfil U enrijecidos para terças, e cantoneira para as barras das tesouras da treliça com dimensões a partir do pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998) na Tabela 5
	Definição dos carregamentos	Nesta etapa serão inseridas as cargas atuantes dispostas no Quadro 7

	Definição dos deslocamentos máximos	Limitantes de deslocamento máximo horizontal e vertical (Δ_{hor} e $\Delta_{vert.}$) conforme ABNT NBR 8800:2024, disposto no Quadro 8 e na Figura 35
	Processamento dos elementos do pórtico	Nesta etapa o pórtico é processado para verificação do ELU e ELS
	Verificação dos perfis	Após o processamento dos pórticos, os perfis iniciais inseridos a partir do Pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998) são verificados quanto ao atendimento ou não ao ELU e ELS
	Dimensionamento otimizado	Após verificação da estrutura, o Cype 3D®, a partir do Dimensionamento Otimizado, aponta os perfis mais leves que “passam” na análise estrutural do pórtico verificada
	Conclusão do dimensionamento	Após o dimensionamento, o Cype 3D® irá gerar a lista de perfis, peso total da estrutura (kg), taxa de aço (kg / m ²) e desenhos estruturais
Vão: 30 metros Cobertura: Viga de alma cheia	Definição da geometria do pórtico	No editor de pórticos do Cype 3D®, será definida a geometria do pórtico desta configuração, isto é, distância entre eixos de colunas de 30 metros, e cobertura em barra (viga) com inclinação de 10% (5,71°)
	Definição dos materiais (tipo de aço)	Entrada de dados do aço ASTM A572 Gr. 50 para as colunas e vigas, ASTM A36 para as terças conforme disposto no Item 4.5
	Definição dos perfis estruturais	Atribuição de perfil inicial para as barras que representam as colunas e vigas, Perfil laminado W (I) GERDAU para colunas e vigas, Perfil U enrijecidos para terças, com dimensões a partir do pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998) na Tabela 5
	Definição dos carregamentos	Nesta etapa serão inseridas as cargas atuantes dispostas no Quadro 7
	Definição dos deslocamentos máximos	Limitantes de deslocamento máximo horizontal e vertical (Δ_{hor} e $\Delta_{vert.}$) conforme ABNT NBR 8800:2024, disposto no Quadro 8 e na Figura 35
	Processamento dos elementos do pórtico	Nesta etapa o pórtico é processado para verificação do ELU e ELS
	Verificação dos perfis	Após o processamento dos pórticos, os perfis iniciais inseridos a partir do Pré-dimensionamento proposto

		por Bellei (1998) são verificados quanto ao atendimento ou não ao ELU e ELS
	Dimensionamento otimizado	Após verificação da estrutura, o Cype 3D®, a partir do Dimensionamento Otimizado, aponta os perfis mais leves que “passam” na análise estrutural do pórtico verificada
	Conclusão do dimensionamento	Após o dimensionamento, o Cype 3D® irá gerar a lista de perfis, peso total da estrutura (kg), taxa de aço (kg / m ²) e desenhos estruturais
Vão: 30 metros Cobertura: Treliçada	Definição da geometria do pórtico	No editor de pórticos do Cype 3D®, será definida a geometria do pórtico desta configuração, isto é, distância entre eixos de colunas de 30 metros, e geometria da treliça desta configuração para atendimento ao espaçamento das terças e inclinação de 10% (5,71°) e distância de 20 metros
	Definição dos materiais (tipo de aço)	Entrada de dados do aço ASTM A572 Gr. 50 para as colunas, ASTM A36 para as barras das tesouras da treliça e terças conforme disposto no Item 4.5
	Definição dos perfis estruturais	Atribuição de perfil inicial para as barras que representam as colunas, Perfil laminado W (I) GERDAU, Perfil U enrijecidos para terças, e cantoneira para as barras das tesouras da treliça com dimensões a partir do pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998) na Tabela 5
	Definição dos carregamentos	Nesta etapa serão inseridas as cargas atuantes dispostas no Quadro 7
	Definição dos deslocamentos máximos	Limitantes de deslocamento máximo horizontal e vertical (Δ_{hor} e $\Delta_{vert.}$) conforme ABNT NBR 8800:2024, disposto no Quadro 8 e na Figura 35
	Processamento dos elementos do pórtico	Nesta etapa o pórtico é processado para verificação do ELU e ELS
	Verificação dos perfis	Após o processamento dos pórticos, os perfis iniciais inseridos a partir do Pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998) são verificados quanto ao atendimento ou não ao ELU e ELS
	Dimensionamento otimizado	Após verificação da estrutura, o Cype 3D®, a partir do Dimensionamento Otimizado, aponta os perfis mais leves que “passam” na análise estrutural do pórtico verificada

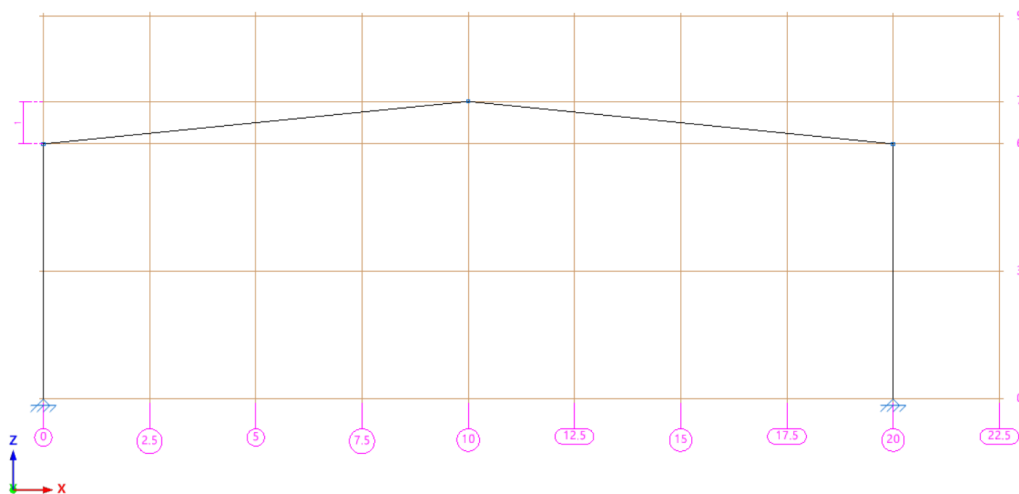
	Conclusão do dimensionamento	Após o dimensionamento, o Cype 3D® irá gerar a lista de perfis, peso total da estrutura (kg), taxa de aço (kg / m ²) e desenhos estruturais
--	------------------------------	---

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1.1 Vão de 20 metros e cobertura de viga de alma cheia

Inicia-se a análise estrutural e dimensionamento definindo a geometria do pórtico, para esta configuração, são desenhadas as barras verticais que representam as colunas, com o espaçamento de acordo com a dimensão do vão (20 metros) e as barras horizontais que representam as vigas de cobertura com a inclinação de 10%. Na Figura 37 está a geometria no Cype 3D do pórtico desta configuração.

Figura 37 - Geometria do galpão com vão de 20 metros e cobertura de viga de alma cheia



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, define-se os aços estruturais conforme Tabela 4 e apresentado na Figura 38.

Figura 38 - Definição dos aços estruturais dos elementos dos galpões

Obra vazia

Normas: ABNT NBR 6118:2023, ABNT NBR 14762: 2010, ABNT NBR 8800:2024, NBR 7190 e Eurocódigo 9

Perfis

Aço laminado: A-572 345MPa

Aço dobrado: A-36

Concreto armado

Concreto para pilares: C20, em geral

Concreto para vigas de laje: C20, em geral

Concreto para elementos de fundação: C20, em geral

Aço de barras: CA-50 e CA-60

Características do agregado: Granito (15 mm), 30 mm

Recobrimentos

Desperdícios de aço

Ações

☐ Com sismo dinâmico

Resistência ao fogo

Estados limites (combinações)

Hipóteses adicionais

Fundação

Processo construtivo

Opções

Pilares

Fundação

Vigas

Ligações

Ambiente

Vigas: CAA II

Blocos: CAA II

Terreno de fundação

☐ Verificar deslizamento de sapatas

Tensões admissíveis do terreno

Combinações fundamentais: 0.200 MPa

Combinações sísmicas e acidentais: 0.300 MPa

Estacas (Concreto armado)

Excentricidade para o momento mínimo: 0.10 m

☒ Considerar esforços com um esforço axial reduzido

Estacas que trabalham por fuste: 0.00 - Axial

Estacas que trabalham só por ponta: 0.80 - Axial

Coefficiente de flambagem: 1.00

☐ Análise da estabilidade lateral da estaca

Configuração avançada

Cancelar < Anterior Seguinte > Terminar

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a definição dos aços estruturais conforme a Tabela 4, deve-se atribuir os perfis para as barras do pórtico, isto é, para esta configuração de galpão, serão os perfis laminados W da GERDAU para as colunas e vigas de alma cheia conforme apresentado no Item 4.5.

Para atribuição dos perfis do catálogo da GERDAU, deve-se baixar o catálogo do fabricante diretamente no Cype3D, o software traz de forma nativa este catálogo da GERDAU a partir da definição da ABNT NBR 8800:2024 como a Norma base a ser verificada pelo software.

A Figura 39 a seguir mostra a interface do Cype3D para baixar e importar o catálogo de perfis de diferentes fabricantes com os perfis estruturais normatizados pela ABNT NBR 8800:2024. Em destaque, está apresentado o da fabricante GERDAU utilizado conforme disposto no Item 4.5.

Figura 39 - Catálogo da GERDAU no Cype3D



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após baixar o catálogo do fabricante, para iniciar a análise estrutural desta configuração de pórtico com 20 metros de vão e cobertura de viga de alma cheia deve-se atribuir um perfil inicial para cada barra representando as colunas e vigas do pórtico. Para atribuição do perfil inicial, foi selecionado um perfil do catálogo da GERDAU que possua dimensões

características dentro do intervalo de pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998) e apresentado anteriormente na Tabela 5.

$$\frac{H}{60} < h < \frac{H}{40}$$

Onde H é a altura da coluna e h a altura para o perfil.

Logo, como $H = 6 \text{ metros} = 6.000 \text{ mm}$, o intervalo para h (altura do perfil inicial) deve-se situar entre 100mm e 150mm. Diante do exposto, o perfil inicial para a coluna será considerado o **W 150 x 24**

Com o mesmo raciocínio, para as vigas, o pré-dimensionamento proposto é de.

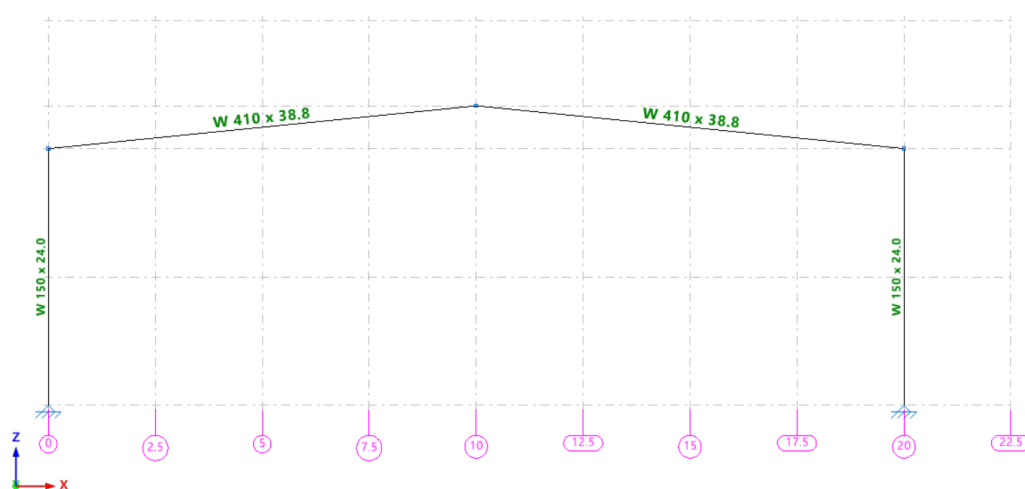
$$\frac{L}{30} < h < \frac{L}{20}$$

Onde L é o comprimento do vão e h a altura do perfil.

Logo, como $L = 20 \text{ metros} = 20.000 \text{ mm}$, o intervalo para h (altura do perfil inicial) deveria situar-se entre 667mm e 1000mm. Entretanto, para não iniciar a tentativa de análise estrutural com um perfil pesado de forma imediata, como um da série 600, o perfil inicial para a viga será considerado o **W 400 x 38,8**.

A Figura 40 a seguir indica a disposição do pórtico com os perfis atribuídos no pré-dimensionamento.

Figura 40 – Definição do pórtico do galpão de vão de 20 metros e viga de alma cheia



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Cype3D irá realizar a análise estrutural inicial considerando o peso próprio destes perfis, acrescido das demais cargas permanentes definidas no Quadro 7, e cargas de vento e sobrecargas definidas no Capítulo 5.

Diante do exposto, o próximo passo é a inserção das demais cargas no software para que se realize a análise estrutural, e o lançamento das cargas deve ser realizado de forma categorizada, com a indicação de quais são as Cargas Permanentes (Peso próprio da estrutura, terças, telhas e placas fotovoltaicas) e quais são as Cargas Variáveis (Sobrecarga e as Cargas de Vento a 0° e 90°).

O Quadro 10 a seguir indica a categorização das cargas a serem lançadas no Cype 3D para que o software realize as combinações de ações de forma automática como o disposto no Item 5.6.

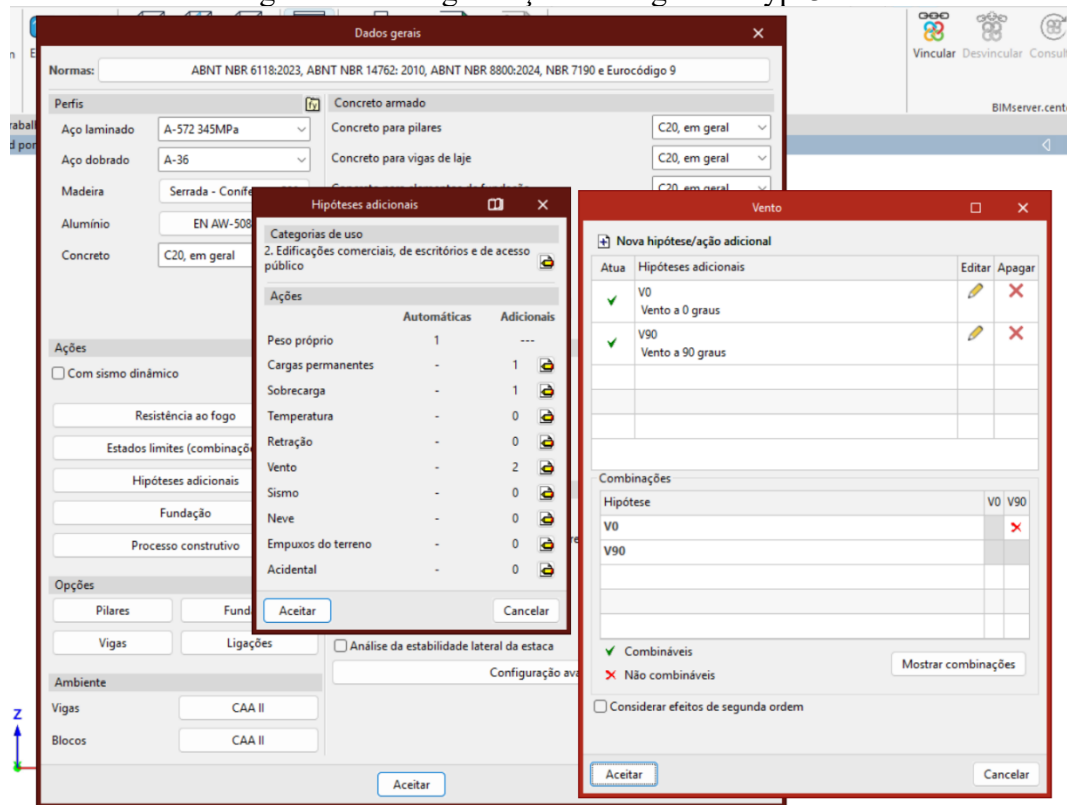
Quadro 10 - Categorização de cargas no Cype 3D

Categorização de carga	Tipo de carga	Identificação
Carga permanente	Peso próprio (pórtico)	PP
Carga permanente	Peso próprio (placas fotovoltaicas, telhas, terças)	CP
Carga variável	Sobrecarga	SC
Carga variável	Vento a 0°	V0
Carga variável	Vento a 90°	V90

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 41 a seguir indica a categorização das cargas (hipóteses de carga) entre Peso Próprio dos elementos do pórtico e peso próprio das placas fotovoltaicas, telhas, terças, sobrecarga e vento a 0° e 90° diretamente na interface do software. Esta é a principal etapa a anteceder a análise estrutural, para garantir que o Cype3D irá considerar todas as combinações de ações com os respectivos coeficientes de ponderação e combinação corretos de acordo com o disposto no Item 5.6 e na ABNT NBR 8800:2024.

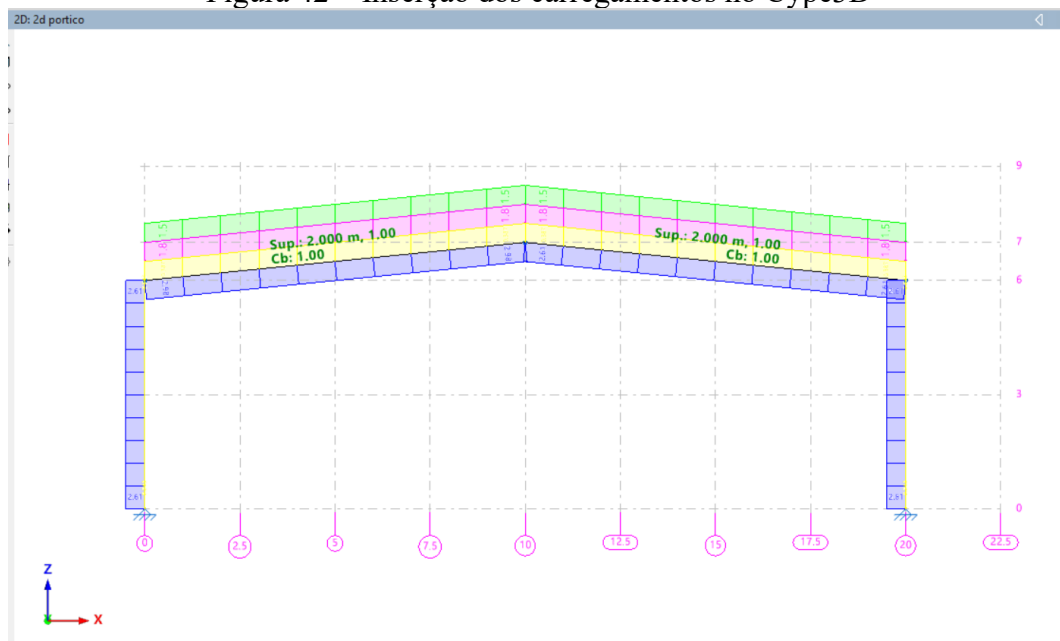
Figura 41 - Categorização de cargas no Cype3D



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a categorização das cargas, procede-se para a etapa de inserção dos carregamentos em kN/m no pórtico conforme valores característicos definidos no Quadro 7. Também se insere o travamento lateral para análise da flambagem lateral nos pórticos. Para os galpões objetos de estudo deste trabalho, o travamento lateral é feito por terças espaçadas a cada 2 (dois) metros conforme definidos no Capítulo 4. Na Figura 42 está representado os esforços do Peso Próprio da estrutura com os perfis atribuídos no pré-dimensionamento, acrescido dos Carregamentos Permanentes do Quadro 7, Sobrecarga definida no Item 5.3 e Carga de vento definida no Item 5.1, e o travamento lateral da estrutura para análise da flambagem.

Figura 42 – Inserção dos carregamentos no Cype3D



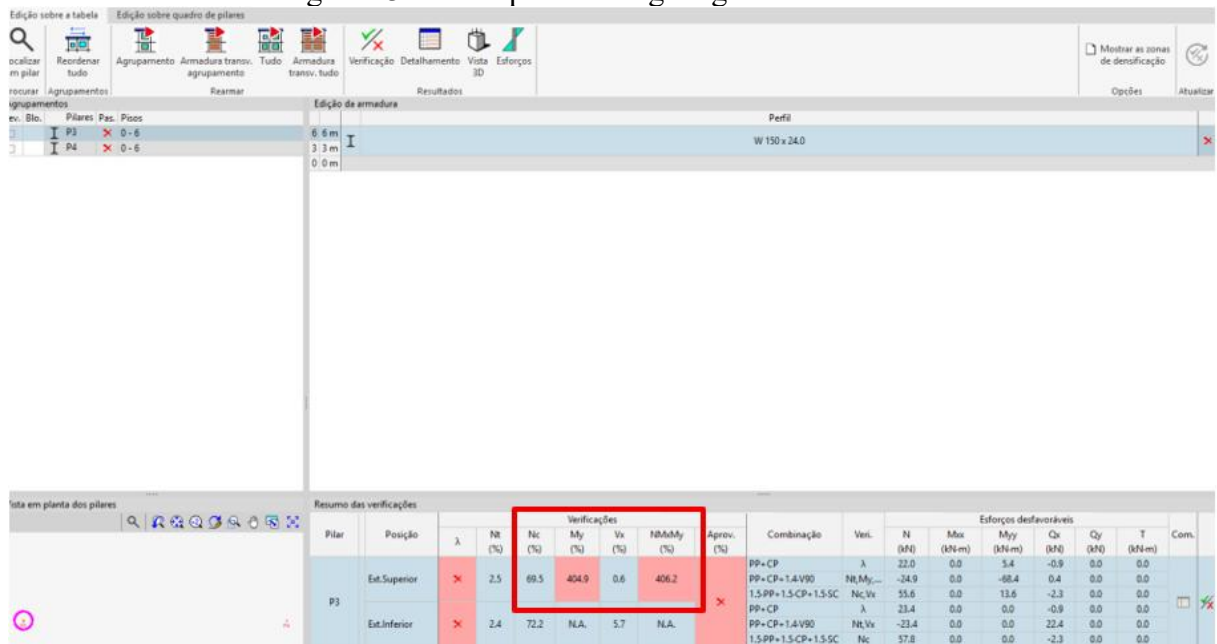
Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a inserção de todos os carregamentos e travamentos laterais, procede-se com a análise estrutural para saber se a estrutura atende aos Estados Limites Último e de Serviço da ABNT NBR 8800:2024.

Como resultado inicial da análise estrutural com os perfis pré-definidos, a estrutura colapsou por flambagem global das colunas, o perfil **W 150 24** era demasiadamente esbelto (fino) para resistir ao deslocamento limite, da ordem de 4x ou 400% acima do limite de deslocamento. Ademais, para as vigas da cobertura, o perfil **W 400 38,8** também apresentou flexão acima do limite, e é notável destacar que o perfil de menor dimensão que atende a todas as verificações da estrutura é o perfil **W 610 155**, de dimensões muito próximas ao pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998) e apresentado na Tabela 5. Fato este que comprova a maestria do autor e corrobora a confiabilidade de seus parâmetros empíricos para o pré-dimensionamento de estruturas de aço.

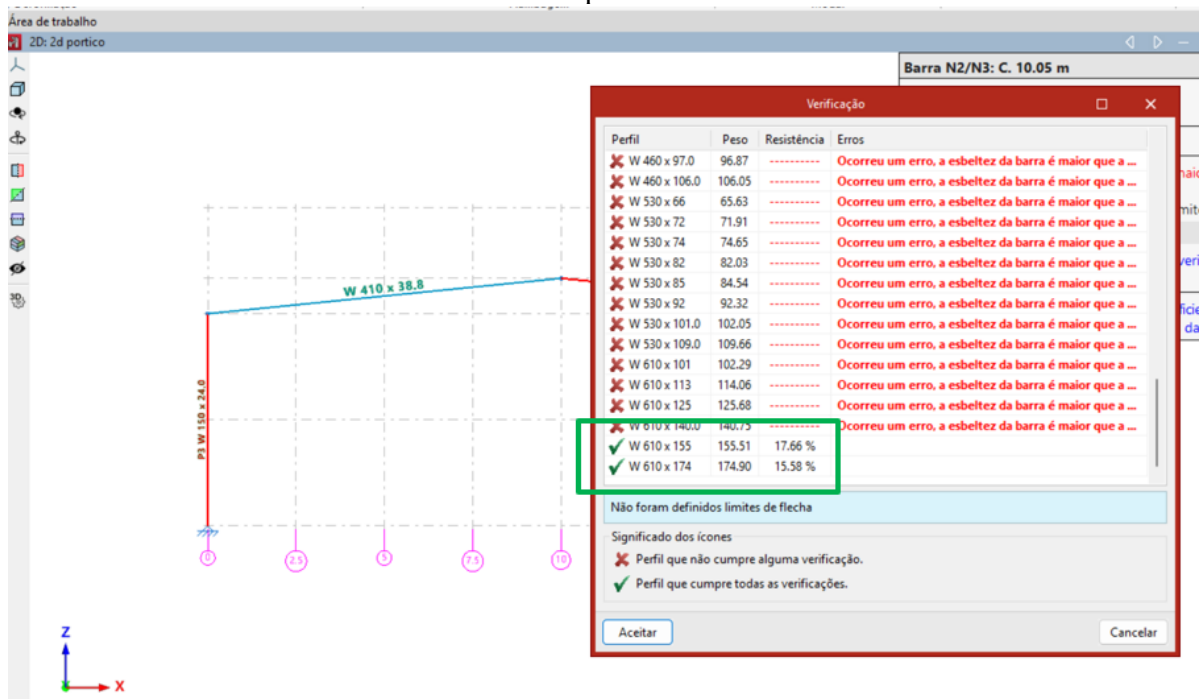
As Figuras 43 e 44 a seguir extraídas do Cype3D evidenciam estes resultados obtidos.

Figura 43 - Falha por flambagem global nas colunas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 - Falha no perfil W 400 38,8 e evidência de que o perfil W 610 155 atende aos requisitos



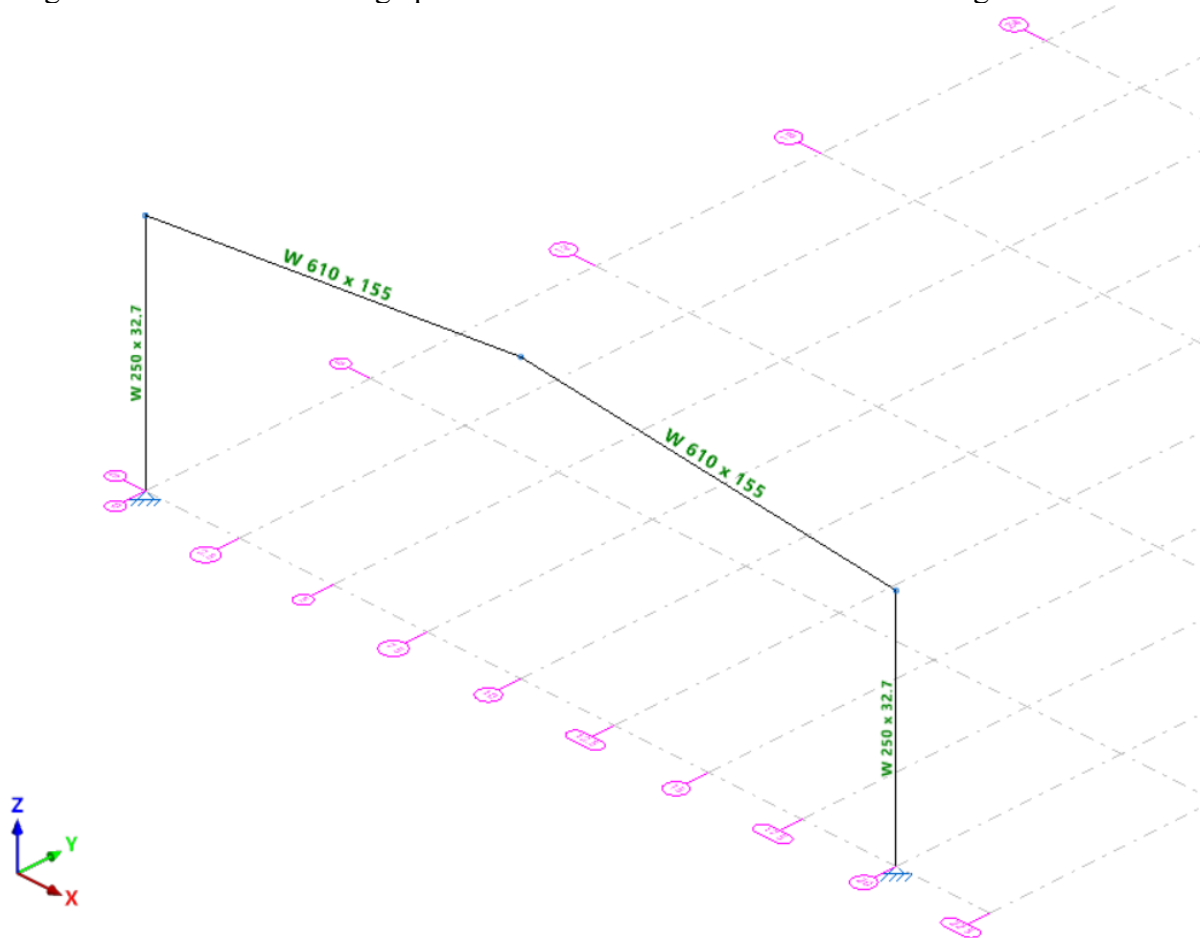
Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante do exposto, o próximo passo é realizar novamente a análise estrutural do pórtico, porém, desta vez com o poder de processamento do software para que ele aponte o perfil mais leve que atende a todos os requisitos da ABNT NBR 8800:2024. O intuito é que o Cype3D aponte os perfis mais leves de mesma série que o utilizado no pré-dimensionamento, isto é, o perfil mais leve da série W da GERDAU que atenda a todos os requisitos da estrutura.

Para alcançar este objetivo, deve-se realizar uma análise estrutural selecionando a opção “Dimensionamento Ótimo de Perfis” na ferramenta de análise estrutural do Cype3D. A partir desta análise estrutural otimizada, o software retornou os perfis **W 610 155** para as vigas da cobertura conforme apontado na Figura 45, e o perfil **W 250 32.7** para as colunas como elemento estrutural final.

A configuração final do pórtico do galpão com vão de 20 metros e estrutura de cobertura de viga de alma cheia está apresentada na Figura 45.

Figura 45 - Pórtico final do galpão com vão de 20 metros e cobertura de viga de alma cheia



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, extraiu-se o relatório do Cype3D com os resumos das peças e elementos estruturais utilizados no pórtico. A Figura 46 a seguir apresenta a Tabela resumo dos elementos estruturais.

Figura 46 - Tabela resumo de aço extraída do Cype3D para o pórtico de 20 metros de vão e cobertura de viga de alma cheia

Tabela resumo												
Material		Série	Perfil	Comprimento			Volume			Peso		
Tipo	Designação			Perfil (m)	Série (m)	Material (m)	Perfil (m³)	Série (m³)	Material (m³)	Perfil (kg)	Série (kg)	Material (kg)
Aço laminado	A-572 345MPa	I	W 250 x 32.7	12.000	32.100	32.100	0.051	0.449	0.449	396.58	3522.26	3522.26
			W 610 x 155	20.100			0.398			3125.68		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse parâmetro de peso total do material será utilizado para comparação com a solução de estrutura de cobertura em treliça de perfil dobrado em aço ASTM A36 também em um vão de 20 metros.

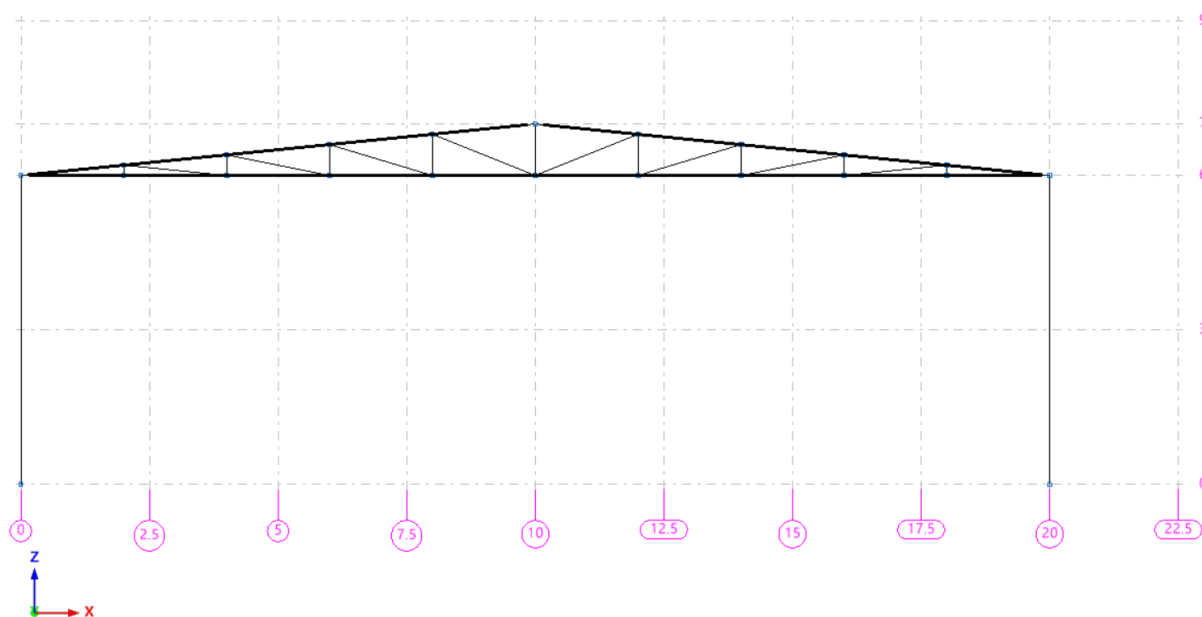
É importante salientar que estão sendo abordados apenas os elementos principais dos pórticos, isto é, colunas e vigas.

6.1.2 Vão de 20 metros e cobertura em treliça

Assim como na configuração do pórtico com cobertura de viga de alma cheia com vão de 20 metros, para esta primeira configuração de galpão com pórtico em treliça, a análise estrutural e dimensionamento também se iniciam com a definição da geometria do pórtico. Para esta configuração, são desenhadas as barras verticais que representam as colunas, com o espaçamento de acordo com a dimensão do vão (20 metros) e deve ser desenhada a esquematização da treliça com as barras representando os banzos superiores, banzos inferiores, diagonais e montantes.

A disposição das barras da treliça deve ser realizada de acordo com a dimensão do vão a ser vencido, e a inclinação do telhado e os elementos da cobertura em que ela suportará. Pelo fato de a inclinação do telhado ser 10% para atender as normas de uso e desempenho, e pelo espaçamento das terças ser de 2 metros conforme abordado no Capítulo 4, a treliça a ser esquematizada para os galpões propostos neste trabalho foi desenhada conforme o disposto na Figura 47.

Figura 47 - Geometria do pórtico vão de 20 metros e cobertura de treliça



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta disposição das barras formou uma treliça de Pratt, isto é, uma treliça cujo montantes descem verticalmente e as diagonais são direcionadas para baixo e para o centro da treliça. Com esta disposição, atinge-se dois objetivos primordiais para o funcionamento da estrutura de cobertura:

1. Os nós formados pelo banzo superior, montante e diagonais ficaram espaçados a cada 2 (dois) metros, no qual permite-se apoiar as terças exatamente nos nós;
2. A treliça de Pratt, em comparação a de Howe ou outros tipos, possui uma maior eficiência para suportar cargas verticais, pelo fato de a montante ser direcionada verticalmente e as diagonais trabalharem à tração (vantajoso para o aço).

Após a definição da geometria do pórtico, procede-se com a definição dos materiais a serem utilizados. Os materiais estão apresentados na Tabela 4 e a definição no software Cype3D estão apresentadas nas Figuras 48 e 49 a seguir. Nesta configuração de galpão, aparecerão os dois aços estruturais definidos, isto é:

1. Perfil laminado > colunas > ASTM A572 Gr. 50 > ABNT NBR 8800:2024;
2. Perfil dobrado > elementos da treliça > ASTM A36 > ABNT NBR 14762:2024.

O aço ASTM A36 é o aço padrão para treliças no Brasil pela sua elevada trabalhabilidade (dobras, cortes e soldas), e pelos elementos estruturais de baixo peso.

Figura 48 – Definição dos aços estruturais para as colunas e treliça

Obra vazia

Normas: ABNT NBR 6118:2023, ABNT NBR 14762: 2010, ABNT NBR 8800:2024, NBR 7190 e Eurocódigo 9

Perfis

Aço laminado: A-572 345MPa

Aço dobrado: A-36

Madeira: Serapim - Coníferas - C20

Alumínio: EN AW-5083 - F

Concreto: C20, em geral

Concreto armado

Concreto para pilares: C20, em geral

Concreto para vigas de laje: C20, em geral

Concreto para elementos de fundação: C20, em geral

Aço de barras: CA-50 e CA-60

Características do agregado: Granito (15 mm), 30 mm

Recobrimentos: Desperdícios de aço

Ações

☐ Com sismo dinâmico

Resistência ao fogo

Estados limites (combinações)

Hipóteses adicionais

Fundação

Processo construtivo

Opções

Pilares: Fundação

Vigas: Ligações

Ambiente

Vigas: CAA II

Blocos: CAA II

Terreno de fundação

☐ Verificar deslizamento de sapatas

Tensões admissíveis do terreno

Combinações fundamentais: 0.200 MPa

Combinações sísmicas e acidentais: 0.300 MPa

Estacas (Concreto armado)

Excentricidade para o momento mínimo: 0.10 m

☒ Considerar esforços com um esforço axial reduzido

Estacas que trabalham por fuste: 0.00 - Axial

Estacas que trabalham só por ponta: 0.80 - Axial

Coefficiente de flambagem: 1.00

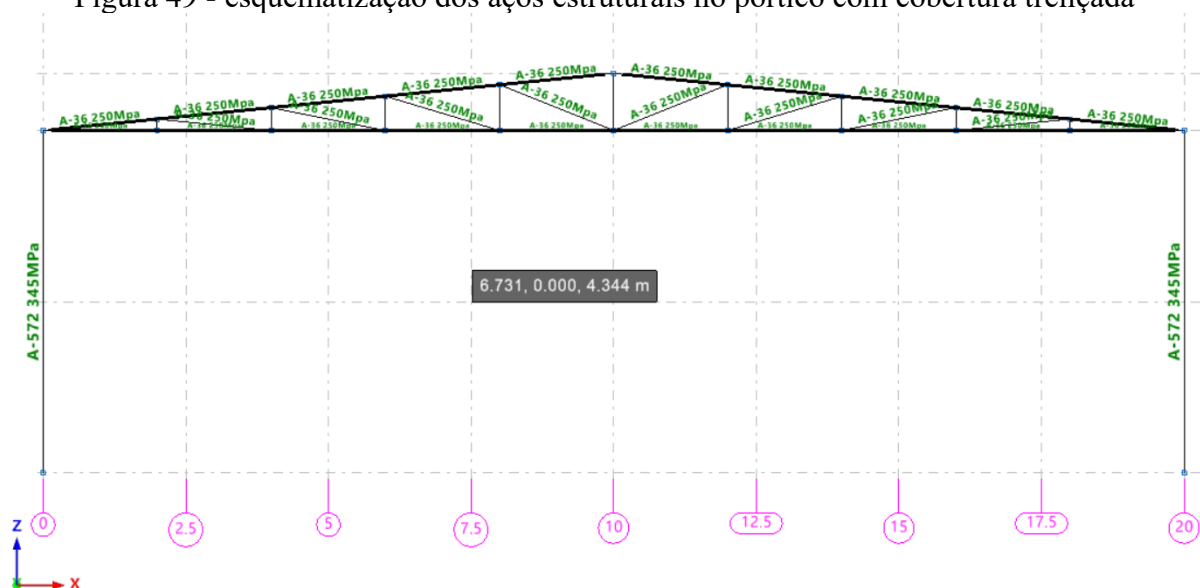
☐ Análise da estabilidade lateral da estaca

Configuração avançada

Cancelar < Anterior Seguinte > Terminar

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 49 - esquematização dos aço estruturais no pórtico com cobertura treliçada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após definição da geometria do pórtico, deve-se indicar a vinculação entre as barras para que o Cype3D considere a disposição de barras de fato como uma treliça. Para isso, os nós entre as barras das tesouras das duas águas devem ser considerados articulados, isto é, as barras só tracionam ou comprimem ao serem solicitadas, não transferem momento fletor. Para a vinculação externa, ou seja, as colunas na base (chapa de base) devem ser engastadas, para garantir o travamento em todas as direções, já que a treliça tem um comportamento articulado.

Em prosseguimento a análise estrutural desta primeira configuração de pórtico com treliça, deve-se atribuir os perfis do pré-dimensionamento. Ao contrário da configuração de pórtico com viga de alma cheia, em que houve a incidência apenas de perfis da série W da GERDAU (Perfis laminados de alma cheia), desta vez, haverá este perfil W da GERDAU apenas para as colunas do pórtico, as barras da treliça possuirão um perfil dobrado em aço ASTM A36, sendo os mais comuns as cantoneiras duplas e os perfis em U.

Diante do exposto, para atribuição do perfil inicial de pré-dimensionamento, novamente será selecionado o perfil W da GERDAU que possua dimensões características dentro do intervalo de pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998) e apresentado anteriormente na Tabela 5.

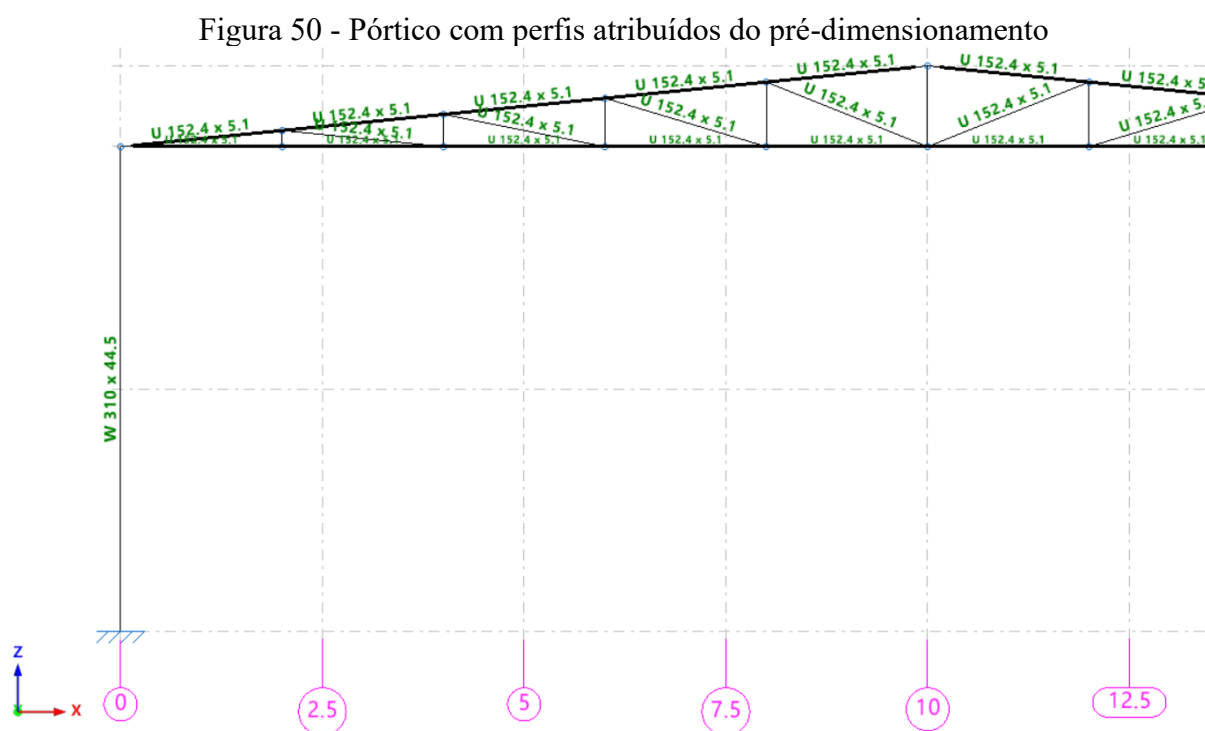
$$\frac{H}{60} < h < \frac{H}{40}$$

Onde H é a altura da coluna e h a altura para o perfil.

Logo, como $H = 6$ metros = 6.000 mm, o intervalo para h (altura do perfil inicial) deve-se situar entre 100mm e 150mm. Diante do exposto, o perfil inicial para a coluna será considerado o **W 150 x 24**

Um fato a ser considerado, o perfil que “passou” no primeiro galpão com vão de 20 metros e cobertura de viga de alma cheia foi o perfil **W 250 x 32,7**, entretanto, pelo fato de haver uma nova disposição de pórtico (cobertura de treliça) e consequentemente um novo comportamento estrutural, será considerado um perfil mais leve para o pré-dimensionamento, exatamente de acordo com a recomendação de Bellei (1998).

Por recomendação de D'alambert (2012), para treliças com perfis de aço dobrado, os mais usuais pela leveza e trabalhabilidade são os perfis em Cantoneiras Duplas, formando uma seção transversal T, também popularmente conhecido como perfil T, ou perfis em U. A GERDAU possui em seu catálogo perfis em U de aço dobrado. Portanto, como perfil inicial para o pré-dimensionamento, será considerado o perfil **U 152.4 5.1**. A Figura 50 indica a disposição do pórtico com os perfis atribuídos do pré-dimensionamento.



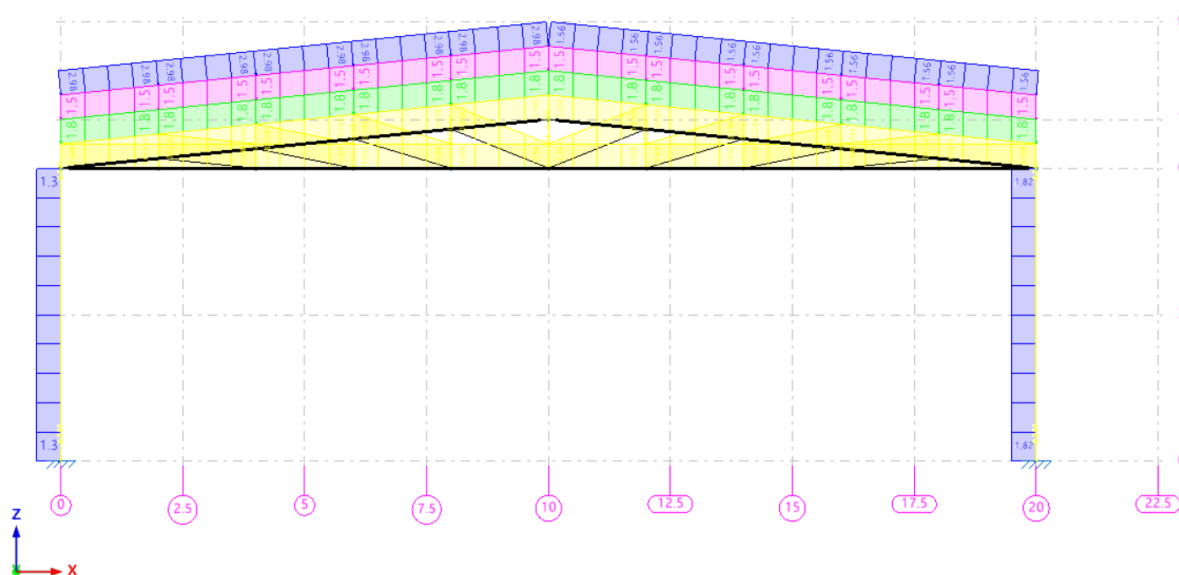
Fonte: Elaborado pelo autor.

O Cype3D realizou a análise estrutural inicial considerando o peso próprio destes perfis, acrescido das demais cargas permanentes definidas no Quadro 7, e cargas de vento e sobrecargas definidas no Capítulo 5.

Diante do exposto, o próximo passo é a inserção das demais cargas no software para que se realize a análise estrutural, e o lançamento das cargas deve ser realizado de forma categorizada, com a indicação de quais são as Cargas Permanentes (Peso próprio da estrutura, terças, telhas e placas fotovoltaicas) e quais são as Cargas Variáveis (Sobrecarga e as Cargas de Vento a 0° e 90°). O lançamento das cargas neste pórtico com cobertura de treliça é igual ao lançamento do galpão com cobertura de viga de alma cheia, afinal, o comportamento das ações não difere com a estrutura de cobertura, pois o peso próprio dos elementos estruturais sempre irá incidir verticalmente para baixo e o vento será perpendicular as paredes e águas do telhado.

Logo, insere-se as cargas atuantes determinadas no Capítulo 5 e de forma como o disposto no Quadro 10. Na Figura 51 está representado esquematicamente no software as cargas atuantes para prosseguimento com a análise estrutural.

Figura 51 - Carregamentos atuantes no pórtico



Fonte: Elaborado pelo autor.

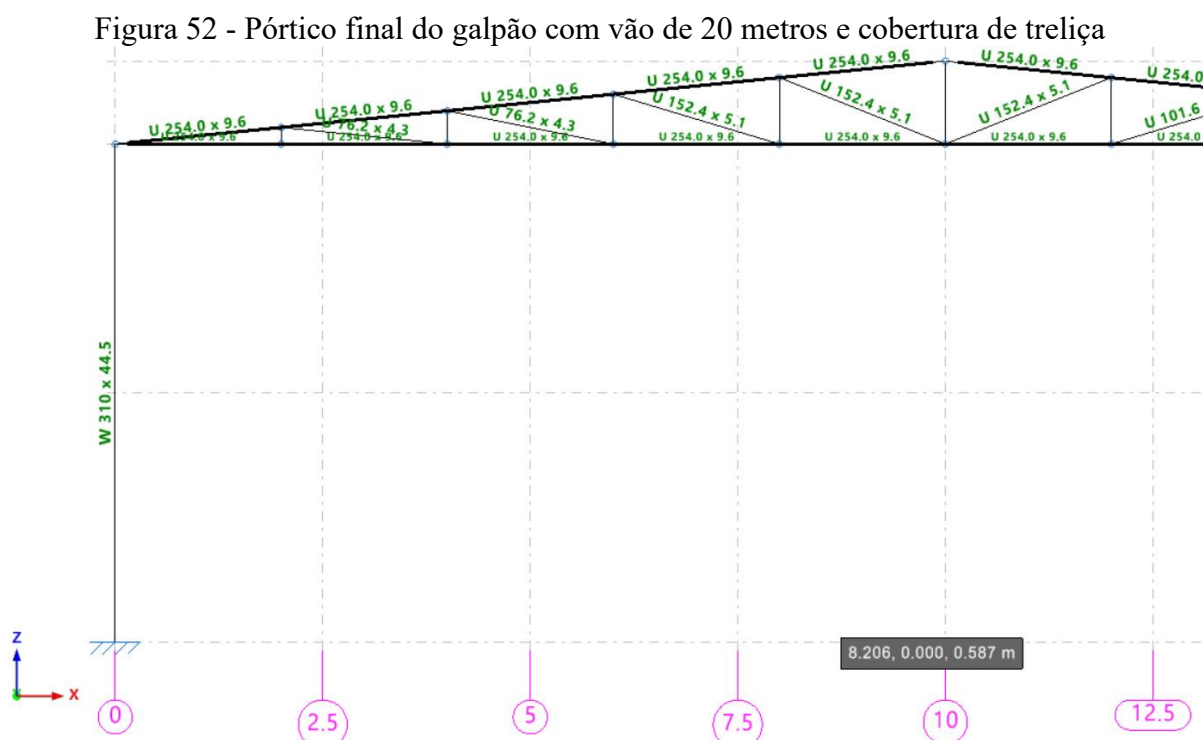
Após a inserção das cargas, o próximo passo é realizar a análise estrutural do pórtico com o poder de processamento do software para que ele aponte o perfil mais leve, dentro das séries utilizadas (W e U da GERDAU) que atendem a todos os requisitos da ABNT NBR 8800:2024.

Para alcançar este objetivo, deve-se realizar uma análise estrutural selecionando a opção “Dimensionamento Ótimo de Perfis” na ferramenta de análise estrutural do Cype3D. A

partir desta análise estrutural otimizada, o software retornou os perfis **W 310 44.5** para as colunas, e os seguintes perfis U para as barras das treliças como elemento estrutural final:

- **U 76.2 4.3**
- **U 101.6 4.6**
- **U 152.4 5.1**
- **U 254.0 9.6**

A configuração final do pórtico do galpão com vão de 20 metros e estrutura de cobertura de viga de alma cheia está apresentado na Figura 52.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, extrai-se o relatório do Cype3D com os resumos das peças e elementos estruturais utilizados no pórtico, para as colunas e barras das treliças (banzos superiores, banzos inferiores, diagonais e montantes). A Figura 53 a seguir apresenta a Tabela resumo dos elementos estruturais.

Figura 53 - Tabela resumo de aço extraída do Cype3D para o pórtico de 20 metros de vão e cobertura de treliça

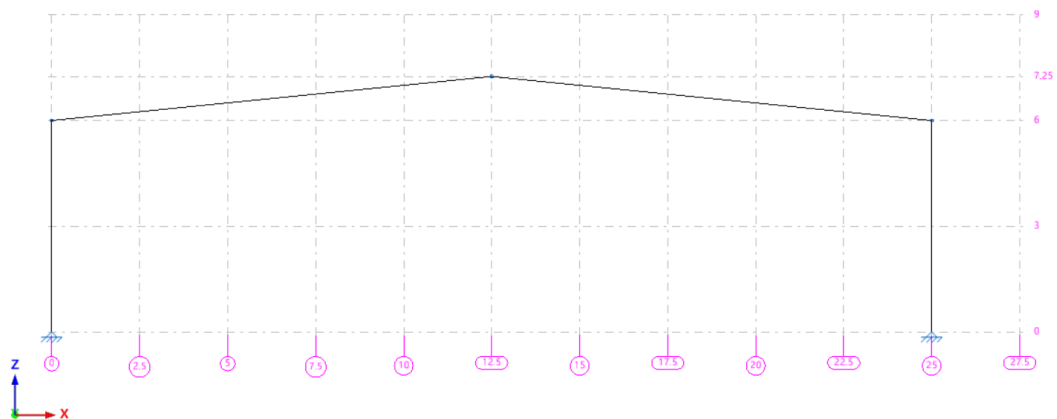
Tabela resumo												
Material		Série	Perfil	Comprimento			Volume			Peso		
Tipo	Designação			Perfil (m)	Série (m)	Material (m)	Perfil (m³)	Série (m³)	Material (m³)	Perfil (kg)	Série (kg)	Material (kg)
Aço laminado	A-572 345MPa	I	W 310 x 44.5	12.000	12.000	12.000	0.069	0.069	0.069	538.82	538.82	538.82
			U 254.0 x 9.6	40.100			0.152			1193.03		
			U 76.2 x 4.3	13.099			0.010			80.00		
			U 152.4 x 5.1	6.396			0.010			77.83		
	A-36 250Mpa	Perfil U	U 101.6 x 4.6	2.088	61.683	61.683	0.002	0.174	0.174	16.56	1367.41	1367.41
						73.683			0.243			1906.23

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1.3 Vão de 25 metros e cobertura de viga de alma cheia

Prosseguindo para a segunda configuração de galpão com a viga de alma cheia, primeiramente define-se a geometria do pórtico, para esta configuração, são desenhadas as barras verticais que representam as colunas, com o espaçamento de acordo com a dimensão do vão (25 metros) e as barras horizontais que representam as vigas de cobertura com a inclinação de 10%. Na Figura 54 está a geometria no Cype3D do pórtico desta configuração com vão de 25 metros e cobertura de viga de alma cheia.

Figura 54 - Geometria do galpão com vão de 25 metros e cobertura de viga de alma cheia



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme disposto no Quadro 9 e na primeira configuração de galpão, os próximos passos no software são definir o material estrutural, isto é, aços ASTM A 572 Gr. 50 para as colunas e vigas, e os perfis do pré-dimensionamento para análise estrutural com peso próprio dos elementos estruturais.

Para atribuição do perfil inicial, assim como na primeira configuração, será selecionado um perfil W do catálogo da GERDAU que possua dimensões características dentro do intervalo de pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998) e apresentado anteriormente na Tabela 5.

$$\frac{H}{60} < h < \frac{H}{40}$$

Onde H é a altura da coluna e h a altura para o perfil.

Logo, como $H = 6 \text{ metros} = 6.000 \text{ mm}$, o intervalo para h (altura do perfil inicial) deve-se situar entre 100mm e 150mm. Contudo, o perfil da primeira configuração com vão de 20 metros foi o **W 250 32.7**, portanto, será utilizado o mesmo para o pré-dimensionamento. Importante salientar que a altura das colunas não muda nos diferentes galpões propostos, apenas a dimensão dos vãos (largura do galpão).

Com o mesmo raciocínio, para as vigas, o pré-dimensionamento proposto é de.

$$\frac{L}{30} < h < \frac{L}{20}$$

Onde L é o comprimento do vão e h a altura do perfil.

Logo, como $L = 25 \text{ metros} = 25.000 \text{ mm}$, o intervalo para h (altura do perfil inicial) deveria situar-se entre 833mm e 1250mm. Como o vão de 20 metros exigiu o perfil **W 610 155**, será considerado o mesmo perfil no pré-dimensionamento para esta configuração com 25 metros de vão.

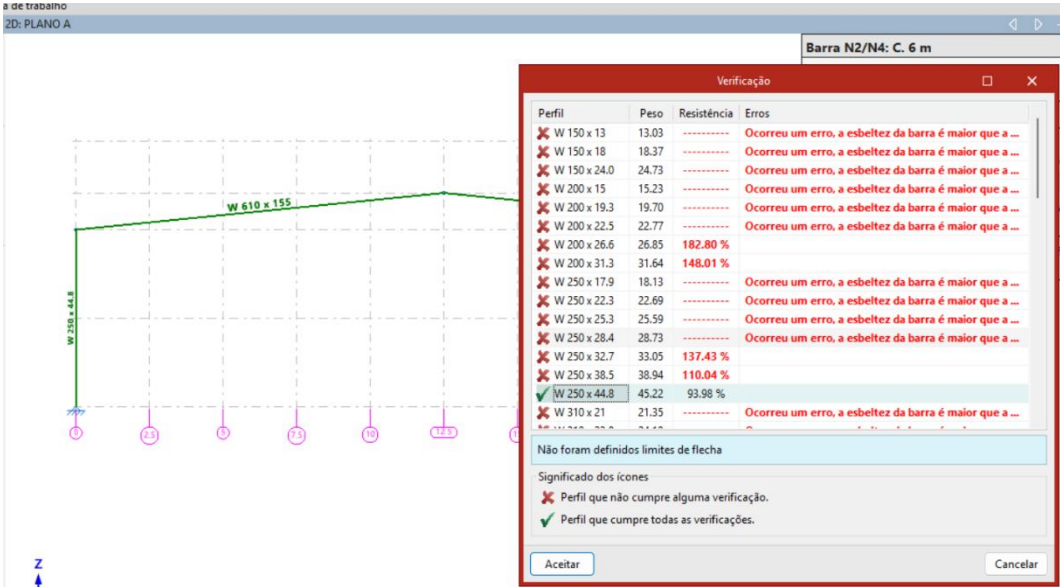
Diante da atribuição dos perfis do pré-dimensionamento e posterior aplicação das cargas dispostas no Capítulo 5 e a carga de vento para o vão de 25 metros calculada e apresentada na Figura 31, faz-se a análise estrutural.

Esta configuração de galpão de 25 metros foi analisada nos Estados Limites Último e de Serviço no Cype3D na modalidade de “Dimensionamento Ótimo” para que o software utilize o poder de processamento para apontar os perfis mais leves da Série W da GERDAU que atendem aos requisitos de resistência e deslocamento previstos na norma.

Conforme será apresentado nas Figuras 55 a 56, esta configuração de vão com 25 metros e cobertura de viga de alma cheia “passou” com o mesmo perfil de viga da configuração

de 20 metros, ou seja, o **W 610 155**, entretanto, o perfil das colunas demandou uma maior dimensão nas mesas para resistir ao peso da viga de 25 metros, e o perfil que atingiu as verificações foi o **W 250 44.8**.

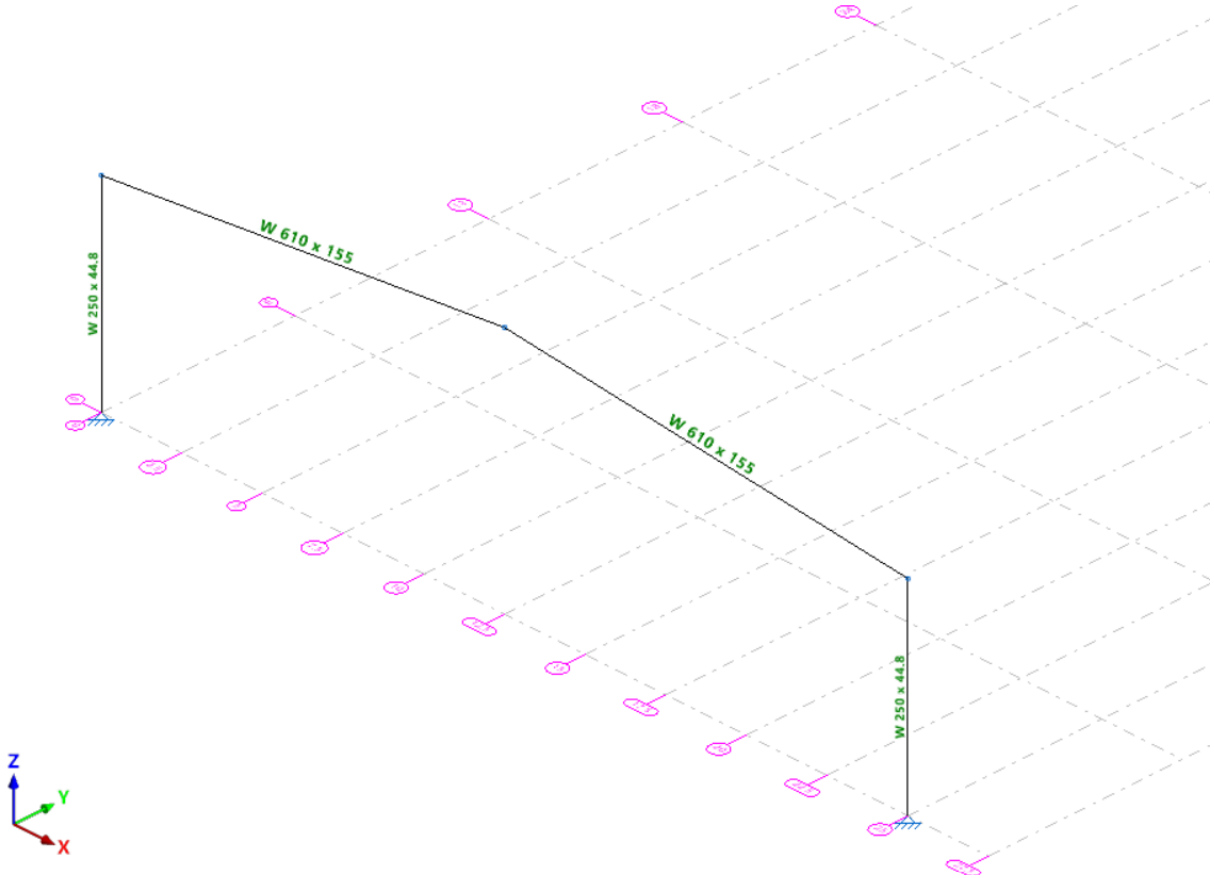
Figura 55 - Atendimento do perfil W 350 44.8 nas colunas do vão de 25 metros e cobertura de alma cheia



Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante do exposto, a Figura 56 a seguir indica a esquematização do pórtico com os perfis finais validados pela análise estrutural no Cype3D.

Figura 56 - Esquematização do pórtico de vão com 25 metros e cobertura de viga de alma cheia



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, extraí-se o relatório do Cype3D com os resumos das peças e elementos estruturais utilizados no pórtico. A Figura 57 a seguir apresenta a Tabela resumo dos elementos estruturais.

Figura 57 - Tabela resumo de aço extraída do Cype3D para o pórtico de 25 metros de vão e cobertura de viga de alma cheia

Tabela resumo												
Material		Série	Perfil	Comprimento			Volume			Peso		
Tipo	Designação			Perfil (m)	Série (m)	Material (m)	Perfil (m³)	Série (m³)	Material (m³)	Perfil (kg)	Série (kg)	Material (kg)
Aço laminado	A-572 345MPa	I	W 250 x 44.8	12.000			0.069			542.59		
			W 610 x 155	25.125			0.498			3907.10		
					37.125			0.567			4449.69	
						37.125			0.567			4449.69

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse parâmetro de peso total do Material em kg será utilizado para comparação com a solução de estrutura de cobertura em treliça de perfil dobrado em aço ASTM A36 no vão de 25 metros.

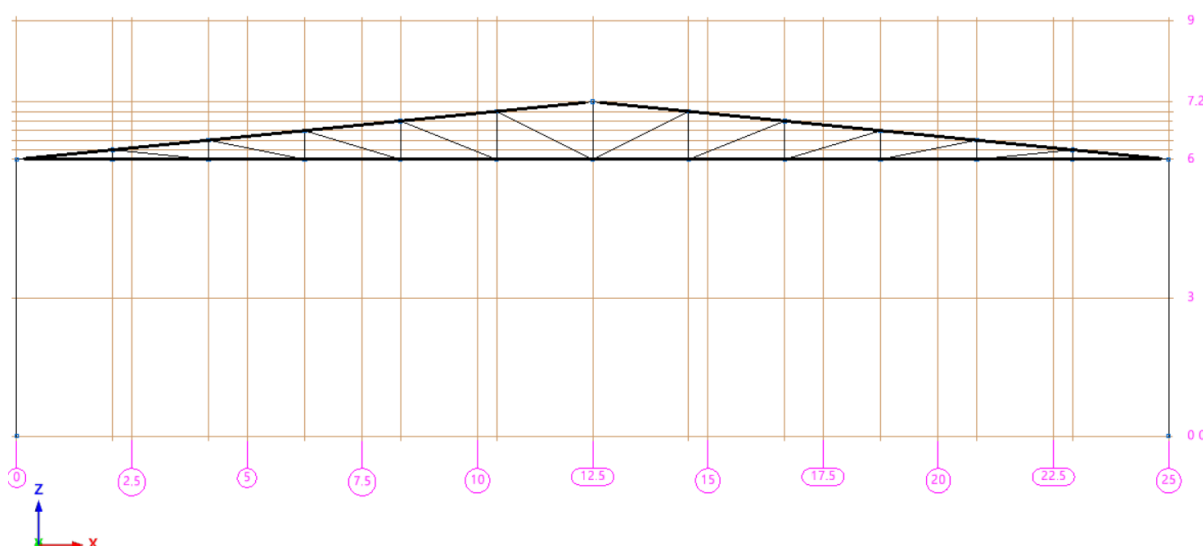
6.1.4 Vão de 25 metros e cobertura em treliça

Prosseguindo para a segunda configuração de galpão com a cobertura em treliça, primeiramente define-se a geometria do pórtico, para esta configuração, são desenhadas as barras verticais que representam as colunas, com o espaçamento de acordo com a dimensão do vão (25 metros) e a esquematização da treliça com as barras representando os banzos superiores, banzos inferiores, diagonais e montantes.

A disposição das barras da treliça deve ser realizada de acordo com a dimensão do vão a ser vencido, a inclinação do telhado e os elementos da cobertura em que ela suportará. Novamente considera-se o disposto no Capítulo 4 para a geometria da treliça, isto é, inclinação do telhado em 10% e espaçamento das terças a cada 2 metros.

A Figura 58 a seguir apresenta a geometria do pórtico da configuração de vão de 25 metros e estrutura de cobertura em treliça.

Figura 58 - Geometria do pórtico com vão de 25 metros e cobertura de treliça



Fonte: Elaborado pelo autor.

Novamente forma-se uma treliça de Pratt assim como a configuração do pórtico com vão de 20 metros, entretanto, agora com o vão de 25 metros, a treliça possui as seguintes características:

1. Altura da cumeeira e nó superior com a cota de 7,25 metros para atendimento à inclinação de 10%;
2. Espaçamento de 2,083m para os nós dos banzos superiores.

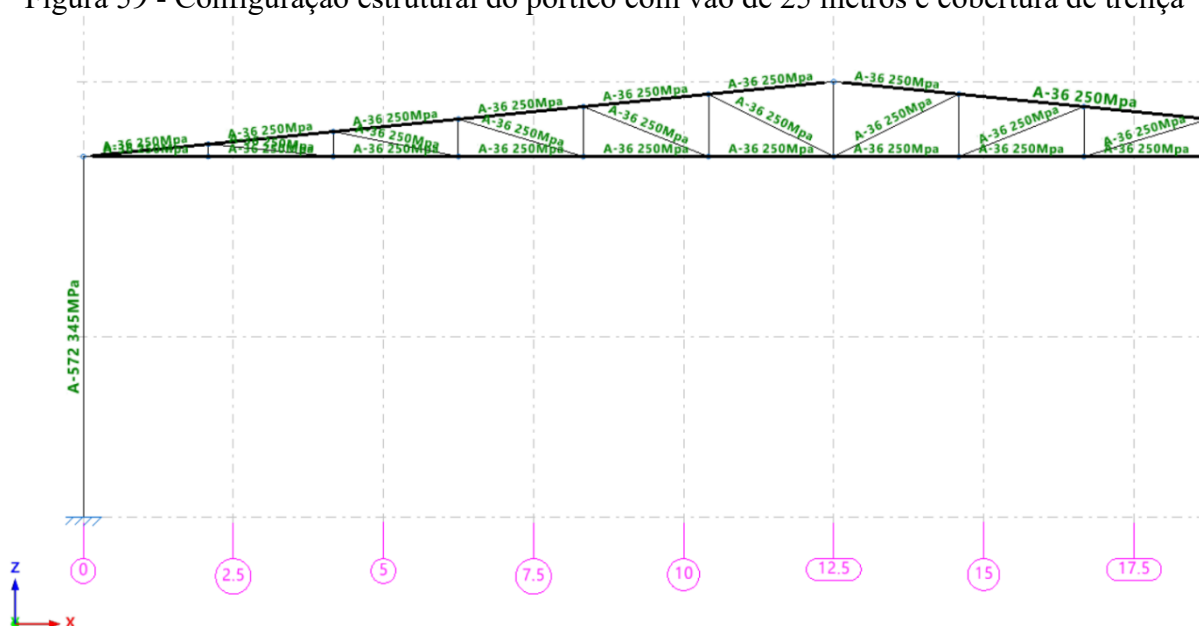
Apesar de a distância das terças ter sido determinada com espaçamento de 2 metros, um vão de 25 metros, e consequentemente uma tesoura de 12,5 metros necessita de um espaçamento de 2,083 metros para obter partes iguais exatas para alocação dos nós e recebimento das terças.

Após definição da geometria dos pórticos, prossegue-se com as definições padrões para a configuração de pórtico com treliça no Cype3D, a saber:

1. Definição de aço ASTM A572 Gr. 50 para as colunas e ASTM A36 para os banzos superiores, banzos inferiores, diagonais e montantes;
2. Articulação nos nós da treliça e engastamento das colunas na base;

A Figura 59 a seguir indica a disposição do pórtico com os aços estruturais definidos e a articulação dos nós e base engastada.

Figura 59 - Configuração estrutural do pórtico com vão de 25 metros e cobertura de treliça

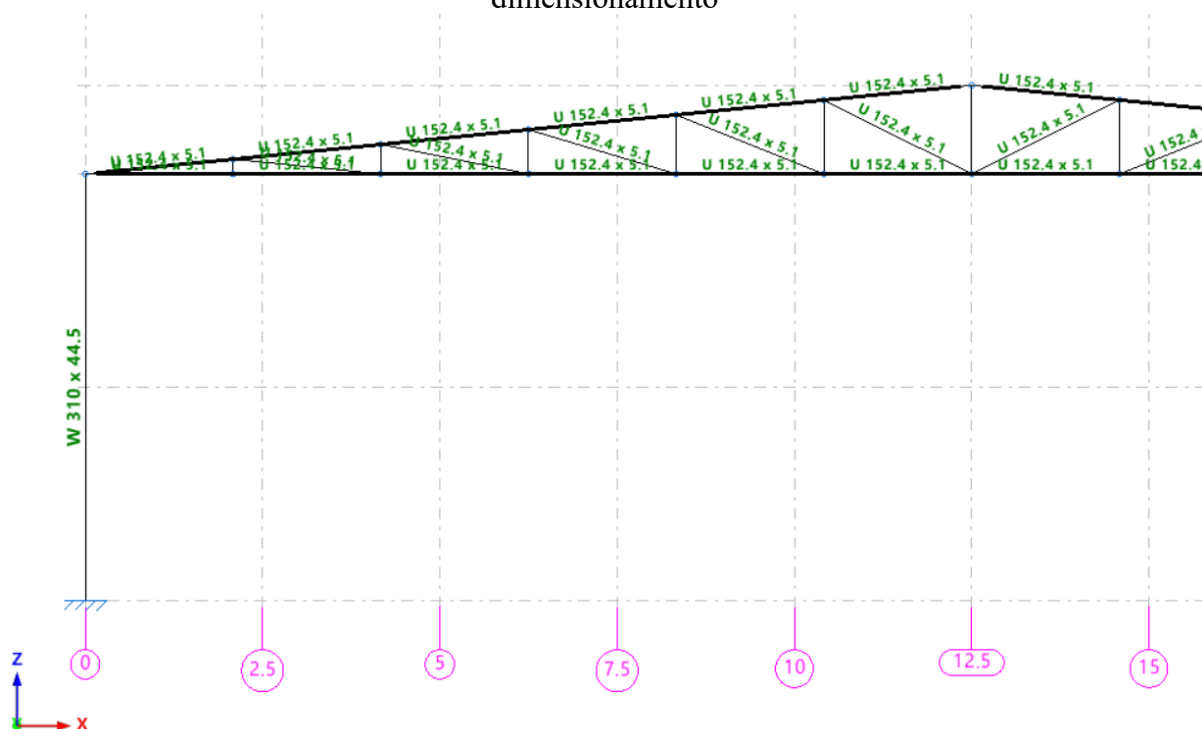


Fonte: Elaborado pelo autor.

Dando prosseguimento a análise estrutural, após a realização de todas as etapas até então descritas, a próxima etapa que antecede a análise estrutural é a definição dos perfis do pré-dimensionamento. Para o pórtico do galpão com a configuração de 25 metros será selecionado o mesmo perfil W da GERDAU que “passou” nas colunas no pórtico de 20 metros, isto é, o perfil **W 310 44.5**. Para os perfis das barras da treliça, será considerado um perfil intermediário entre os perfis U da GERDAU que foram determinados no processamento do software do pórtico de 20 metros e apresentado na Figura 53, portanto, será considerado no pré-dimensionamento o perfil **U 152 4. 5.1**.

Na Figura 60 está apresentado o pórtico com os perfis do pré-dimensionamento para a análise estrutural.

Figura 60 - Pórtico com vão de 25 metros e cobertura de treliça com perfis do pré-dimensionamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

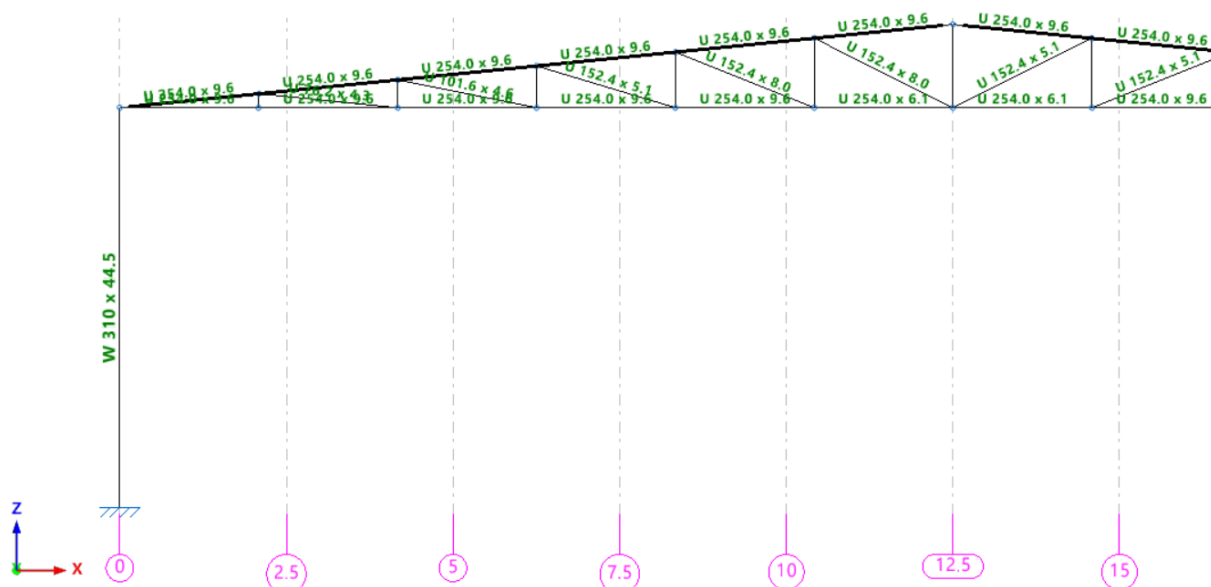
Diante da atribuição dos perfis do pré-dimensionamento e posterior aplicação das cargas dispostas no Capítulo 5 e a carga de vento para o vão de 25 metros calculada e apresentada na Figura 31, faz-se a análise estrutural desta configuração com pórtico de 25 metros e cobertura de treliça.

Para ganho de eficiência no processo de análise estrutural, será considerado a opção de “Dimensionamento Ótimo” no Cype3D, com isto, o software utiliza seu poder de

processamento para indicar o perfil mais leve possível que atenda a todos os requisitos da ABNT NBR 8800:2024, sendo este perfil pertencente as séries utilizadas no pré-dimensionamento. Portanto, o software irá indicar o menor perfil da série W da GERDAU para as colunas e o menor perfil da série U para as barras da treliça que atendem aos Estados Limites Último e de Serviço da norma.

Diante do exposto, a Figura 61 a seguir indica a esquematização do pórtico com os perfis finais validados pela análise estrutural no Cype3D para o pórtico com vão de 25 metros e estrutura de cobertura em treliça.

Figura 61 - Pórtico final do galpão com vão de 25 metros e cobertura de treliça



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, no Cype3D extrai-se o relatório com os resumos das peças e elementos estruturais utilizados no pórtico. A Figura 62 a seguir apresenta a Tabela resumo dos elementos estruturais.

Figura 62 - Tabela resumo de aço extraída do Cype3D para o pórtico de 25 metros de vão e cobertura de treliça

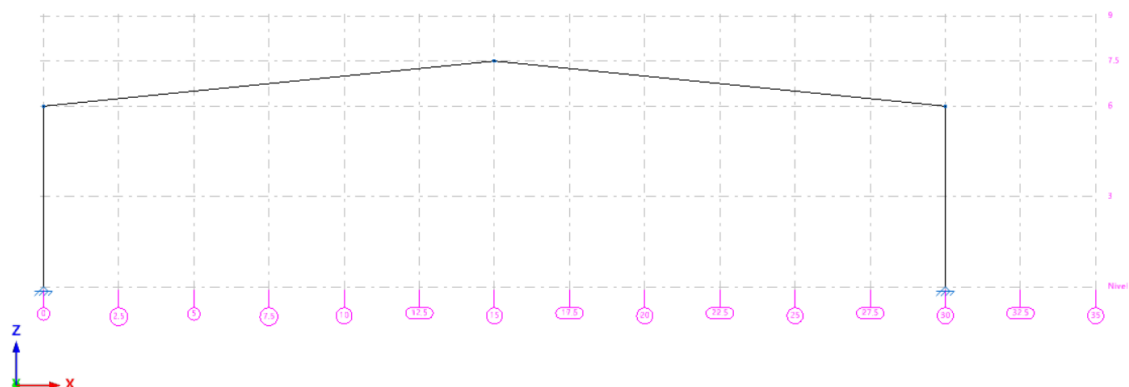
Tabela resumo												
Material		Série	Perfil	Comprimento			Volume			Peso		
Tipo	Designação			Perfil (m)	Série (m)	Material (m)	Perfil (m³)	Série (m³)	Material (m³)	Perfil (kg)	Série (kg)	Material (kg)
Aço laminado	A-572 345MPa	I	W 310 x 44.5	12.000	12.000	12.000	0.069	0.069	0.069	538.82	538.82	538.82
			U 254.0 x 9.6	41.790			0.158			1243.32		
			U 76.2 x 4.3	11.685			0.009			71.36		
			U 101.6 x 4.6	4.248			0.004			33.68		
			U 152.4 x 5.1	8.924			0.014			108.59		
			U 152.4 x 8.0	4.570			0.009			71.39		
			U 254.0 x 6.1	4.166			0.012			94.84		
	A-36 250Mpa	Perfil U	U 203.2 x 7.7	4.168	79.552	79.552	0.011	0.218	0.218	84.85	1708.03	1708.03
						91.552			0.286			2246.85

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.1.5 Vão de 30 metros e cobertura de viga de alma cheia

Prosseguindo para a terceira e última configuração de galpão com a viga de alma cheia, define-se a geometria do pórtico, para esta configuração, são desenhadas as barras verticais que representam as colunas, com o espaçamento de acordo com a dimensão do vão (30 metros) e as barras horizontais que representam as vigas de cobertura com a inclinação de 10%. Na Figura 63 está a geometria no Cype3D do pórtico desta configuração com vão de 30 metros e cobertura de viga de alma cheia.

Figura 63 - Geometria do galpão com vão de 30 metros e cobertura de viga de alma cheia



Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo, os próximos passos no Cype3D são definir o material estrutural, isto é, aço ASTM A 572 Gr. 50 para as colunas e vigas, e os perfis do pré-dimensionamento para análise estrutural com peso próprio.

Para atribuição do perfil inicial, novamente será selecionado um perfil W do catálogo da GERDAU que possua dimensões características dentro do intervalo de pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998) e apresentado anteriormente na Tabela 5.

$$\frac{H}{60} < h < \frac{H}{40}$$

Onde H é a altura da coluna e h a altura para o perfil.

Logo, como $H = 6 \text{ metros} = 6.000 \text{ mm}$, o intervalo para h (altura do perfil inicial) deve-se situar entre 100mm e 150mm. Conforme determinado na configuração de viga de alma cheia com o vão de 25 metros, o perfil naquela configuração com vão de 25 metros foi o **W 250 44.8**, portanto, será utilizado este mesmo perfil para o pré-dimensionamento da configuração de 30 metros.

Com o mesmo raciocínio, para as colunas, o pré-dimensionamento proposto é de.

$$\frac{L}{30} < h < \frac{L}{20}$$

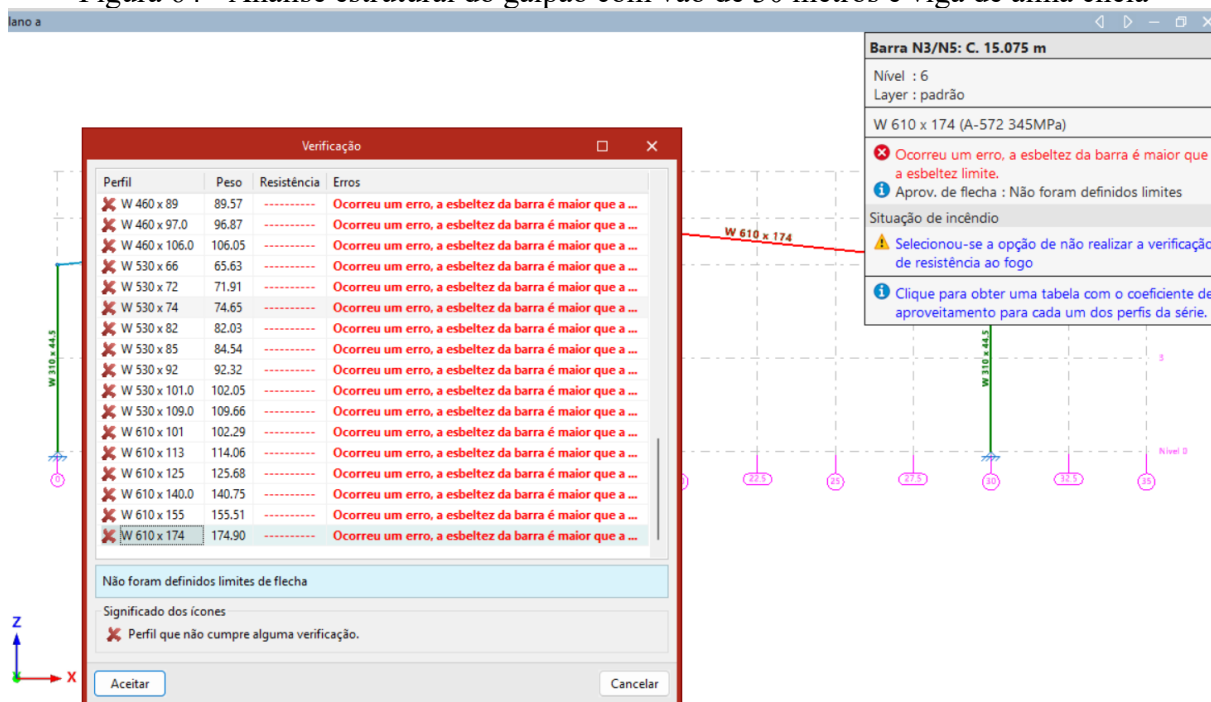
Onde L é o comprimento do vão e h a altura do perfil.

Logo, como $L = 30 \text{ metros} = 30.000 \text{ mm}$, o intervalo para h (altura do perfil inicial) deveria situar-se entre 1000mm e 1500mm.

É interessante analisar, que ao considerar o pré-dimensionamento proposto por Bellei (1998), a altura do perfil necessária para vencer um vão de 30 metros resultaria em perfis com dimensões mínimas acima de 1 metro de altura, o que é praticamente inviável para elementos provenientes da indústria como perfis catalogados ou “de prateleira”. Perfis dessas dimensões são perfis artesanais feitos sob encomenda para obras de portes excepcionais, geralmente soldados, em que se há possibilidade de atingir grandes dimensões de peças estruturais metálicas.

Como os vãos de 20 e 25 metros exigiram o mesmo perfil **W 610 155**, será considerado este mesmo perfil no pré-dimensionamento para esta configuração com 30 metros de vão. Diante da atribuição dos perfis do pré-dimensionamento e posterior aplicação das cargas dispostas no Capítulo 5 e a carga de vento para o vão de 30 metros calculada e apresentada na Figura 33, faz-se a análise estrutural, que será apresentada na Figura 64 a seguir e depois analisada.

Figura 64 - Análise estrutural do galpão com vão de 30 metros e viga de alma cheia



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme análise estrutural realizada para o pórtico de 30 metros de vão e cobertura de viga de alma cheia, foi atestado um fato interessante: **Nenhum perfil do catálogo de Perfis W da GERDAU atendeu a todos os requisitos**, o maior perfil da série, o **W 610 174** não atendeu ao Estado Limite de Serviço pois a esbelteza do perfil é maior que o limite para um vão de 30 metros.

Diante deste resultado, serão realizadas as seguintes abordagens:

1. Para efeito comparativo, será considerado o perfil W 610 174 no peso do pórtico para comparação com a solução de cobertura de treliça;
2. Entretanto, pelo fato de nem mesmo o perfil W 610 174 atender a todos os requisitos da ABNT NBR 8800:2024 no que tange aos Estados Limites Último e de Serviço, o galpão com vão de 30 metros terá a desclassificação da solução com cobertura de viga por não atender à norma. Portanto, na conclusão da tese deste trabalho, para o vão de 30 metros, a solução com cobertura de treliça será considerada automaticamente a mais eficiente.

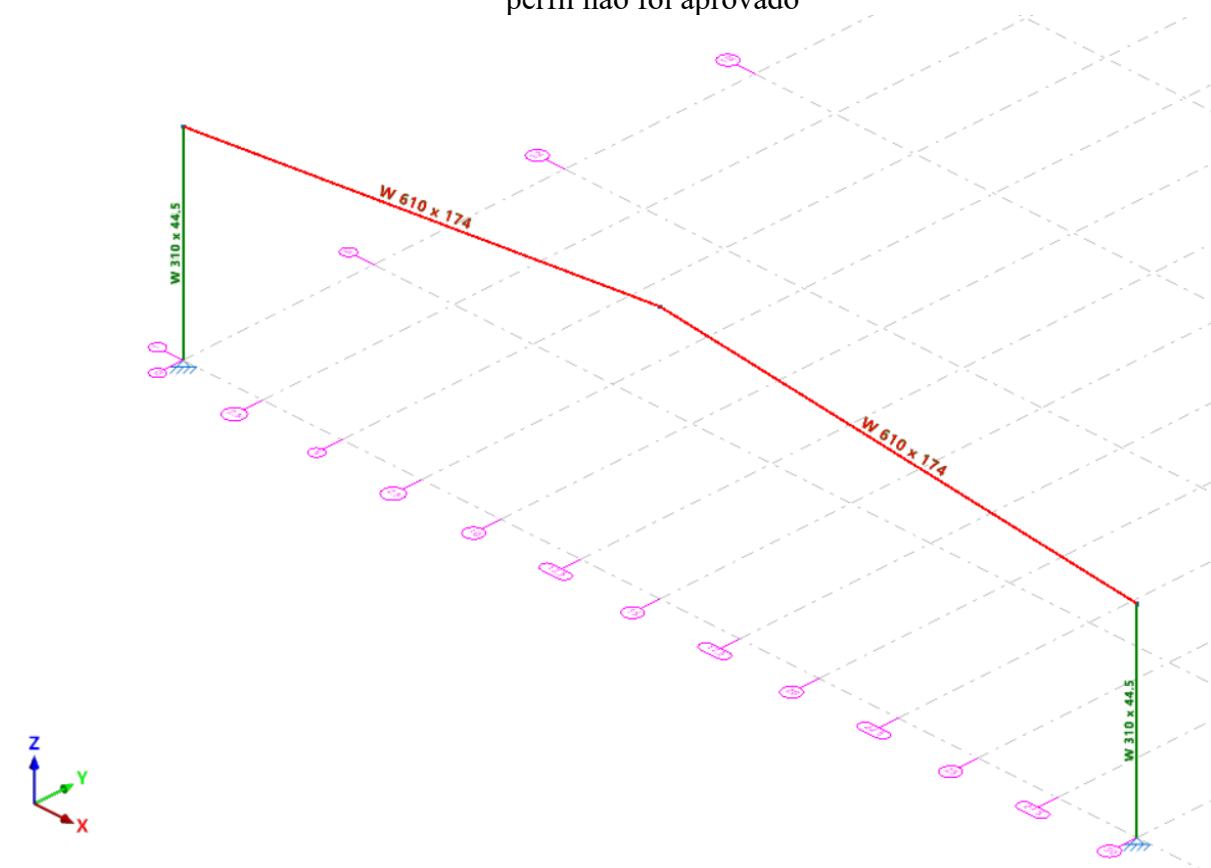
Este fato evidenciado na análise estrutural corrobora o fato defendido por Bellei (1998), o autor cita em sua obra “Edifícios Industriais de aço”: “coberturas de vigas de perfil

laminado em alma cheia podem ser economicamente viáveis até vãos de 25 metros”. (Bellei, 1998, p. 112).

Ademais, além do citado por Bellei (1998), que coberturas com vigas de perfil laminado em alma cheia em geral não são viáveis economicamente para vãos acima de 25 metros, foi atestado que um perfil grande como o W 610 174 não atendeu aos requisitos mínimos dispostos na Norma brasileira para estruturas metálicas. Fato este que comprova a experiência e a assertividade do autor ainda no ano de 1998.

A Figura 65 a seguir apresenta a esquematização do pórtico com detalhe para o perfil das vigas de cobertura em vermelho, indicando o não atendimento à ABNT NBR 8800:2024.

Figura 65 - Pórtico do galpão com vão de 30 metros e viga de alma cheia, destacando que o perfil não foi aprovado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, a Figura 66 apresenta a Tabela resumo de materiais considerando o perfil **W 610 174** para a cobertura. Apesar de esta solução estar desclassificada pelo não atendimento

aos requisitos da ABNT NBR 8800:2024, será realizada a comparação do peso dos pórticos para finalidade da análise comparativa de eficiência do peso da estrutura.

Figura 66 - Tabela resumo de materiais da configuração de vão de 30 metros e cobertura de viga de alma cheia

Tabela resumo												
Material		Série	Perfil	Comprimento			Volume			Peso		
Tipo	Designação			Perfil (m)	Série (m)	Material (m)	Perfil (m³)	Série (m³)	Material (m³)	Perfil (kg)	Série (kg)	Material (kg)
Aço laminado	A-572 345MPa	I	W 310 x 44.5	12.000			0.069			538.82		
			W 610 x 174	30.150			0.672			5273.11		
					42.150	42.150		0.740	0.740		5811.93	5811.93

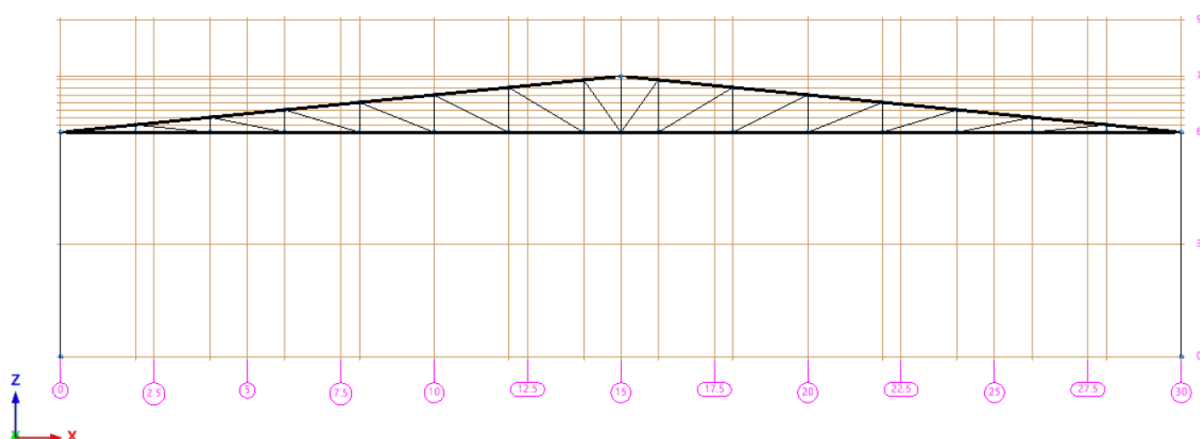
Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1.6 Vão de 30 metros e cobertura em treliça

Prosseguindo para a terceira e última configuração de galpão com a estrutura de cobertura em treliça, define-se primeiramente a geometria do pórtico, para esta configuração, são desenhadas as barras verticais que representam as colunas, com o espaçamento de acordo com a dimensão do vão (30 metros) e as barras e nós que representarão as tesouras da treliça. Os banzos superiores, assim como das demais configurações de 20 e 25 metros, devem respeitar a inclinação da água do telhado de 10% e o espaçamento das terças de 2 metros.

Na Figura 67 está a geometria no Cype3D do pórtico desta configuração com vão de 30 metros e estrutura de cobertura treliça.

Figura 67 - Geometria do galpão com vão de 30 metros e cobertura de treliça



Fonte: Elaborado pelo autor.

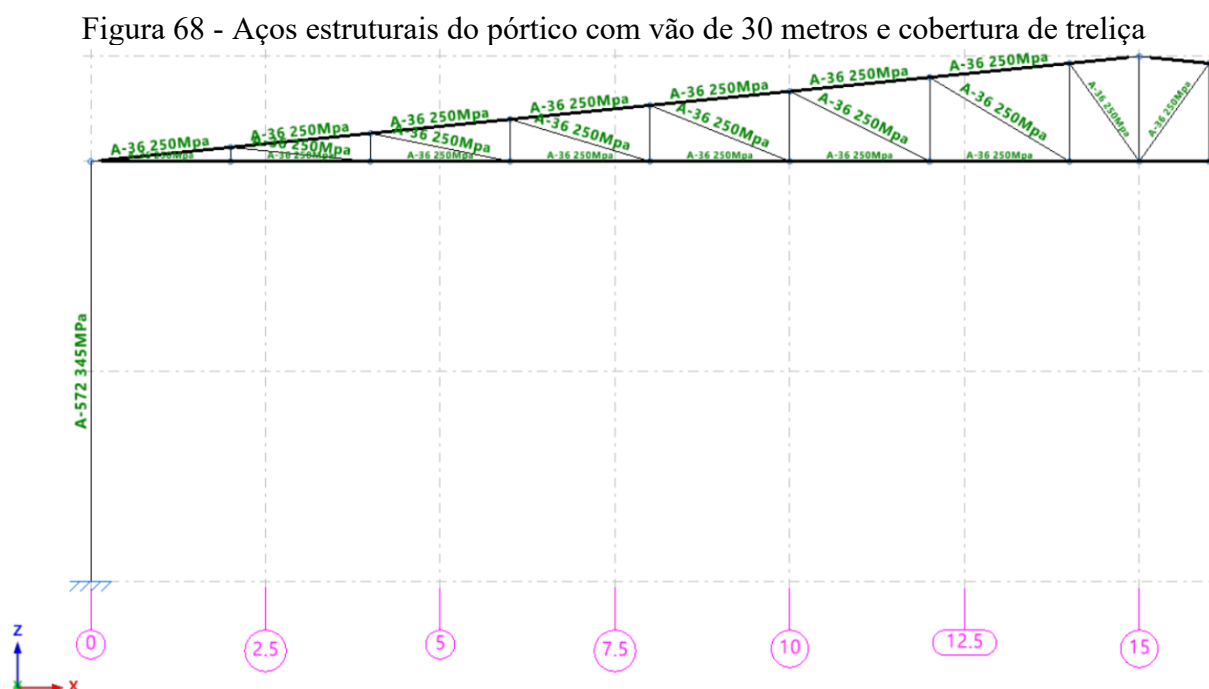
Assim, forma-se a treliça de Pratt para o vão de 30 metros. A treliça possui as seguintes características:

3. Altura da cumeeira e nó superior com a cota de 7,5 metros para atendimento à inclinação de 10%;
4. Espaçamento de 2 exatos 2 metros até a cumeeira, e depois espaçamento de 1 metro entre o último nó da tesoura e a montante central conforme apresentado na Figura 67.

Após definição da geometria dos pórticos, prossegue-se com as definições padrões para a configuração de pórtico com treliça no Cype3D, a saber:

3. Definição de aço ASTM A572 Gr. 50 para as colunas e ASTM A36 para os banzos superiores, banzos inferiores, diagonais e montantes;
4. Articulação nos nós da treliça e engastamento das colunas na base;

A Figura 68 a seguir indica a disposição do pórtico com os aços estruturais definidos e a articulação dos nós e base engastada.



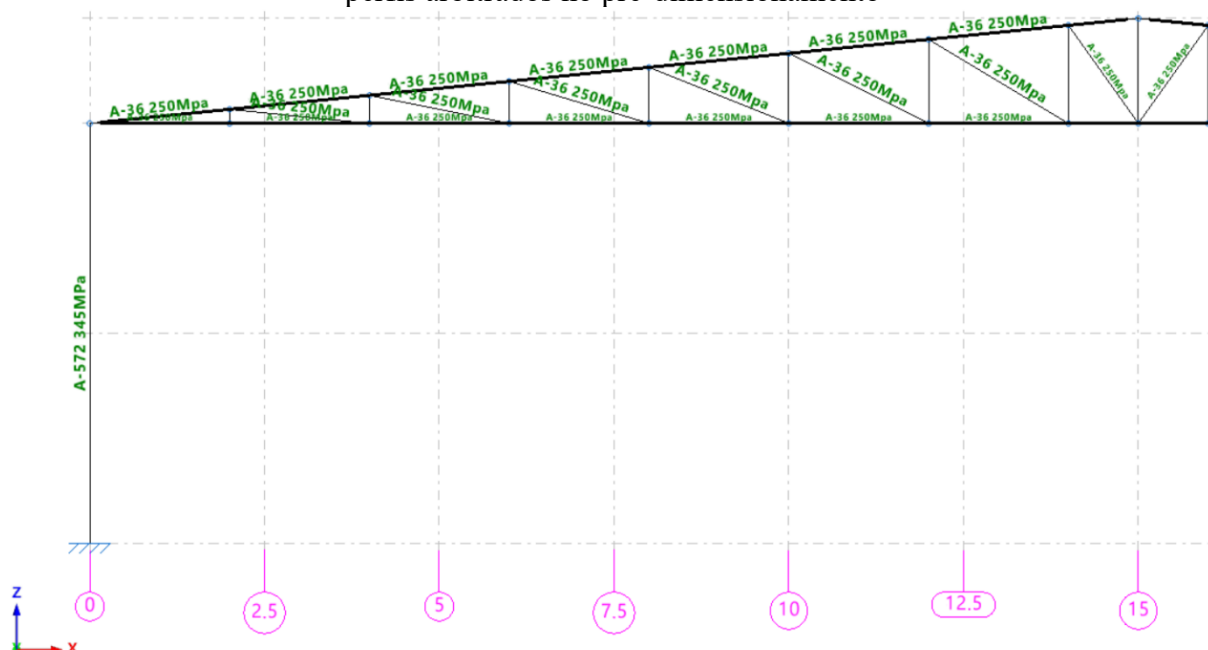
Fonte: Elaborado pelo autor.

Dando prosseguimento para a análise estrutural nesta última configuração de pórtico com treliça, após a realização de todas as etapas até então descritas, a próxima etapa que antecede a análise estrutural é a definição dos perfis do pré-dimensionamento. Para o pórtico do galpão com a configuração de 30 metros foi selecionado o mesmo perfil W da GERDAU que atendeu aos Estados Limites Último e de Serviço nas colunas nos pórticos treliçados de 20 e 25 metros, a saber, o perfil **W 310 44.5**. Será atribuído este perfil no pré-dimensionamento, ainda que se espere uma coluna de maiores dimensões para não ocorrer a flambagem em um vão de 30 metros.

Para os perfis das barras da treliça, será considerado um perfil intermediário entre os perfis U da GERDAU que foram determinados no processamento do software do pórtico de 25 metros, a acrescentar, também será um perfil acima do perfil utilizado no pré-dimensionamento do pórtico treliçado de 25 metros. Portanto, para atendimento aos dois critérios, será considerado no pré-dimensionamento o perfil **U 152.4 8.0**.

Na Figura 69 está apresentado o pórtico com os perfis do pré-dimensionamento para a análise estrutural.

Figura 69 - Esquemática do pórtico com vão de 30 metros e cobertura de treliça com os perfis arbitrados no pré-dimensionamento



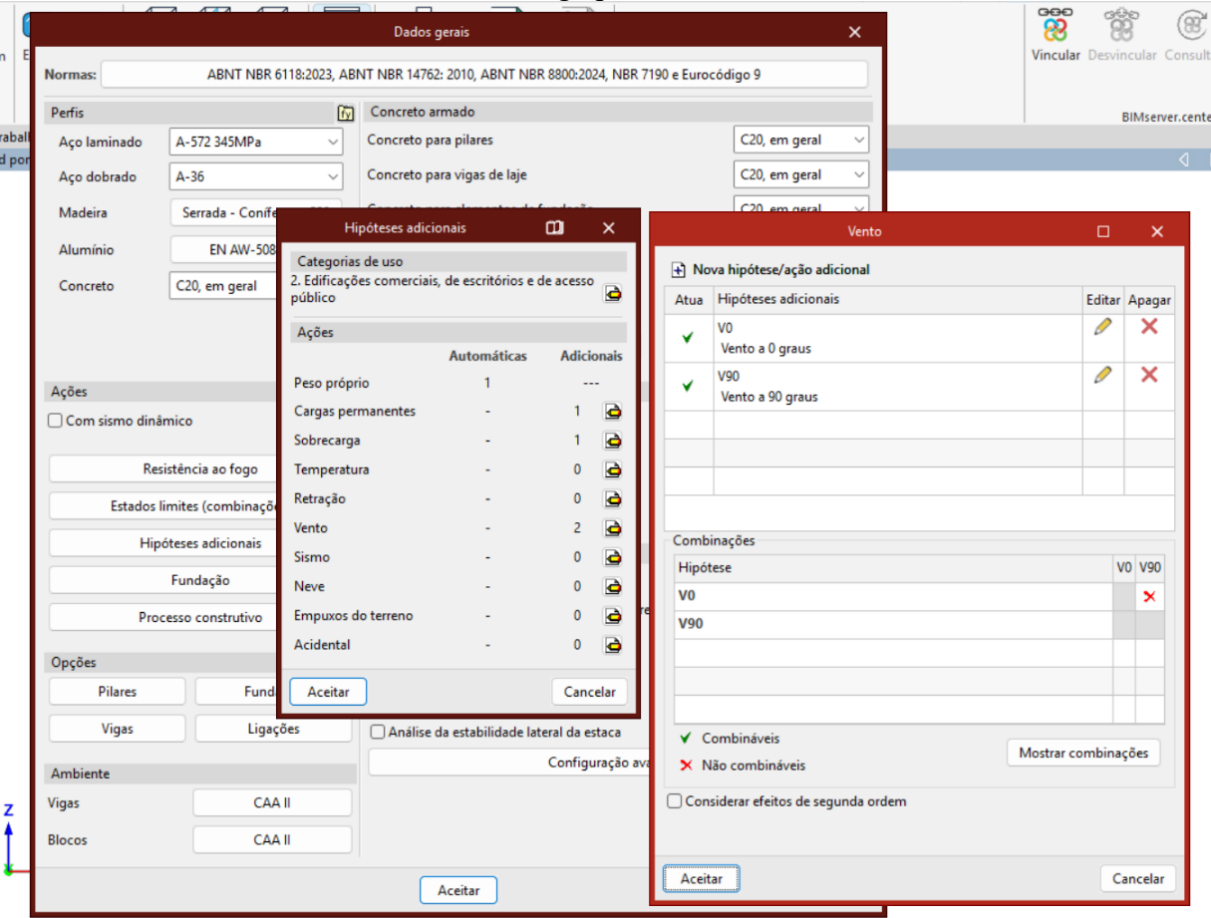
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a atribuição dos perfis do pré-dimensionamento, a última etapa que antecede a análise estrutural é a inserção das cargas categorizadas no Cype3D conforme o Quadro 10.

Com a inserção das cargas categorizadas, garante-se que o software irá fazer as verificações no ELU e ELS das combinações que mais solicitam a estrutura de acordo com a ABNT NBR 8800:2024.

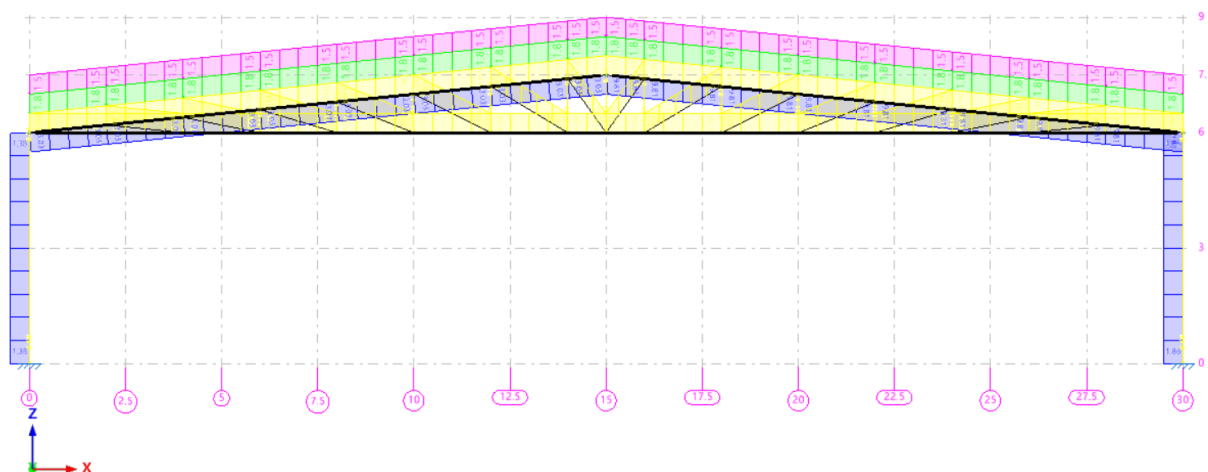
As Figuras 70 e 71 a seguir apresentam a categorização das cargas conforme as combinações da ABNT NBR 8800:2024 e a inserção das cargas determinadas no Capítulo 5 para prosseguimento na análise estrutural do pórtico.

Figura 70 - Categorização das cargas no CYPE3D comum a todas as configurações de galpões



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 71 - Inserção das cargas atuantes no pórtico com vão de 30 metros e cobertura de treliça



Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante de todos os passos citados anteriormente, prossegue-se para a análise estrutural para a verificação e dimensionamento da estrutura desta última configuração de pórtico objeto de estudo deste trabalho. Para ganho de eficiência no processo de análise estrutural, será considerado a opção de “Dimensionamento Ótimo” no Cype3D, com isto, o software utiliza seu poder de processamento para indicar o perfil mais leve possível que atenda a todos os requisitos da ABNT NBR 8800:2024, sendo este perfil pertencente as séries utilizadas no pré-dimensionamento. Portanto, o software irá indicar o menor perfil da série W da GERDAU para as colunas e o menor perfil da série U para as barras da treliça que atendem aos Estados Limites Último e de Serviço da norma.

Diante do exposto, a Figura 72 a seguir indica a esquematização do pórtico com os perfis finais validados pela análise estrutural no Cype3D para o pórtico com vão de 30 metros e estrutura de cobertura em treliça.

7 RESULTADOS E ANÁLISE COMPARATIVA

A partir do dimensionamento das 6 (seis) configurações de pórticos de galpões formados por vãos de 20, 25 e 30 metros e pelas estruturas de cobertura de viga de alma cheia x treliçada, será apresentado a seguir uma análise comparativa entre as duas soluções para cada vão proposto.

Os dimensionamentos da estrutura foram realizados através de modelagem computacional no software Cype3D conforme apresentado no Capítulo 6 e foram geradas as listas de materiais para análise comparativa. O software realizou a análise estrutural, incluindo a análise de efeitos de 2º ordem como dispõe a ABNT NBR 8800:2024.

A partir da ferramenta “Dimensionamento Ótimo” do software, não apenas a verificação dos perfis é realizada quanto ao atendimento aos Estados Limites Últimos (ELU) e de Serviço (ELS), mas também, o poder computacional do Cype3D é empregado nesta ferramenta para apontamento dos perfis mais leves que atendem a todos os requisitos da norma. O software aponta os perfis mais leves de mesma série do perfil inicial arbitrado no pré-dimensionamento, o que garantiu o emprego do Perfil de mesmo catálogo (W da GERDAU) em todas as configurações propostas, além do perfil U para as barras das treliças em todos os vãos, o que contribuiu para uma maior eficiência e confiabilidade na comparação.

Por fim, a lista de materiais foi gerada para cada uma das configurações analisadas para a finalidade de comparação do peso (Kg) e taxa de aço (Kg/m²) entre as duas soluções estruturais de cobertura, em cada um dos três vãos propostos. A Tabela 6 apresenta a síntese da análise comparativa.

Tabela 6 - Síntese da análise comparativa
Análise comparativa entre as duas soluções estruturais para coberturas de galpões industriais

Dimensão do vão (m)	Viga de alma cheia (kg)	Treliça Pratt (kg)	Taxa de aço viga de alma cheia (kg/m ²)	Taxa de aço treliça Pratt (kg/m ²)	Diferença (%)
20	3522,26	1906,23	29,35	15,89	45,88
25	4449,69	2246,85	29,66	14,98	49,51
30	5811,93	2824,66	32,29	15,69	51,40

Fonte: Elaborado pelo autor.

7.1 Vão de 20 metros

Para os galpões com vãos de 20 metros, as duas soluções de cobertura são eficientes e se mostraram tecnicamente viáveis, respeitando os Estados Limites Último e de Serviço. A diferença em favor do peso e taxa de aço da cobertura de treliça foi de 45,88%, apesar de ser uma diferença considerável, é a menor diferença absoluta entre os três vãos comparados.

Este resultado corrobora com o disposto por Bellei (1998), cujo autor cita em sua obra “Edifícios Industriais em Aço” que as coberturas de viga de alma cheia *podem* ser economicamente viáveis para vãos de até 25 metros. Para este vão de 20 metros, há situações em que a mão de obra simplificada de uma cobertura formada apenas por um perfil robusto como um Perfil W de Alma Cheia pode tornar esta solução vantajosa.

Porém, em comparação absoluta de peso de aço empregado, a partir dos resultados obtidos, a treliça possui uma vantagem significativa já partindo de dimensões de vãos com 20 metros.

7.2 Vão de 25 metros

Em um vão de 25 metros, a diferença (%) em peso e taxa de aço a favor da cobertura de treliça é ainda maior e se aproxima de 50% mais leve, resultado este que potencializa ainda mais o disposto por Bellei (1998) em sua obra “Edifícios Industriais em Aço”. Apesar de a solução de viga de alma cheia ter permanecido com uma taxa de aço abaixo de 30 kg/m², a treliça se mostra claramente a mais eficiente em peso para vãos a partir de 25 metros.

7.3 Vão de 30 metros

Um vão de 30 metros requer uma inércia muito considerável para que a barra não sofra flambagem, e esta dimensão de vão foi o limite para os perfis estruturais da série W da GERDAU, em que até mesmo o maior perfil do catálogo da fabricante, o Perfil **W 610 174** não foi capaz de resistir a esbeltez e flecha excessiva causada pela grande dimensão do vão, peso dos elementos, sobrecarga e ação do vento no qual um galpão industrial está sujeito.

Diante deste resultado, para um vão de 30 metros a maior eficiência observada é clara da treliça como solução estrutural de cobertura mais eficiente. Apesar de a viga de alma cheia não ter atendido aos requisitos da ABNT NBR 8800:2024, ainda assim foi determinado o peso e taxa de aço desta solução reprovada para finalidade comparativa, e a diferença seria de 51,4%

em favor da treliça, o que reforça ainda mais a eficiência da treliça para vãos de 30 metros em comparação a uma viga de perfil laminado.

Nesta amostragem, também se observou que quanto maior a dimensão do vão do pórtico dos galpões, mais a cobertura de treliça se torna eficiente (%) em consumo de aço em comparação a uma cobertura de viga de perfil de alma cheia.

8 CONCLUSÕES E APONTAMENTOS

Este trabalho teve como objetivo analisar comparativamente o comportamento estrutural e o consumo de aço entre duas soluções de coberturas de pórticos para galpões industriais, com amostragem em três dimensões distintas de vãos, em que se verificou uma maior eficiência nas coberturas de treliça em relação ao peso da estrutura (kg) e taxa de aço (kg/m^2). A complementar, esta eficiência da treliça aumenta na medida em que a dimensão do vão também aumenta, logo, verificou-se uma correlação linear positiva na amostragem dos vãos de 20, 25 e 30 metros.

É fato que a eficiência de uma obra deve ser analisada de maneira holística, isto é, deve ser analisado todos os fatores que influenciam na eficiência de custo e prazo de execução. Além dos materiais, há fatores como mão de obra, maquinários empregados, disponibilidade de fornecedores, e se tratando de construções em estruturas metálicas, também há um destaque relevante para a fabricação, transporte e montagem como dispõe Pinho (2008) no manual “Viabilidade Econômica” para construções em aço, do Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA).

O foco deste trabalho em analisar a eficiência do consumo de aço se torna relevante pela lógica da Curva ABC baseada no Princípio de Pareto, isto é, a diretriz de empregar esforços na análise dos componentes mais impactantes do custo de uma obra, e como sugere Bellei (1998), os materiais são a parcela mais representativa do custo global de uma obra.

Entretanto, os outros fatores não devem ser descartados e para trabalhos futuros, sugere-se fortalecer ou contrapor os resultados apresentados neste trabalho com uma análise de custos de mão de obra, fabricação, transporte e montagem de um galpão em estrutura metálica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.** Rio de Janeiro, 2024.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.** Rio de Janeiro, 2010.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14513: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.** Rio de Janeiro, 2010.

BELLEI, Ildony. H. **Edifícios industriais em aço: Projeto e cálculo.** 2 ed. São Paulo: Editora Pini, 1998.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos.** 7 ed. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 1996.

D'ALAMBERT, F. **Galpões em Pórticos com Perfis Estruturais Laminados.** 5 ed. Belo Horizonte: GERDAU Açominas, 2012.

FAKURY, R. H. et al. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto.** São Paulo: Pearson, 2016.

GERDAU. **Galpões em pórticos com perfis estruturais W.** [S.I.]: Gerdau, [s.d.]. Disponível em: <https://mais.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais/galpoes-em-porticos-com-perfis-estruturais-w>. Acesso em: 26 dez. 2025.

GERDAU. **Perfis estruturais W Gerdau**: informações técnicas e bitolas. [S.I.]: Gerdau, [s.d.]. Disponível em: <https://mais.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais/perfis-estruturais-w>. Acesso em: 26 dez. 2025.

GONÇALVES, R. M. et al. **Ação do vento nas edificações - teoria e exemplos**. 1. ed. São Paulo: EESC – USP, 2004.

KINGSPAN ISOESTE. **Catálogo de produtos**. [S.I.]: Kingspan Isoeste, 2025. Disponível em: [Kingspan-Isoeste-Catálogo-de-Produtos-PT-BR.pdf](#). Acesso em: 10 jan. 2026.

MIRANDA, E. CARDOSO, S. S. **Manual técnico de telhas de aço – coberturas e fechamentos**. São Paulo: Associação Brasileira da Construção metálica, 2022.

NETO, J. G. R. **Laboratório de Estruturas Metálicas: Notas de aula**. Goiás: Faculdade de Engenharia Civil/Pontifícia Universidade Católica de Goiás, s.d.

O CALCULISTA DE AÇO. **Tutorial de Ftool para Estruturas Metálicas em 1 hora**. YouTube, 02 fev. 2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=uPCA7GIgt-Q&list=WL&index=1&t=3s>. Acesso em: 05 jan. 2026.

OLIVEIRA, M. A. **Estruturas Metálicas: Notas de aula**. Goiás: Faculdade de Engenharia Civil/Pontifícia Universidade Católica de Goiás, s.d.

PFEIL, W; PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático segundo a NBR 8800:2008**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

PINHO, F. O. PENNA, F. **Viabilidade econômica**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia/Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2008.

PINHO, M. O. **Transporte e montagem**. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2018.

PRAVIA, DREHMER, JÚNIOR. **Galpões para usos gerais**. 4. ed. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2018.

PRAVIA, Z. M. C. **Uso fácil – ABNT NBR 8.800**. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro da Construção em Aço/Instituto Aço Brasil, 2022.

SILVA, R. E. R. **Projeto de galpão em estrutura metálica: consumo de aço em soluções com perfis laminados e conformados a frio**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2017.

SOUZA, A. S. C. **Dimensionamento de elementos e ligações em estruturas de aço**. São Paulo: EdUFSCar, 2021.

VASCONCELLOS, A. L. **Ligações em estruturas metálicas**. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro da Construção em Aço/Instituto Aço Brasil, 2020.