

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS –

CAMPUS GOIÂNIA

DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

SAMUEL BELÉM RIBEIRO

TÍTULO: ANÁLISE DE TRELIÇAS EM GALPÕES METÁLICOS COM USO DE
SOFTWARE COMERCIAL.

Goiânia

2021

R484a Ribeiro, Samuel Belém.

Análise de treliças em galpões metálicos com uso de software comercial / Samuel Belém Ribeiro. – Goiânia : Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2021.
85f. ; il.

Orientador: Prof. Dr. Elias Calixto Carrijo.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.
Inclui apêndices.

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631

Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

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: Samuel Belém Ribeiro

Matrícula: 20151011050250

Título do Trabalho: Análise de treliças em galpões metálicos com uso de software comercial

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ 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:

- 1 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;
- 2 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;

- 3) 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, 30/03/2021.

Local Data



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

SAMUEL BELÉM RIBEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil ao Departamento de Áreas Acadêmicas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – *Campus Goiânia*, na área de Estruturas Metálicas.

Orientador: Prof. Dr.; Elias Calixto Carrijo

Goiânia

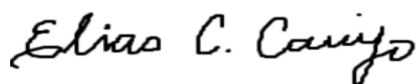
2021

SAMUEL BELÉM RIBEIRO

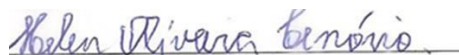
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado(a)
como requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro Civil ao Departamento de Áreas
Acadêmicas do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Goiás – *Campus Goiânia*,
na área de concentração de Estruturas Metálicas.

Aprovado(a) em 18 de Março de 2021.

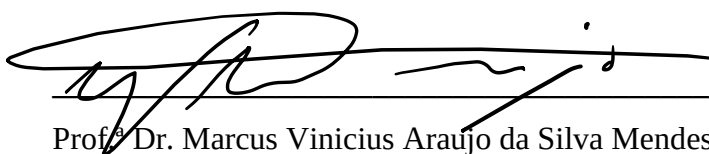
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Elias Calixto Carrijo
Instituto Federal de Goiás
Orientador



Prof.^a Me. Helen Oliveira Tenório
Instituto Federal de Goiás



Prof.^o Dr. Marcus Vinicius Araújo da Silva Mendes
Instituto Federal de Goiás

Dedico este trabalho a meus pais, irmãos e avós que não mediram esforços para me apoiar nas minhas escolhas, independente de qual fosse ela, durante essa longa e, às vezes, desgastante jornada em busca de conhecimento e títulos.

AGRADECIMENTOS

Primeiro agradeço a Deus por ter me dado a vida e a chance de ter nascido em uma família maravilhosa, que mesmo diante dos diversos problemas que nos acometeram, seguiu se forte e unida.

Agradeço a minha mãe por ter se empenhado e trabalhado duro, mesmo fora do país, para oferecer a mim, a meu irmão Jezrreel e a minha irmã Juliana uma vida melhor, mais pacata e com acesso a um ambiente social e uma educação melhor. Mesmo distante, nos provia de carinho, amor e ensinamentos, tornando o pilar central para construção do meu caráter e do que eu sou hoje.

Agradeço a meu pai, que mesmo sendo bruto e nervoso, sempre buscou conduzir eu e meus irmãos pelo caminho dos ensinamentos cristãos, nos ensinando a ter humildade, respeito, fraternidade e empatia. Também agradeço, por ter nos ensinado valores de sua profissão militar, como a de manter uma conduta ilibada, de possuir honra pessoal, cumprir responsabilidades e deveres.

Agradeço meus irmãos por terem me dado muito amor e carinho, além de muitos momentos de alegria.

Agradeço pela oportunidade de estagiar em empresas que me apresentaram uma realidade da vida na qual eu não estava acostumado. Onde pude ter contato com muitos problemas reais e notar meu despreparo para lidar com alguns deles. Isso, ao longo do tempo, me fez rever muitas das minhas atitudes e, conseqüentemente, me fez amadurecer e evoluir profissionalmente e pessoalmente.

Agradeço ao professor Elias Calixto pela dedicação, compreensão e por ter me aceitado como orientando.

“Educação é uma descoberta progressiva de nossa própria ignorância.”
(Voltaire)

RESUMO

Perante os diversos tipos de materiais e métodos construtivos utilizados na construção civil, o presente trabalho pautou em focar na utilização do aço. As estruturas metálicas vêm apresentando um grande crescimento como soluções econômicas e versáteis, principalmente, ligado a seu uso em galpões, seja para fins comerciais, industriais ou armazenamento de mercadorias.

Para escolher o modelo estrutural de galpão metálico mais vantajoso para a obra, faz-se necessário analisar o custo, a capacidade da edificação de resistir aos esforços e seu comportamento diante das solicitações externas. Para isso, buscou verificar e comparar o desempenho de um galpão metálico com treliça do tipo tesoura de Pratt com outro formado com treliça em arco de Pratt. Ambos os galpões terão as mesmas configurações geométricas referentes às suas dimensões, vão livre e componentes estruturais, apenas se diferenciando na geometria de suas coberturas.

O dimensionamento para as duas alternativas será feito utilizando o software CYPE 3D, que fornecerá o comportamento das estruturas diante das ações solicitantes, através do memorial de cálculo e imagens de deslocamento e estabilidade. Também serão seguidas as indicações normativas da ABNT NBR 6123, ABNT NBR 8800 e ABNT NBR 14762.

Verificado como cada estrutura se comporte diante das solicitações externas, posteriormente, será analisado qual tipologia apresenta melhor relação custo-benefício. Com o quantitativo de material gerado pelo CYPE 3D e o orçamento dos galpões realizado por meio da adoção do preço médio de cada componente estrutural em Goiânia.

Palavras-chave: Galpão Metálico - Estruturas Metálicas - Tesoura de Pratt - Treliça em arco de Pratt.

ABSTRACT

In view of the different types of materials and construction methods used in civil construction, the present work focused on the use of steel. Metal structures have been showing great growth as economical and versatile solutions, mainly linked to their use in warehouses, whether for commercial, industrial or goods storage purposes.

To choose the most advantageous structural model for the building, it is necessary to analyze the cost, the capacity of the building to resist efforts and its behavior in the face of external demands. To this end, it sought to verify and compare the performance of a metallic shed with Pratt's scissor truss with another formed with Pratt's arch truss. Both warehouses will have the same geometric configurations regarding their dimensions, free span and structural components, only differing in the geometry of their roofs.

The dimensioning for the two alternatives will be made using the CYPE 3D software, which will provide us with the behavior of the structures before the requesting actions, through the calculation memorial and displacement and stability images. Normative indications of ABNT NBR 6123, ABNT NBR 8800 and ABNT NBR 14762 will also be followed.

Having verified how each structure behaves in the face of external requests, we will start to check which typology has the best cost-benefit ratio. With the quantity of material generated by CYPE 3D and the budget of the warehouses realized through the adoption of the average price of each structural component in Goiânia.

Keywords: Metallic Shed - Metallic Structures - Pratt scissors - Pratt arch truss.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Treliça de Pratt	9
Figura 2: Treliça tipo Howe	10
Figura 3: Treliça de Warren	10
Figura 4: Treliça tipo Belga	11
Figura 5: Sistema de treliça espacial plana.	12
Figura 6: Treliça de quadrado sobre quadrado com defasagem de meio módulo.	12
Figura 7: Nó mero é conhecido por todo mundo, por ser muito útil para estruturas espaciais, cada nó pode ligar até 18 barras, elas ficam rosqueadas na esfera.....	13
Figura 8: Tipos de barras.	17
Figura 9: Tipos de perfis laminado. Símbolo (L) representa as cantoneiras. (U) perfil laminado.	18
Figura 10: Perfil tipo U enrijecido.	20
Figura 11: Gráfico Tensão x Deformação.	21
Figura 12: Diagrama Tensão x Deformação para perfil com tensões residuais.	22
Figura 13: Quando se comprime um material a seção ortogonal expande.	23
Figura 14: Métodos para aumentar a vida útil da estrutura	26
Figura 15: Posição dos Pilares.	27
Figura 16: Componente da estrutura superior de cada galpão	28
Figura 17: Estrutura lateral do galpão.....	29
Figura 18: Vista Galpão Completo.	30
Figura 19: Isopletas de velocidade básica (m/s).	33
Figura 20: Classes de rugosidade.....	34
Figura 21: Classes do fator S2	34
Figura 22: Parâmetros para cálculo de S2.....	35
Figura 23: Valores do fator estatístico S3.....	36
Figura 24: Valores de cpe.	38
Figura 25: Valores de cpe para o telhado.....	39
Figura 26: cpe para vento soprando perpendicularmente a geratriz da cobertura.	41
Figura 27: cp_e para vento paralelamente a geratriz da cobertura.	41
Figura 28: Coeficientes de pressão e carga sobre os galpões.	42

Figura 29: Deslocamento a serem considerados.....	45
Figura 30: Deslocamentos máximos.....	46
Figura 31: Coeficiente de flambagem a flexão para elementos isolados.....	47
Figura 32: Valores de coeficiente de flambagem e flecha limite.....	48
Figura 33: Tração nas diagonais da treliça em arco de Pratt. Os montantes foram retirados para melhor visualização dos diagramas.	58
Figura 34: Deformação da treliça devido a força de sucção.	59
Figura 35: Deformação da face frontal do galpão	60
Figura 36: Deformação da face posterior do galpão.....	61
Figura 37: Tração nos montantes do galpão com tesoura de Pratt. As diagonais foram retiradas para melhor visualização dos diagramas.....	62
Figura 38: Deformação da treliça devido a força de sucção.	63
Figura 39: Deformação da face frontal do galpão.	64
Figura 40: Deformação da face posterior do galpão.....	65
Figura 41: Compressão nos montantes do galpão em Arco de Pratt.	66
Figura 42: Compressão nas diagonais do galpão com treliça de Pratt.....	67
Figura 43: Compressão nos montantes do galpão com treliça de Pratt.	67
Figura 44: Flecha máxima para a treliça no galpão em arco de Pratt.	68
Figura 45: Flecha máxima das terças superiores no galpão em arco de Pratt.....	69
Figura 46: Deslocamento do topo dos pilares para o galpão em arco de Pratt.	69
Figura 47: Flecha máxima para a treliça no galpão com tesoura de Pratt.	70
Figura 48: Flecha máxima das terças superiores no galpão com tesoura de Pratt.....	70
Figura 49: Deslocamento do topo dos pilares para o galpão em treliça de Pratt.	71
Figura 50: Estrutura 3D do Galpão com treliça tesoura de Pratt.	79
Figura 51: Estrutura do telhado do Galpão com treliça tesoura de Pratt.	79
Figura 52: Estrutura Frontal do Galpão com treliça tesoura de Pratt	80
Figura 53: Estrutura tipo do Galpão com treliça tesoura de Pratt.....	81
Figura 54: Estrutura posterior do Galpão com treliça tesoura de Pratt.....	81
Figura 55: : Estrutura lateral do Galpão com treliça tesoura de Pratt.....	82
Figura 56: Estrutura 3D do Galpão com treliça em arco de Pratt.....	82
Figura 57: Estrutura do telhado do Galpão com treliça em arco de Pratt.	83
Figura 58: Estrutura Frontal do Galpão com treliça em arco de Pratt.	84
Figura 59: Estrutura tipo do Galpão com treliça em arco de Pratt.....	84
Figura 60: Estrutura posterior do Galpão com treliça em arco de Pratt.....	85

Figura 61: Estrutura lateral do Galpão com treliça em arco de Pratt.....85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Valores máximos de elementos residuais para o aço carbono.	14
Tabela 2: As propriedades que outros elementos conferem ao aço resumidas na tabela a seguir.	16
Tabela 3: Propriedades do aço.	23
Tabela 4: Resistencia a tração para galpão com tesoura tipo Pratt.	50
Tabela 5: Resistencia a tração para galpão com treliça em arco de Pratt.	51
Tabela 6: Relação entre o comprimento efetivo e a espessura para o galpão com tesoura tipo Pratt.	51
Tabela 7: Relação entre o comprimento efetivo e a espessura para o galpão com treliça em arco.	52
Tabela 8: Valores do comprimento índice de esbeltez para o galpão com tesoura tipo Pratt.....	52
Tabela 9: Valores do índice de esbeltez para o galpão com treliça em arco.	53
Tabela 10: Resistencia à compressão para galpão com tesoura tipo pratt.	54
Tabela 11: Resistencia à compressão para galpão com treliça em arco.	54
Tabela 12: Valores de flexão em relação ao eixo x e y do galpão com tesoura tipo Pratt para elementos formados a frio.....	56
Tabela 13: Valores de flexão em relação ao eixo x e y do galpão com treliça em arco para elementos formado a frio.	56
Tabela 14: Valores de flexão em relação ao eixo x e y do galpão com tesoura de Pratt para elementos não formados a frio.....	57
Tabela 15: Valores de flexão em relação ao eixo x e y do galpão com tesoura de Pratt para elementos não formados a frio.....	57
Tabela 16: Resumo de material para o galpão com tesoura de Pratt.	71
Tabela 17: Resumo de material para o galpão com arco de Pratt.	72
Tabela 18: Orçamento para o galpão com tesoura de Pratt na primeira loja.	72
Tabela 19: Orçamento para o galpão com arco de Pratt na primeira loja.....	73
Tabela 20: Orçamento para o galpão com treliça de Pratt na segunda loja.	73
Tabela 21: Orçamento para o galpão com arco de Pratt na segunda loja.	73
Tabela 22: Orçamento para o galpão com treliça de Pratt na terceira loja.	74
Tabela 23: Orçamento para o galpão com arco de Pratt na terceira loja.	74
Tabela 24: Custo médio do material para o galpão com tesoura de Pratt.....	75
Tabela 25: Custo médio do material para o galpão com arco de Pratt.	75

LISTA DE SÍMBOLOS

b – parâmetro meteorológico

b – largura da cantoneira

C_b – fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme.

f_y – limite de escoamento.

f_u – resistência à ruptura.

σ – tensão.

ε – deformação.

E – módulo de elasticidade.

ν – coeficiente de Poisson.

ρ – massa específica do aço.

b_f – largura de perfil metálico.

F_d – força; valor de ação.

V_0 – velocidade básica do vento.

$F_{G,k}$ – valores característicos das ações permanentes.

$F_{Q,k}$ – valor característico das ações variáveis.

γ_g – coeficiente de ponderação das ações permanentes.

γ_q – coeficiente de ponderação das ações variáveis.

Ψ_o – fator de combinação.

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

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

A_g – área bruta da seção transversal da barra.

A_e – área líquida efetiva da seção transversal da barra.

γ_{a1} – coeficiente de ponderação das resistências.

γ_{a2} – coeficientes de ponderação das resistências.

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

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

χ – fator de redução associado à resistência a compressão.

Q – fator de redução total associado à flambagem local.

q_k – pressão característica do vento.

M_{Sd} – momento fletor solicitante de cálculo.

M_{Rd} – momento fletor resistente de cálculo..

N_{Sd} – força axial solicitante de cálculo.

N_{Rd} – força axial resistente de cálculo.

$M_{x,Sd}$ – momento fletor solicitante de cálculo em relação ao eixo x da seção transversal.

$M_{y,Sd}$ – momento fletor solicitante de cálculo em relação ao eixo y da seção transversal.

$M_{x,Rd}$ – momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo x da seção transversal.

$M_{y,Rd}$ – momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo y da seção transversal.

L – vão livre do pórtico.

L_b – distância entre pontos travados.

H – altura do pilar.

c_{pi} – coeficiente de pressão interna.

c_{pe} – coeficiente de pressão externa.

S_1 - fator topográfico.

S_2 – fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno.

S_3 – fator estatístico.

p – parâmetro meteorológico.

W_u – módulo de resistência elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	5
1.1 OBJETIVOS	6
1.1.1 Objetivo Geral.....	6
1.1.2 Objetivos Específicos	6
1.2 METODOLOGIA	6
1.3 JUSTIFICATIVA	7
2 TIPOS DE TRELIÇAS	8
2.1 TRELIÇAS PLANAS	8
2.1.1 Treliza de Pratt	8
2.1.2 Treliza de Howe.....	9
2.1.3 Treliza de Warren.....	10
2.1.4 Treliza tipo Belga	10
2.2 TRELIÇA ESPACIAL.....	11
2.2.1 Malhas	12
2.2.2 Nós	13
3 TIPOS DE AÇOS ESTRUTURAIS	13
3.1 AÇOS-CARBONO	13
3.2 AÇO LIGA.....	14
3.3 AÇOS COM TRATAMENTO TÉRMICO	16
4 PRODUTOS ESTRUTURAIS.....	17
4.1 PRODUTOS SIDERÚRGICOS	17
4.1.1 Barras.....	17
4.1.2 Chapas.....	18
4.1.3 Perfis Laminados	18
4.2 PRODUTOS METALÚRGICOS	19
4.2.1 Perfis de chapas dobradas.....	19
4.2.2 Perfis Soldados e Perfis Compostos.....	20
5 PROPRIEDADES DOS AÇOS ESTRUTURAIS	20
5.1 DIAGRAMA TENSÃO – DEFORMAÇÃO.....	20
5.1.1 Tensões residuais.....	22
5.1.2 Coeficiente de Poisson (ν).....	22
5.1.3 Propriedades mecânicas gerais.....	23
5.1.3.1 Ductilidade.....	23
5.1.3.2 Fragilidade	24

5.1.3.3 Elasticidade	24
5.1.3.4 Plasticidade	24
5.1.3.5 Fadiga mecânica.....	24
5.1.3.6 Resistência à corrosão.....	25
6 MODELO ESTRUTURAL - GALPÃO METÁLICO	26
7 DIMENSIONAMENTO DOS GALPÕES.....	30
7.1 CARGAS ATUANTES NA ESTRUTURA.....	31
7.1.1 Ações Permanentes	31
7.1.2 Ações Variáveis	32
7.1.2.1 Força do Vento.....	32
7.1.2.2 Ações Excepcionais	43
7.2 COMBINAÇÃO DE AÇÕES.....	43
7.3 COMPRIMENTO DE FLAMBAGEM E DESLOCAMENTOS MÁXIMOS	45
7.4 RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES ESTRUTURAIS	49
7.4.1 Dimensionamento a Tração	50
7.4.2 Resistência à compressão	51
7.4.3 Resistência à flexão	55
8 ANÁLISE DE RESULTADOS	57
8.1 RESULTADOS À TRAÇÃO	58
8.1.1.1 Galpão em Arco de Pratt.....	58
8.1.1.2 Galpão em Treliça de Pratt	61
8.2 RESULTADOS À COMPRESSÃO	66
8.2.1.1 Galpão em Arco de Pratt.....	66
8.2.1.2 Galpão em Tesoura de Pratt.....	66
8.3 FLECHA MÁXIMA.....	68
8.3.1.1 Galpão em Arco de Pratt.....	68
8.3.1.2 Galpão em Tesoura de Pratt	69
8.3.2 Consumo de aço.....	71
9 CONCLUSÃO	76
10 REFERÊNCIAS.....	77
11 APÊNDICE A – PROJETO DO GALPÃO COM TESOURA DE PRATT	78
12 APÊNDICE B – PROJETO DO GALPÃO COM ARCO DE PRATT.	82

1 INTRODUÇÃO

A construção civil está em constante processo de mudança. Novos materiais e novas tecnologias surgem a cada dia propondo novas possibilidades de resolver questões de prazo e custo que surgem na elaboração de um projeto e na execução do mesmo. Dentre os diversos materiais que surgiram e que experimentaram um grande avanço técnico de fabricação e uso está o Aço.

O aço já era conhecido desde a antiguidade, porém, não estava disponível a preços competitivos por falta de um processo industrial de fabricação. De acordo com Bellei (2004), as primeiras obras em aço datam de 1750, quando se descobriu a maneira de produzi-lo industrialmente.

No Brasil a indústria siderúrgica foi implantada após a segunda guerra mundial, com a construção da Usina Presidente Vargas da CSN – Companhia Siderúrgica Nacional, em Volta Redonda, no estado do Rio de Janeiro. O parque industrial brasileiro dispõe atualmente de diversas usinas siderúrgicas, com capacidade de fabricar produtos para estruturas de grande porte, segundo Walter Pfeil (2009).

No mercado brasileiro da construção em aço, um dos segmentos com maior demanda é o de galpões. De acordo com Flávio D'alambert (2018), são utilizados tanto para simples armazenagem, como também, para a infraestrutura industrial. De um modo geral, esses galpões apresentam diferentes concepções estruturais, em razão do tipo de uso e da solução estrutural adotada pelo engenheiro no momento de concepção do projeto.

A escolha do modelo estrutural influencia diretamente o custo, prazo de execução, geração de resíduos e a capacidade da edificação de resistir e se comportar diante das solicitações permanentes e de uso. Conforme Walter Pfeil (2009), as estruturas metálicas adquiriram formas arrojadas e funcionais, constituindo verdadeiros trunfos da tecnologia.

O projetista de aço deve deter pleno conhecimento das particularidades de cada tipo de sistema estrutural em aço, sabendo as particularidades de cada tipologia adotada. O modelo de treliça deve ser escolhido levando em consideração diversos fatores entre eles a geometria do galpão, ou seja, suas dimensões como a largura, comprimento e altura, no qual influenciarão a disposição das peças estruturais e sua tipologia. Outra particularidade importante é como a estrutura se comporta diante das cargas que atuam nela. Para isso é importante verificar as deformações e deslocamentos dos componentes que resistem a esses esforços.

Uma das mais importantes indagações levantadas já no início do projeto estrutural é qual modelo de treliça será utilizada. A grande diversidade de modelos estruturais disponíveis, aliada

a falta de informação sobre o comportamento destas diferentes tipologias em serviço, aumenta a chance de o profissional adotar modelos impróprios para as solicitações exigidas, muitas vezes projetando estruturas inviáveis economicamente e com eficiência estrutural prejudicada.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Dimensionar e analisar galpões metálicos comerciais de dimensões 30x20x6m formados por treliças do tipo tesoura e arco treliçado de Pratt, verificando como cada estrutura se comporta diante das solicitações externas e qual treliça apresenta melhor relação custo-benefício para a concepção adotada.

1.1.2 Objetivos Específicos

Visando alcançar o objetivo geral, alguns objetivos específicos serão desenvolvidos:

1. Verificar a influência dos esforços permanentes e do vento sobre o comportamento da estrutura.
2. Analisar o comportamento espacial de cada tipo de treliça devido aos esforços de tração, compressão e flexão.
3. Comparar os custos entre cada treliça.

1.2 METODOLOGIA

Para a definição do projeto geométrico da estrutura, foi desenvolvido dois galpões metálicos para fim comercial de dimensões 30x20x6m (comprimento x largura x altura), cada galpão será formado por um tipo de treliça. As treliças utilizadas serão do tipo tesoura e arco treliçado de Pratt.

Para manter as mesmas configurações geométricas nos dois projetos será adotado características semelhantes em ambos. Os galpões terão uma abertura frontal de dimensões 4x4,5m (largura x altura), que será a porta de entrada do estabelecimento. As terças do telhado estarão distanciadas em 2 metros uma da outra. As treliças, unidas aos pilares laterais, estarão

espaçadas com 5 metros de distância entre elas, os pilares da parte frontal e posterior em 4 metros. A aparência espacial pode ser observada na figura 18 do presente trabalho.

Definido o projeto geométrico, o dimensionamento da estrutura será realizado através de consultas às Normas Brasileiras ABNT NBR 8800:2008, ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6123:1988, com o cálculo da força de vento e a verificação do estado limite último e de serviço dos componentes estruturais, juntamente com a verificação de flecha e flambagem. A modelagem e dimensionamento da estrutura será executada utilizando o Cype 3D, software destinado ao projeto de estrutura metálica.

Nesse sentido, o estudo abrangerá dois diferentes tipos de galpões onde será analisado quantitativamente os materiais utilizados na construção de cada modelo, com o intuito de demonstrar a diferença orçamentária entre eles e o seu comportamento diante das solicitações. Será abordado o comportamento estrutural diante das solicitações externas e a capacidade de resistência que cada tipologia estrutural apresenta. Afim, de evidenciar o comportamento dos componentes das treliças mediante os esforços de tração, compressão e flexão.

O CYPE 3D, também conhecido como Metálicas 3D, é um software para cálculo estrutural e dimensionamento de elementos estruturais, com ênfase no dimensionamento de estruturas metálicas. A partir dele será possível demonstrar de forma gráfica o comportamento das peças que formam a estrutura, possibilitando visualizar a deformação, deslocamento e envoltórias máximas da associação das cargas atuantes.

O software também contribuirá no levantamento dos materiais necessários para a execução de cada galpão, já que ele disponibiliza a lista de materiais necessários para a construção.

Com a lista de materiais para cada modelo de galpão em mãos, o orçamento será realizado através do preço médio dos produtos entre três lojas de materiais de construção de Goiânia.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os diversos modelos de treliças disponíveis no mercado de galpões metálicos associada a falta de conhecimento técnico sobre o comportamento estrutural de cada tipo leva a uma incerteza na elaboração do projeto, que pode causar a escolha de um modelo economicamente inviável ou com eficiência estrutural reduzida.

Fonseca (2007) reforça que a ideia de encontrar o melhor tipo de treliça por tentativa e erro é praticamente impossível. O cenário atual da engenharia é de extrema competitividade e, para

um profissional obter vantagem no mercado, é necessário que seus projetos cumpram os requisitos de desempenho e segurança com um custo menor que os concorrentes, buscando-se uma maior eficiência das estruturas. No caso das treliças, que são estruturas de execução fácil e rápida, o custo mais baixo será em função do menor peso da estrutura, proporcionado por um menor consumo de material

Portanto, o trabalho pautou em analisar 2 modelos de galpões de mesma dimensão, mas formado por treliças distintas, que mediante as particularidades de cada tipologia adotada, será analisado a estabilidade estrutural, influência das cargas sobre a estrutura e seu comportamento através do estudo das deformações e deslocamentos das peças.

Assim, o intuito é evidenciar qual modelo de galpão apresentou melhor relação custo-benefício com a mesma configuração geométrica e de solicitações.

2 TIPOS DE TRELIÇAS

A treliça é uma estrutura formada por elementos rígidos que são dispostos com o intuito de formar repetidos triângulos, devido possuírem essa característica geométrica, também é chamada de sistemas triangulares.

Os elementos rígidos são ligados entre si por articulações como rebites, parafusos ou soldas. No cálculo estrutural considera que o ponto de ligação entre uma barra e outra se comporta como um nó rotulado perfeito e que as forças são aplicadas apenas sobre esses nós.

Como a força é apenas aplicada nesses nós, somente são transmitidos esforços de tração ou compressão, não havendo nenhuma transmissão de momento fletor entre um elemento e outro. Para uma mesma situação de vão e carregamento, há inúmeras formas de se dispor as barras na treliça de forma eficaz, e o projetista o fará baseado em sua habilidade, experiência e intuição.

2.1 TRELIÇAS PLANAS

As treliças que são construídas em apenas uma direção do plano, são chamadas de treliças planas. Essas treliças tem sua utilização na pratica observada em pontes, viadutos, coberturas, guindastes, torres, etc.

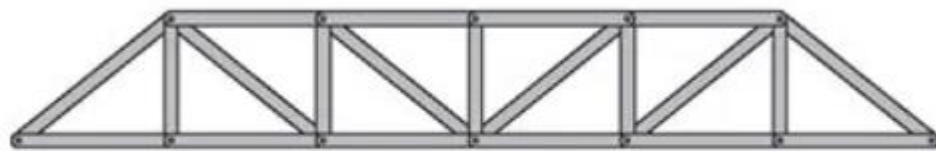
2.1.1 Treliça de Pratt

A treliça Pratt tem como característica ter os elementos verticais perpendicular aos banzos e os elementos diagonais apontando para centro do vão. Normalmente, todos os elementos diagonais estão sujeitos somente à tração, enquanto os elementos verticais suportam as forças de compressão, exceto o montante central, que não suporta nenhuma carga.

Devido os elementos diagonais estarem sujeitos a tração isto contribui para que eles possam ser delgados, fazendo com que o projeto fique mais barato.

O banzo superior resiste a esforços de compressão e os banzo inferiores a tração.

Figura 1 Treliça de Pratt



(c) Pratt Truss

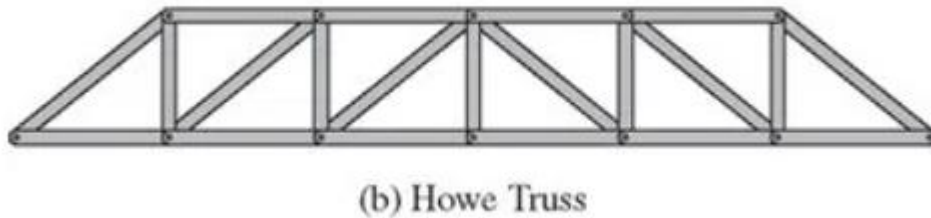
Fonte: Disponível em: Estructuras articuladas, (trusses) (elrincondelingenero.com).

2.1.2 Treliça de Howe

A treliça de Howe apresenta os montantes perpendicular aos banzos e as diagonais apontando para a direção contrária do centro. Por causa dessa disposição dos elementos, os montantes suportam esforços de tração e as diagonais de compressão, ou seja, o contrário da treliça de Pratt.

O banzo superior resiste a esforços de compressão e os banzo inferiores a tração.

Figura 2: Treliça tipo Howe



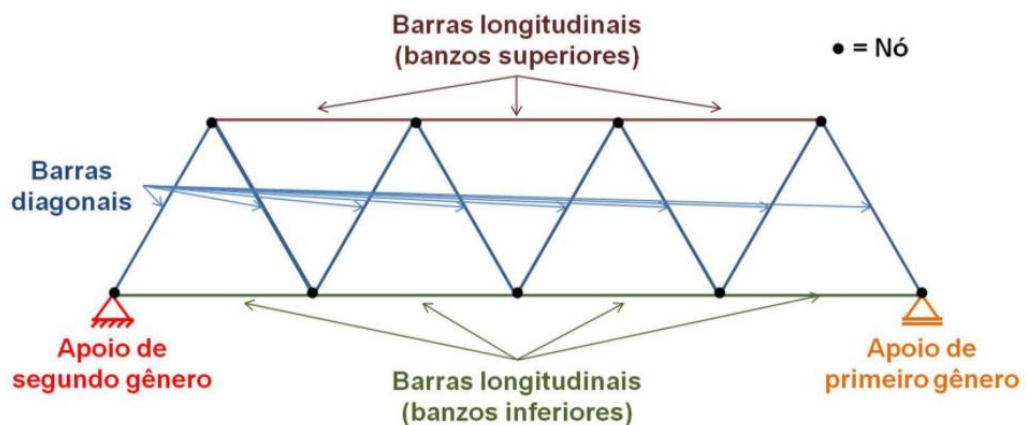
Fonte: Disponível em: Estructuras articuladas, (trusses) (elrincondelingeniero.com).

2.1.3 Treliça de Warren

A treliça de Warren contém apenas banzos e diagonais na sua estrutura. As diagonais que apontam para o centro do vão resistem a esforços de tração e as que apontam para a direção contrária ao centro, resistem a esforços de compressão.

O banzo superior resiste a esforços de compressão e os banzo inferior a tração.

Figura 3: Treliça de Warren



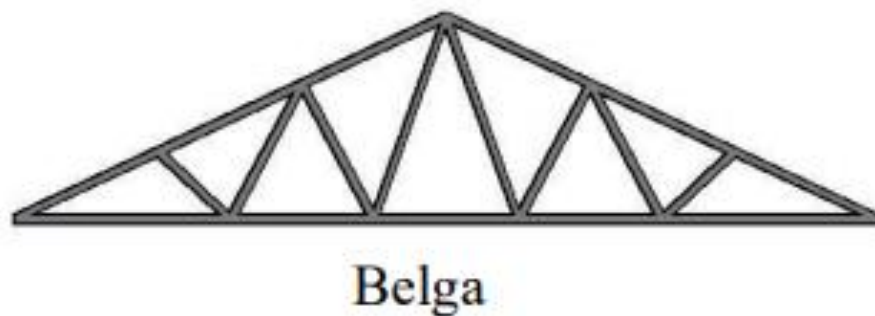
Fonte: Disponível em: A simple triangular trusses structure model for statics teaching (scielo.br).

2.1.4 Treliça tipo Belga

A treliça tipo Belga possui formato semelhante a de uma tesoura, mas com diagonais em seu interior. As diagonais que apontam para o centro do vão resistem a esforços de compressão e as que apontam na direção contrária a esforços de tração.

O banzo superior resiste a esforços de compressão e os banzo inferiores a tração.

Figura 4: Treliça tipo Belga



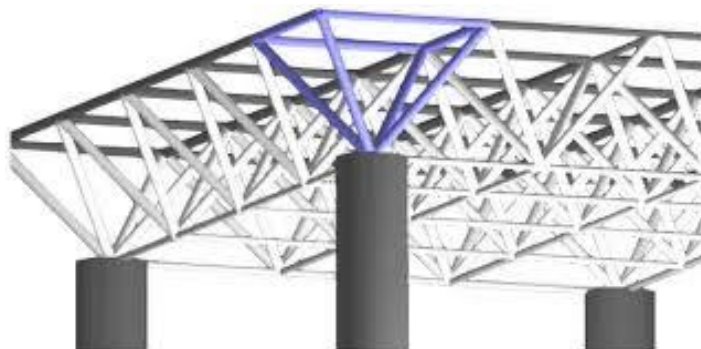
Fonte: Disponível em: franciscoalvino.pdf (ufcg.edu.br)

2.2 TRELIÇA ESPACIAL

O Prof. Makowski, um dos grandes pesquisadores desta estrutura, define treliça espacial como um sistema estrutural que não existe subsistemas planos principais. Diferente das treliças planas, que são construídas em apenas uma direção do plano, as treliças espaciais utilizam a forma básica do triângulo para criar um sistema tridimensional.

As barras ligam entre si através de nós e suportam apenas cargas axiais. Devido os componentes triangulares da treliça estarem dispostos de forma não complanar, faz com que se um membro atinge a capacidade máxima, os demais suportam as cargas adicionais, fazendo com que o sistema funcione de maneira integrada.

Figura 5: Sistema de treliça espacial plana.



Fonte: Tese: Análise Não Linear de Treliças Espaciais.

2.2.1 Malhas

Existe diversas formas de disposição dos sistemas triangulares no espaço e o arranjo escolhido desses elementos tem influência em como os esforços são suportados e distribuídos pela estrutura.

A forma escolhida de arranjo dos conjuntos triangulares dá-se o nome de malha. A disposição mais utilizada para os elementos de duas camadas são os arranjos quadrado sobre quadrado com defasagem de meio módulo.

Figura 6: Treliça de quadrado sobre quadrado com defasagem de meio módulo.



Fonte: Treliças Espaciais – Aspectos Gerais, Comportamento Estrutural e Informações para Projetos.

2.2.2 Nós

O ponto de ligação entre as barras é chamado de nó. No cálculo estrutural considera esses pontos como rotulas do sistema, não permitindo a passagem de momento de uma barra para outra, apenas permitindo a transmissão de esforços axiais.

Figura 7: Nó mero é conhecido por todo mundo, por ser muito útil para estruturas espaciais, cada nó pode ligar até 18 barras, elas ficam rosqueadas na esfera



Fonte: imagem disponível em <engenheirosescritores.blogspot.com>.

3 TIPOS DE AÇOS ESTRUTURAIS

Segundo a classificação química, os aços utilizados em estruturas metálicas podem ser divididos em dois tipos: aços carbono e aços de baixa ligam.

3.1 AÇOS-CARBONO

A maior quantidade de aço consumida pertence a esta categoria. Isso se deve ao fato de possuir custo acessível, oferecendo diversos tipos de aplicação e resistência. São chamados de aço-carbono todos os produtos derivados da junção entre ferro e carbono, com teores prefixados de carbono e outros elementos residuais controlados. Os teores de elementos residuais devem respeitar os valores máximos abaixo:

Tabela 1: Valores máximos de elementos residuais para o aço carbono.

Elemento	Quantidade máxima (%)
Silício	0,60
Manganês	1,65
Cromo	0,20
Níquel	0,25
Molibdênio	0,006
Alumínio	0,10
Boro	0,0007
Cobre	0,35

Fonte: ABNT NBR 6215.

A quantidade de carbono no aço define a classificação de aço-carbono em: baixo, médio e alto carbono.

O aço baixo carbono possui teor nominal de carbono maior que 0,02 % e menor que 0,25 %. Como o carbono é um produto importante para dar resistência ao aço e este se apresenta em pequenas proporções nesse tipo, isso induz a uma baixa resistência e dureza, mas alta tenacidade e ductilidade. Esse aço é facilmente usinável e soldável e apresentam baixo custo de produção.

O aço médio carbono possui teor de carbono variando entre 0,25 % e 0,60 %. É um dos mais utilizados por apresentar equilíbrio entre resistência e ductilidade.

O aço alto carbono contém teor de carbono superior a 0,60 %. Devido ter grandes quantidades do elemento carbono possui grande resistência, porém baixa ductilidade. A menor ductilidade poderá conduzir a problemas de soldagem, segundo Walter Pfeil:

O aumento de teor de carbono eleva a resistência do aço, porém diminui a sua ductilidade (capacidade de se deformar), o que conduz a problemas na soldagem.

Em estruturas usuais de aço, utilizam-se aços com baixo teor de carbono, que podem ser soldados sem precauções especiais. (Pfeil, Walter, 2009, p. 10)

3.2 AÇO LIGA

Os aços que contêm algum elemento com proporções significativas, além do ferro e carbono, são chamados de aços-liga. Esses elementos tem a finalidade de conferir propriedades desejadas e superiores as estabelecidas pelo aço carbono. Entre essas propriedades podemos citar resistência a corrosão, diminuição do peso específico, aumento da resistência mecânica e resistência ao fogo.

Os elementos comumente utilizados são o manganês, níquel, cromo, molibdênio, vanádio, tungstênio e silício. Sua quantidade na composição do aço dependerá da propriedade que almeja alcançar.

Os aços liga são divididos de acordo com o teor desses elementos em aços de baixa, média e alta liga.

Os aços de baixa liga apresentam teor de elementos de liga inferior a 2,0 %. Estes aços são os mais consumidos nessa categoria e os elementos de liga típico são o cromo, molibdênio, níquel, manganês e silício.

Os aços de alto liga contém teor de elementos de liga superiores a 10 %. Nesse caso as propriedades do aço são profundamente alteradas, ganhando características similares ao do elemento adicionado.

Os aços de média liga pode ser considerado como constituindo um grupo intermediário entre os dois anteriores.

As propriedades que os elementos adicionados conferem ao aço podem ser descritos a seguir: O cromo é conveniente para aumentar a temperabilidade e aumentar a dureza do aço. Em teores acima de 1% melhora a resistência dos aços a corrosão atmosférica, mas diminui a tenacidade e soldabilidade.

O boro possui capacidade de reduzir o envelhecimento do aço, reduzindo o volume de nitrogênio livre, além de melhorar a queção mecânica (facilidade em modelar o material) e diminuir as tendências de trincas na têmpera do aço (tratamento térmico para aumentar a dureza a resistência).

O níquel é útil na produção de aços inoxidáveis e melhora a ductilidade, soldabilidade e tenacidade a baixas temperaturas.

O silício aumenta o limite de escoamento assim como a resistência, servindo como um elemento endurecedor. Porém, como elemento endurecedor prejudica o alongamento, a tenacidade e a condutividade térmica.

As propriedades que outros elementos conferem aço foram resumidas na tabela a seguir:

Tabela 2: As propriedades que outros elementos conferem ao aço resumidas.

Elemento de liga	Influências nas propriedades
Manganês	Aumento da resistência mecânica e temperabilidade da peça. Resistência ao choque.
Molibdênio	Alta dureza ao rubro. Aumento de resistência à tração. Aumento de temperabilidade.
Vanádio	Resistência à fadiga e à abrasão
Tungstênio	Aumento da dureza. Aumento da resistência a altas temperaturas
Cobalto	Aumento da dureza. Resistência à tração. Resistência à corrosão e à erosão.

Fonte: Melhorando as propriedades dos aços.¹

3.3 AÇOS COM TRATAMENTO TÉRMICO

Existem três possibilidades para melhorar a resistência mecânica dos aços: submeter o material ao processo de conformação mecânica, como a prensagem e a laminação; acrescentar elementos de liga que adicionam propriedades desejáveis ao aço ou trata-lo termicamente, submetendo – o ao aquecimento e resfriamento controlado.

O objetivo do tratamento térmico é conduzir a estrutura do aço a uma fase em que ela obtém a melhor configuração possível de seus cristais. Para isso, é necessário expor o aço a altas temperaturas por um tempo controlado, até que seus cristais cheguem ao melhor arranjo e posteriormente, resfria-lo para que o arranjo formado permaneça na estrutura cristalizada.

Através desse processo é possível aumentar o desempenho em relação a resistência mecânica, como também, remover gases, remover tensões internas e produzir uma microestrutura definida.

¹ Tabela retirada em partes. Disponível em: < https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/7/7d/Aula_06.pdf>
 .Página 72 e 73. Acesso em 04 de fevereiro de 2020

Porém, nem todo tratamento térmico é intencional, existem tratamentos térmicos oriundos do processo de fabricação e de uso, que podem conferir ao material características indesejadas. Como exemplo, podemos citar a operação de soldagem de estruturas em aço, no qual pode afetar a tenacidade local do elemento. Com isso, pode esgotar a capacidade de deformação plástica no local em que foi aplicado a solda, tornando-o frágil.

Os aços carbono e os de baixa liga podem sofrer o processo de tratamento térmico para melhorar suas características, entretanto a soldagem de aços tratados é mais difícil.

4 PRODUTOS ESTRUTURAIS

Para as construções de estruturas metálicas existem duas diferentes categorias de produtos, os produtos siderúrgicos e metalúrgicos. No primeiro tipo é produzido produto base como perfis, chapas e barras, que ganham forma através do processo de laminação. Já o segundo tipo, os produtos bases, oriundos da siderurgia, são processados por meio da dobra e solda, originando novos formatos de perfis metálicos.

4.1 PRODUTOS SIDERÚRGICOS

Nas siderúrgicas é produzido o ferro e o aço. Por meio do processo de laminação, que consiste na passagem forçada do metal através de bobinas, formando as barras, chapas e perfis.

4.1.1 Barras

As barras são produtos que possuem uma de suas dimensões (comprimento) muito maior que as outras duas. Podem possuir formato circular, quadrado ou retangular. São, comumente, utilizadas como tirantes na estrutura de contraventamento de galpões metálicos.

Figura 8: Tipos de barras.



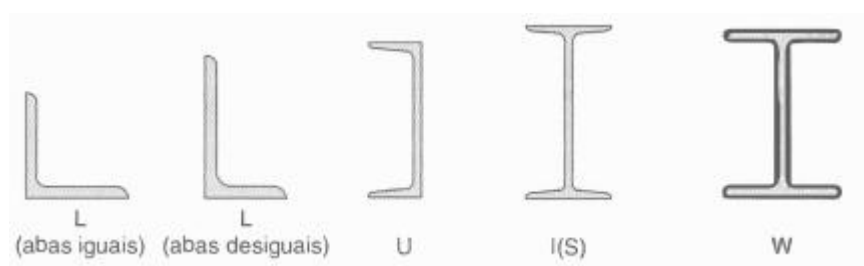
4.1.2 Chapas

As chapas configuram como tendo a espessura menor que as outras duas dimensões. São utilizadas como material de vedação em telhados e paredes. Na metalurgia é dobrada e transformada em diversos perfis estruturais.

4.1.3 Perfis Laminados

Os perfis laminados apresentam diferentes formatos e uma ampla aplicabilidade na construção civil. São produzidos no formato U, T, I, H e W.

Figura 9: Tipos de perfis laminado. Símbolo (L) representa as cantoneiras. (U) perfil laminado.



Fonte: Estruturas de aço, 8ª edição, página 20.

As cantoneiras são perfis formados por duas abas. Essas abas podem ter as mesmas dimensões (cantoneira de abas iguais) ou ter ambas com tamanhos diferentes (cantoneira de abas desiguais). Tem a característica de ser leve e permitem certa flexibilidade. São utilizadas principalmente para compor banzos de treliças e tesouras, diagonais de treliças e tesouras, contraventamentos e correntes.

Os perfis laminados tipo U são ideais para aplicações que exijam maior resistência e robustez. São utilizados em vigas de cobertura, travamento de vigas e sustentação de pisos. Podem ser utilizados como peças de perfis compostos, conjugando dois perfis U, um de costas para o outro, formando um perfil I composto.

O perfil I possui as mesas de faces internas inclinadas. Por possuir o formato de um I, contribui para o aumento da inércia, resistência e redução do peso. É utilizado em locais que se necessita uma peça resistente a compressão e a flexão, por isso é empregada como pilar ou viga.

O perfil W possui abas paralelas e pode ocasionar ligações, encaixes e acabamento mais precisos na construção. Assim como o perfil tipo I, também é indicado para locais que necessitem de uma peça bastante resistente a compressão e flexão.

4.2 PRODUTOS METALÚRGICOS

Os materiais oriundos da siderurgia como as chapas e perfis podem passar por processos de dobragem ou união com o intuito de formar novos elementos estruturais.

4.2.1 Perfis de chapas dobradas

Esses perfis são produzidos por meio da deformação proposital e controlado das chapas de aço. Essas chapas são prensadas em um equipamento especial como prensas, perfiladeiras ou dobradeiras que dão a ela a forma desejada. Com o intuito de impedir a formação de fissuras durante o processo de dobragem, os raios de dobragem do equipamento são limitados a certos valores mínimos.

Os produtos gerados são resistentes e os perfis dobrados se apresentam como a melhor solução para adequar o material ao projeto. Existe uma grande variedade de perfis que podem ser fabricados, no qual podem possuir um ou muitos eixos de simetria, ou em casos mais complexos possuir nenhum.

Entre os perfis de chapa dobrada mais utilizados está o perfil U enrijecido. O qual possui características de ser de fácil produção e ter ótima eficiência estrutural, obtida por meio de sua geometria.

Figura 10: Perfil tipo U enrijecido.



Fonte: RDG Aços do Brasil²

4.2.2 Perfis Soldados e Perfis Compostos

Esses perfis surgirão para suprir necessidades específicas dos projetistas em determinados projetos. São formados pela associação de perfis laminados simples ou chapas. Esses elementos são soldados ou aparafusados originando um produto com uma nova geometria e aspectos mecânicos melhorados. No entanto, seu custo de produção é maior se comparado aos outros tipos de perfis metálicos.

A NBR 5884:1980 padronizou três séries de perfis soldados.

Perfil CS - possui coluna soldada.

Perfil VS - contém a viga soldada.

Série CVS – coluna e viga soldada.

5 PROPRIEDADES DOS AÇOS ESTRUTURAIS

5.1 DIAGRAMA TENSÃO – DEFORMAÇÃO

Uma barra metálica submetida a um esforço crescente de tração sofre deformação linear até determinada tensão. Se continuarmos com o aumento da força aplicada, a barra começa a se comportar em regime plástico.

² Disponível em: < <https://www.rdgacosdobrasil.com.br/produto/perfil-u-simples-e-enrijecido-udc-dobrado-de-chapa/>>. Acessado em: 04 de Março de 2020

A relação entre a tensão aplicada (σ) e o alongamento unitário (ε) do material no estado de deformação linear é conhecido como módulo de Young (E).

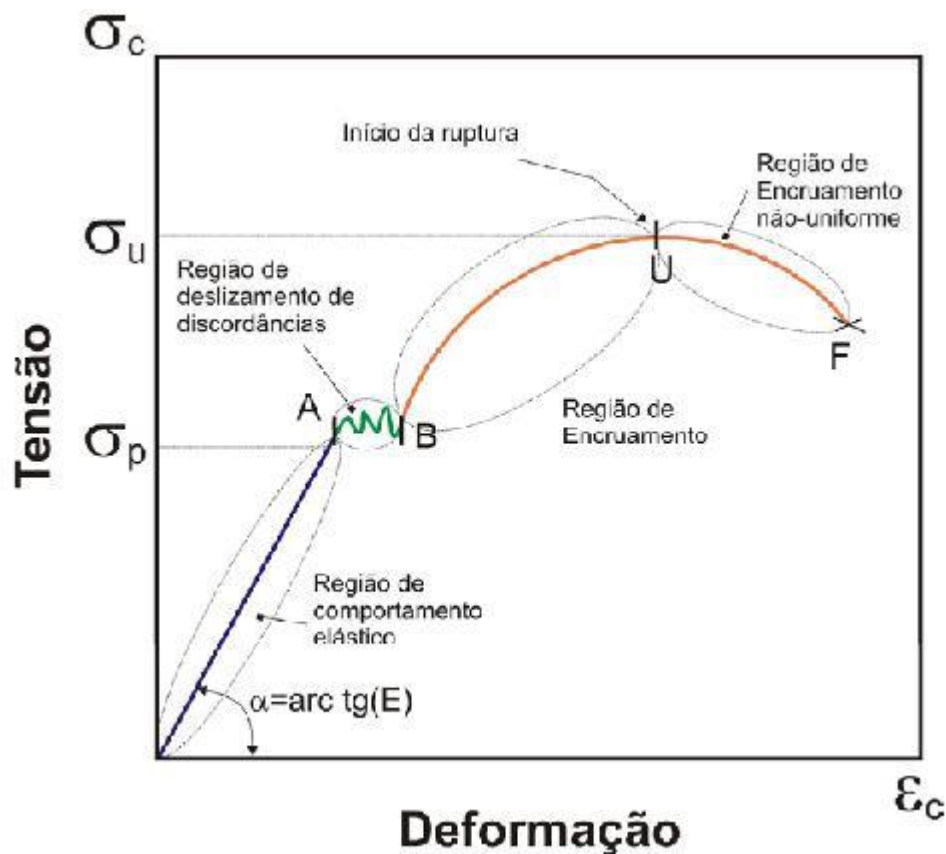
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Atingido o limite elástico, o material sofre um grande aumento no seu comprimento, mas sem mudança apreciável na tensão aplicada. Essa tensão que produz o escoamento do aço é chamada de limite de escoamento (f_y). Para os aços-carbono é usual considerar o limite de escoamento de 250 MPa e os aços de baixa liga limites próximos a 350 MPa.

Após a fase de escoamento, observa-se um aumento da resistência do material de forma não linear devido ao encruamento. Nessa etapa é obtido o valor máximo de resistência à ruptura do material (f_u), dividindo-se a carga máxima que ele suporta pela área da seção transversal inicial do corpo de prova.

Depois de atingido a carga máxima, a crescente estricção do material provoca redução da tensão até atingir a ruptura, como observado na figura seguinte.

Figura 11: Gráfico Tensão x Deformação.

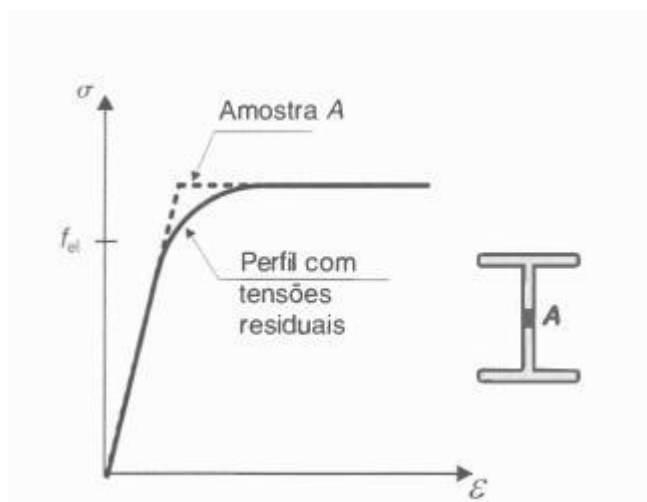


Fonte: Aula 3 – Resistência dos materiais, Prof. Kaio Emerson.³

5.1.1 Tensões residuais

Durante a laminação do aço ou em ações executadas posteriormente como a soldagem leva ao aparecimento de tensões residuais nos elementos metálicos. As diferentes velocidades de resfriamento do aço levam as partes mais expostas da peça, que se resfriam mais rápido, a impedir a contração das áreas menos expostas. Isso permite que tensões residuais longitudinais se instalem no produto, deixando a passagem do regime elástico para o patamar de escoamento mais gradativa.

Figura 12: Diagrama Tensão x Deformação para perfil com tensões residuais.



Fonte: Livro Estruturas de Aço, Prof. Walter Pfeil, 8ª edição. Página 24.

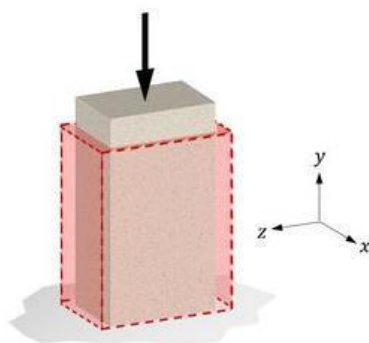
5.1.2 Coeficiente de Poisson (ν)

É o coeficiente que relaciona a proporcionalidade entre as deformações longitudinal e transversal de uma peça. Quando se aplica uma deformação ao longo do eixo longitudinal as seções transversais também sofrem deformações. Por exemplo, quando

³ Disponível em: <<https://kaiohdustra.files.wordpress.com/2010/10/tensoes-e-deformacoes.pdf>>. Acesso em 04 de

se contrai um material, reduzindo seu comprimento, ocorre uma expansão das seções transversais. Para os aços é usual utilizar o $\nu = 0,3$.

Figura 13: Quando se comprime um material a seção ortogonal expande.



Fonte: Responde Aí.⁴

5.1.3 Propriedades mecânicas gerais

As propriedades listadas abaixo podem ser consideradas aplicáveis a todos os tipos de aços estruturais.

Tabela 3: Propriedades do aço.

Massa específica	$\rho = 7,85 \text{ t/m}^3$
Módulo de elasticidade	$E = 210.000 \text{ MPA}$
Coefficiente de Poison	$\nu = 0,3$
Módulo de dilatação térmica	$B = 12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Fonte: Livro Projeto e Cálculo de Edifícios Industriais em Aço, 2ª edição. Pagina 9.

5.1.3.1 Ductilidade

⁴ Disponível em: <<https://www.respondeai.com.br/conteudo/mecanica-e-resistencia-dos-materiais/tensao-e-deformacao/coeficiente-de-poisson/1179>>. Acessado em de Março de 2020

Ductilidade é a capacidade de o material conseguir se deformar sob a ação de alguma carga. Quanto mais dúctil o aço, maior o alongamento e redução de área antes da ruptura. Este comportamento conduz a mecanismos de rupturas acompanhadas de grande deformação que fornece aviso prévio da atuação de cargas elevadas.

5.1.3.2 Fragilidade

É o oposto da ductibilidade, o material se deforma pouco antes da ruptura. Esse comportamento não é benéfico na construção civil, já que a estrutura não mostra aviso prévio antes do colapso. O aço pode se tornar frágil por meio dos efeitos térmicos como a solda.

5.1.3.3 Elasticidade

O material ao ser tensionado se deforma e caso essa tensão permaneça abaixo do limite elástico, o material consegue retornar ao estado pré-tensionado, conservando suas características geométricas. Tal comportamento se deve a natureza cristalina dos metais, que apresenta planos de escorregamento de menor resistência mecânica.

5.1.3.4 Plasticidade

Diferente da deformação elástica que é reversível, a deformação plástica provoca deformações permanentes no material. A deformação plástica altera a estrutura interna do metal, tornando mais difícil o escorregamento dos planos interiores, o que contribui para a elevação da resistência do metal. Essa característica é alcançada quando é aplicado alguma tensão superior ao limite de escoamento do material.

5.1.3.5 Fadiga mecânica

Quando peças de aço são forçadas repetitivamente, pode haver ruptura em tensões inferiores as obtidas de ensaios estáticos. De um modo geral, são necessários três fatores para que o material sofra ruptura pela fadiga, são eles: solicitações dinâmicas, solicitações de tração e deformação plástica. Essas solicitações propiciam o aparecimento de micro trincas no material, que ao longo do tempo aumentam de tamanho e reduzem a resistência, resultando em uma ruptura repentina.

5.1.3.6 Resistência à corrosão

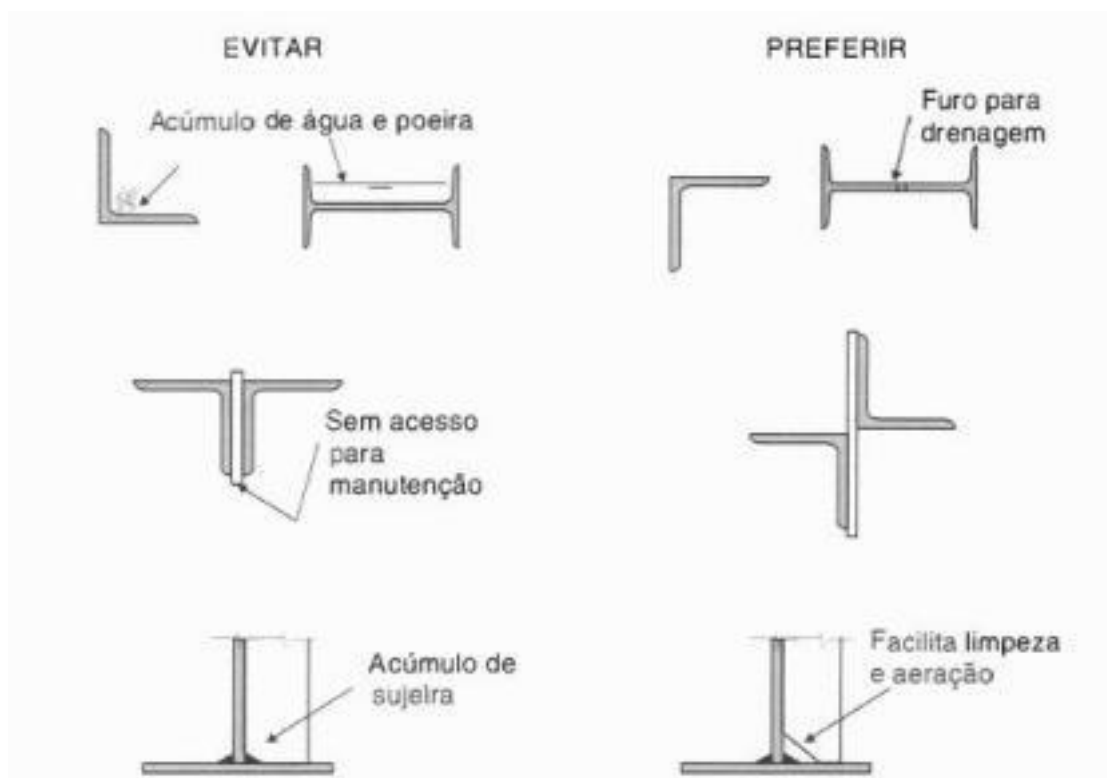
Há uma tendência natural do ferro constituinte do aço de retornar ao seu estado primitivo de minério, ou seja, torna-se óxido de ferro. Para evitar a corrosão misturam elementos de liga como o Cromo e Cobre no aço fundido para aumentar sua resistência à corrosão.

Comercialmente, esses aços recebem o nome de aço-patináveis. Quando expostos na atmosfera desenvolvem na superfície uma camada de óxido que funciona como barreira de proteção contra a umidade.

Outra maneira de proteger o aço contra a corrosão é por meio da galvanização e pintura. Na galvanização outro metal é utilizado como sacrifício, e é ele que reage com o ar formando a camada de óxido protetora. Normalmente, utiliza-se o zinco como metal de sacrifício. As peças de aço são mergulhadas em um banho de zinco fundido, processo conhecido como galvanização a quente, formando uma barreira e aumentando a resistência a corrosão.

Através da pintura do aço por um material não metálico também é possível criar uma barreira protetora e impermeável na superfície do aço exposto. Essa pintura age impedindo que a umidade entre em contato com o metal, porém se essa fina camada de tinta for danificada ou retirada, a oxidação do metal tem início. Outras formas de aumentar a vida útil da estrutura de aço exposta ao ar é evitar pontos de umidade e sujeira, como também, promover a aeração e drenagem da estrutura evitando pontos inacessíveis à manutenção da pintura.

Figura 14: Métodos para aumentar a vida útil da estrutura



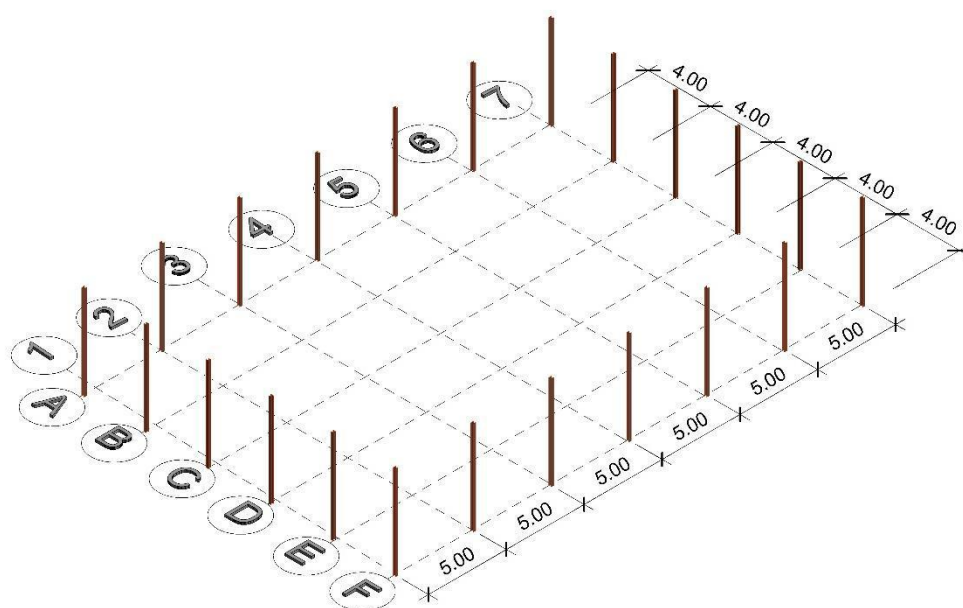
Fonte: Livro Estruturas de aço: dimensionamento prático. 8ª edição. Página 19.

6 MODELO ESTRUTURAL - GALPÃO METÁLICO

Os dois Galpões metálicos dimensionados compartilharam algumas características iguais, com o intuito de permitir que a comparação de esforços e orçamento se dê de forma justa. Ambos terão a finalidade de servir para fins comerciais, estarão situados no município de Goiânia e possuirão alto teor de ocupação.

O terreno será considerado plano e fracamente acidentado, com a cota média dos obstáculos igual a 3 metros. O galpão será coberto lateralmente com telhas metálicas e possuirá apenas uma abertura frontal, na qual será instalada a porta rolante de aço de dimensões 4x4,5m. O galpão terá dimensões 20x30x6m (comprimento, largura, altura). Os pilares da vista frontal e posterior estarão espaçados 4 metros um do outro e os laterais 5 metros, como mostrado na figura 15.

Figura 15: Posição dos Pilares.



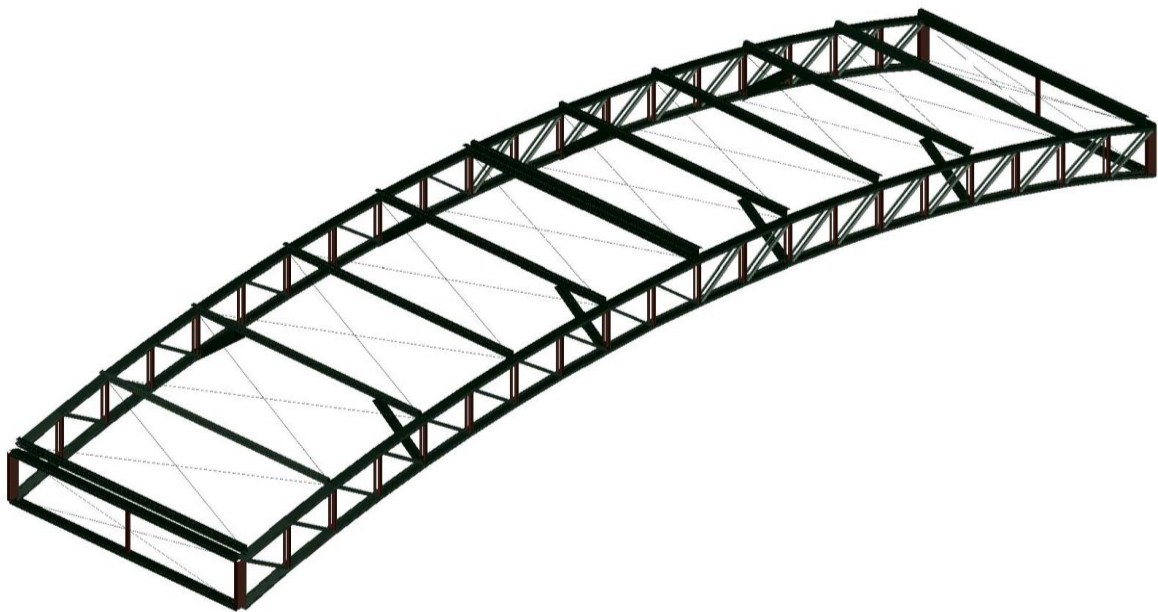
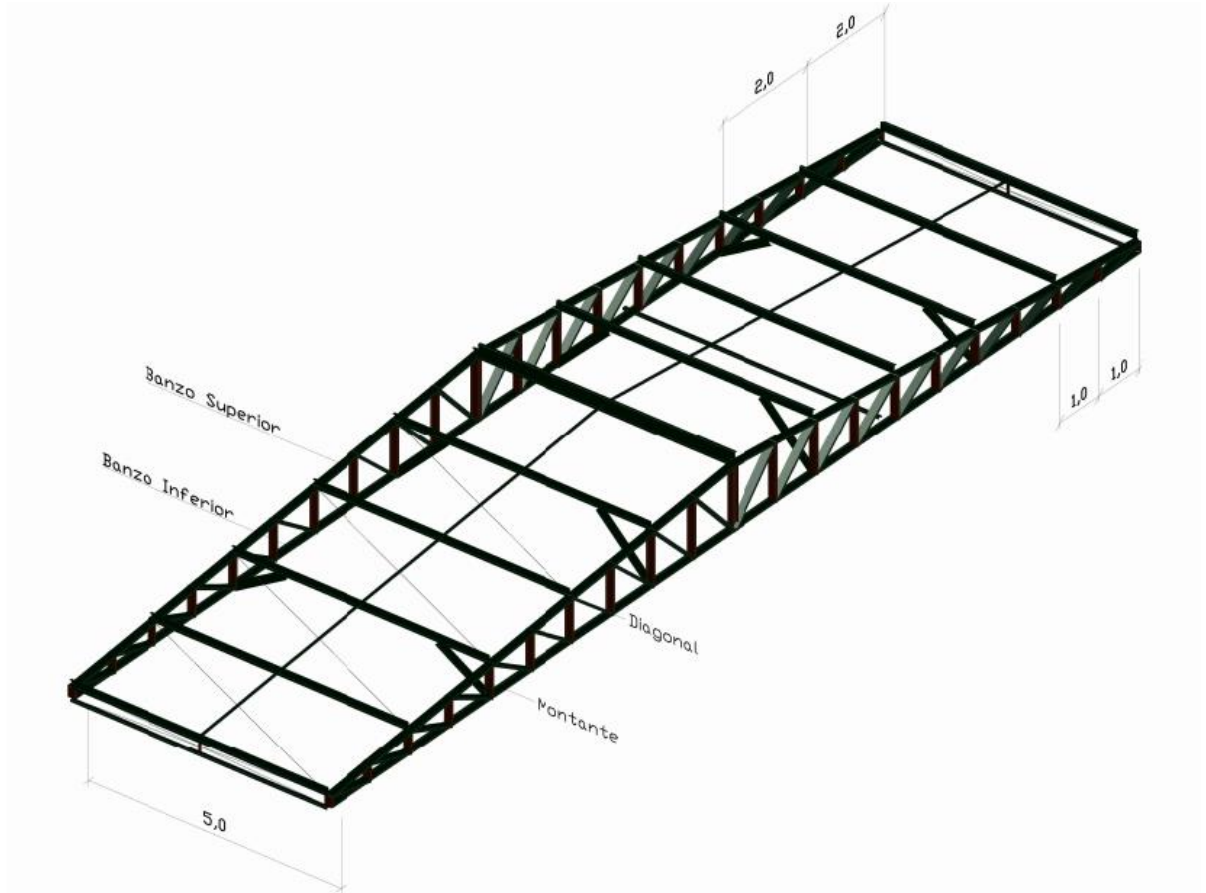
Fonte: Próprio Autor.⁵

Como observado na imagem existirá pilares apenas no perímetro da construção. Desse modo as treliças que estão sobre os pilares laterais terão que vencer um vão de 20 metros.

As terças que pertencem ao telhado possuirão 2 metros de espaçamento entre elas, como visto na Figura 16. Os montantes estarão segmentados em 1 metro ao longo dos banzos superior e inferior.

⁵ Imagem elaborada com o auxílio do Autodesk Revit, Autodesk Autocad e Cype 3D.

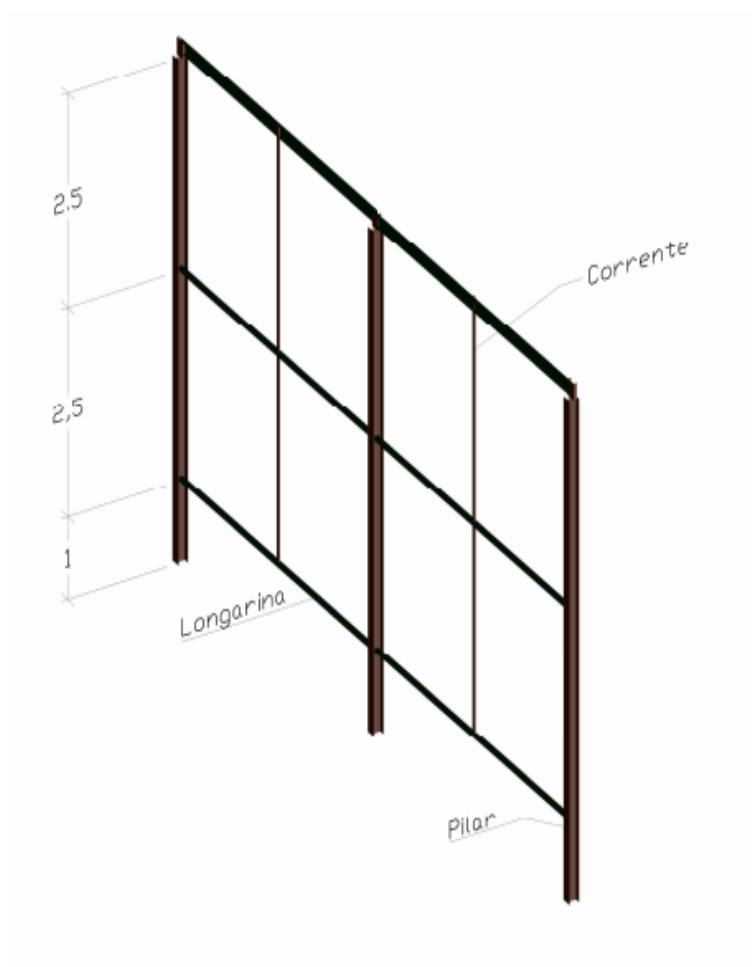
Figura 16: Componente da estrutura superior de cada galpão



Fonte: Próprio Autor.

Como na cobertura lateral serão utilizadas telhas metálicas, faz-se necessário uma estrutura que suporte o peso próprio da cobertura e o esforço de outras solicitações. Assim, instalará longarinas e agulhas nas laterais do galpão espaçadas de acordo com a Figura 17.

Figura 17: Estrutura lateral do galpão.

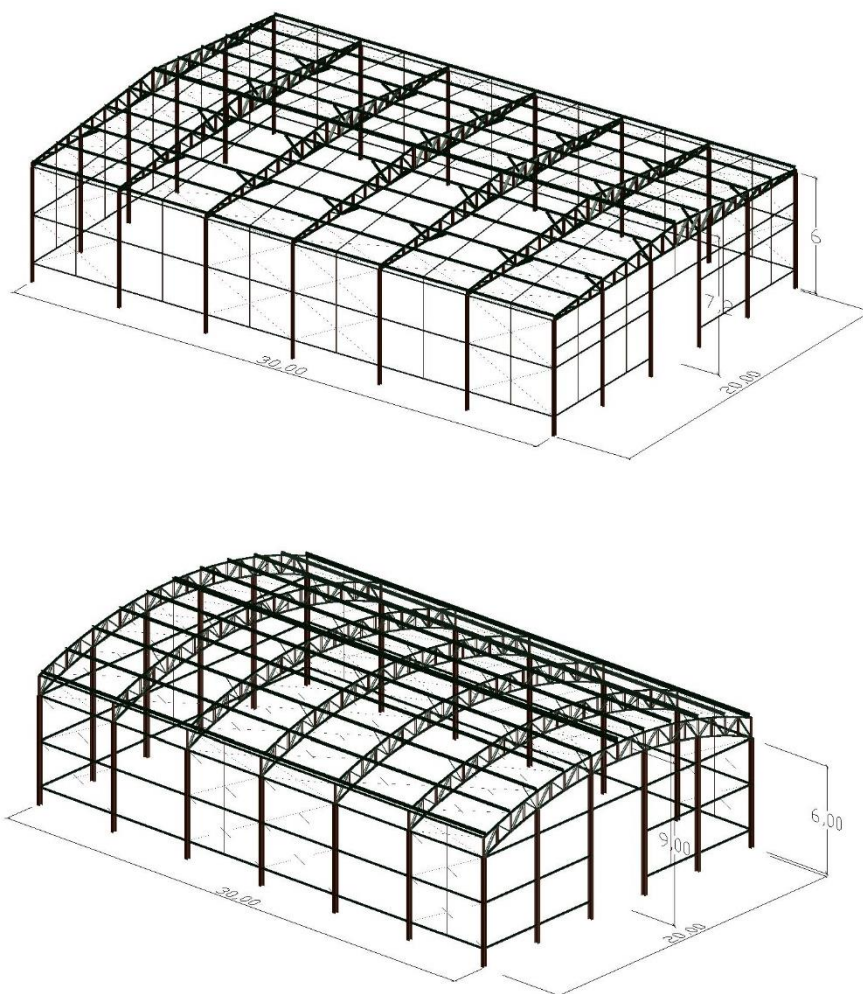


Fonte : Próprio Autor.

Na definição dos perfis utilizados em cada estrutura, dará prioridade a determinadas tipologias de material, com a finalidade de que os galpões possuem os mesmos perfis de aço, variando suas dimensões, se o dimensionamento exigir. No caso dos pilares optará por perfis laminados do tipo H; nos banzos, terças, longarinas e mão francesa os perfis laminados tipo U enrijecido; para as diagonais e montantes as cantoneiras de abas iguais. Em relação ao contraventamento e agulhas serão utilizadas barras redondas, por serem mais usuais no meio construtivo.

Os parâmetros listados nesse capítulo têm a função de dar semelhanças geométricas e construtivas aos dois galpões. Ambos podem ser visualizados de forma completa na Figura seguinte.

Figura 18: Vista Galpão Completo.



Fonte: Próprio Autor.

7 DIMENSIONAMENTO DOS GALPÕES

O dimensionamento de estruturas de aço deve atender aos requisitos da norma ABNT NBR 8800:2008 e ABNT NBR 14762:2010. De acordo com a norma, o dimensionamento das estruturas deve ser feito através da verificação ao atendimento dos estados limites.

Devem ser analisados os dois tipos de estados limites. O primeiro está relacionado ao esgotamento da capacidade resistente da estrutura e risco à segurança humana, é conhecido como estado limite último. Nesse estado é investigado se as combinações de ações mais desfavoráveis ultrapassam a resistência dos materiais utilizados na construção.

O segundo está ligado ao conforto, durabilidade, aparência e boa utilização da estrutura. Para isso, verifica-se a deformação dos elementos estruturais, abertura de fissuras, vibrações excessivas, recalque, entre outros fatores relacionados ao uso e comportamento da estrutura. Esse segundo estado é chamado estado limite de utilização

Para atender as condições de segurança imposta pelo estado limite último é necessário minorar a capacidade de resistência dos materiais e majorar a carga dos esforços atuantes.

7.1 CARGAS ATUANTES NA ESTRUTURA.

Na análise estrutural devem ser consideradas as ações estáticas e as quase-estáticas que atuam nos componentes da estrutura que possam produzir efeitos significativos para a segurança , levando em conta os estados limite últimos e de serviço. De acordo com a NBR 8800:2008, a estrutura está sujeita as ações permanentes, variáveis e excepcionais.

7.1.1 Ações Permanentes

De acordo com o item 11.3.1 da ABNT 8800:2014 as ações permanentes são formadas pelo peso próprio da estrutura, incluindo o peso de instalações e equipamentos. Também são considerados permanentes as ações que crescem com o tempo, tendendo a um valor limite constante.

Nas estruturas analisadas, as ações permanentes se darão pelo peso próprio dos componentes estruturais. O CypeCad 3D quando faz o dimensionamento da estrutura, já analisa o peso própria das peças aptas da sua biblioteca de materiais, sendo necessário apenas incluir manualmente o peso das telhas metálicas da cobertura e paredes laterais.

Será utilizada a telha trapezoidal TMTP – 40 com 0,43mm de espessura da empresa Eternit para os fechamentos, de acordo com o catálogo da fabricante, a telha possui peso próprio de 4,20 kg/m².

7.1.2 Ações Variáveis

As ações variáveis são formadas pelas cargas acidentais previstas durante o uso e ocupação da construção. Essas cargas englobam a ação pelo vento e da água, peso de pessoas, mobílias, materiais diversos e outros esforços abordados na seção 11.4 da ABNT 8800.

De acordo com o item B.5.1 do anexo B da norma, para sobrecargas em coberturas, poder ser prevista uma sobrecarga mínima de $0,25 \text{ kN/m}^2$, em projeção horizontal. Admitindo que essa sobrecarga englobe os componentes das instalações elétricas e hidráulicas, isolamento térmico e acústico e pequenas peças fixadas na cobertura. Para os fechamentos laterais será admitida uma sobrecarga de $0,10 \text{ KN/m}^2$.

A norma estabelece que os esforços solicitantes relativos ao vento devem ser determinados de acordo com a ABNT NBR 6123.

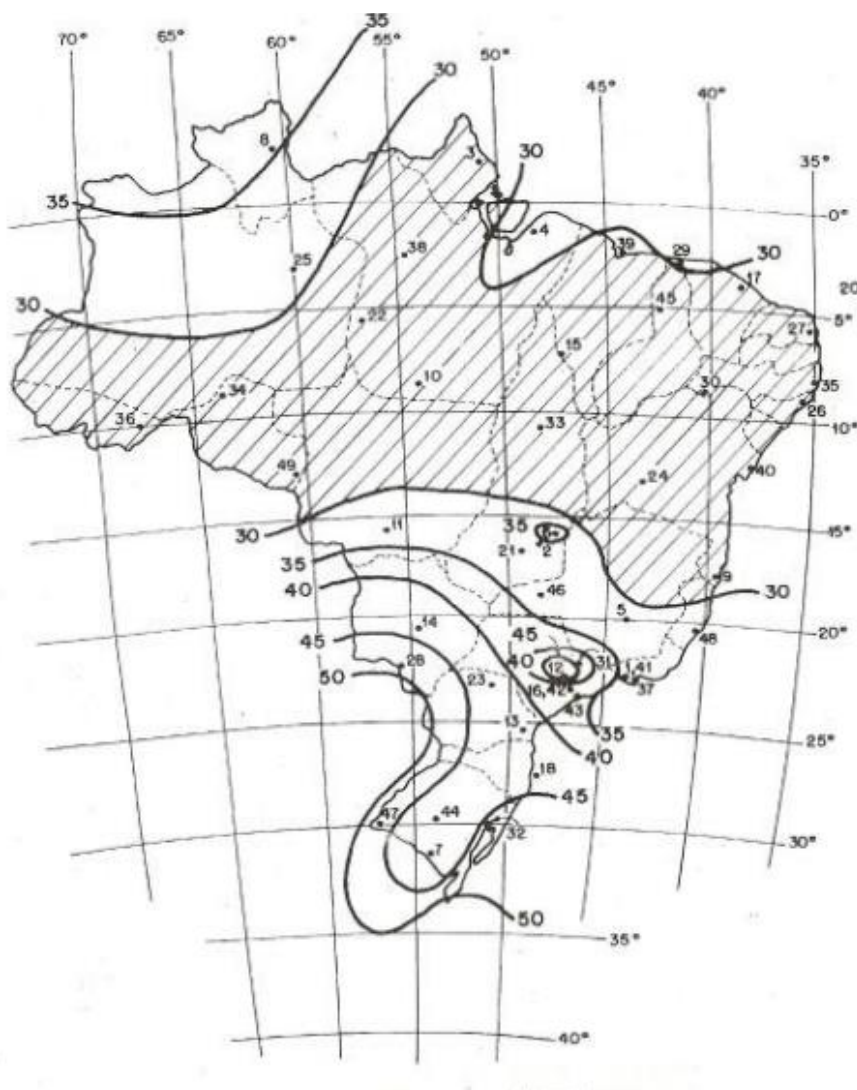
7.1.2.1 Força do Vento

A NBR ABNT 6123 determina os parâmetros e as equações que devem ser adotadas para o dimensionamento da força do vento. No projeto estrutural é determinada a velocidade característica de vento V_k , que depende das seguintes características: velocidade básica do vento V_o , topografia do local S_1 , rugosidade do terreno (S_2), grau de segurança e vida útil da edificação (S_3).

A velocidade básica V_o do vento depende da localização da edificação. Para isso existe na norma uma imagem que exhibe as isopletras para o território brasileiro, onde é possível retirar o valor correspondente de 35 m/s para a cidade de Goiânia.

Por definição da norma, a velocidade básica do vento V_o é uma rajada de 3 segundos, excedida uma vez a cada 50 anos, a 10 metros do terreno, em campo aberto.

Figura 19: Isopletas de velocidade básica (m/s).



Fonte: ABNT NBR 6123.

O fator S_1 considera a topografia do local. Como discutido no capítulo 4, o relevo do terreno para os galpões se dará em terreno plano, fracamente acidentado. Para essa configuração a norma dita que o valor de $S_1 = 1,0$.

O fator S_2 estima o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação, esses três requisitos são combinados para resultar no valor de S_2 .

Em relação a rugosidade do terreno, são estabelecidos cinco categorias como mostrado na figura seguinte. Como discutido no capítulo 4, o local de construção dos galpões apresenta terreno fracamente acidentado, com a cota média de obstáculos igual a 3 metros. Dentre as opções mostradas, a que se adequa aos parâmetros topográficos adotados é a categoria 3.

Figura 20: Classes 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.

Software VisualVentos.

Considerando as dimensões da edificação, a norma classifica as edificações em três classes mostradas na figura seguinte. Como a maior dimensão de ambos os galpões corresponde ao comprimento equivalente de 30 metros, a classe a qual se insere é a B.

Figura 21: Classes do fator S₂

Classe A: Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.

Classe B: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.

Classe C: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

Fonte: ABNT NBR 6123.

Agora que sabemos a quais classes o galpão se enquadra, podemos calcular o fator S₂, que é dado pela seguinte formula:

$$S_2 = bF_r \left(\frac{Z}{10} \right)^p$$

Sendo:

b = parâmetro meteorológico

F_r = fator de rajada, sempre correspondente a categoria 2.

Z = cota acima do terreno em metros

p = expoente da lei potencial de variação de S_2

Considerando uma cota média de $z = 6$ metros (altura dos pilares) e os valores das incógnitas F_r , Z retiradas da figura seguinte, podemos encontrar o valor de S_2 .

Figura 22: Parâmetros para cálculo de S_2 .

Categoria	z_g (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: Tabela 1 da ABNT NBR 6123.

$$S_2 = bF_r\left(\frac{Z}{10}\right)^p = (0,94)(0,98)\left(\frac{6}{10}\right)^{0,105} = 0,873$$

O fator S_3 é baseado em conceitos estatísticos e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. É classificado em 5 classes, como mostrado a seguir, distinguindo-se pelo tipo de uso e fator de ocupação da edificação.

Figura 23: Valores do fator estatístico S_3 .

Grupo	Descrição	S_3
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 e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

Fonte: Tabela 3 da ABNT NBR 6123.

Como os galpões serão destinados para atividade comercial tendo alto fator de ocupação, se enquadram na Classe 2, com valor de $S_3 = 1,00$.

Agora que sabemos o valor de V_0 , S_1 , S_2 , e S_3 é possível calcular a velocidade característica V_k .

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$$

$$V_k = 35 \cdot 1,0 \cdot 0,873 \cdot 1,0$$

$$V_k = 30,55 \text{ m/s}$$

Conhecido o valor de V_k determinaremos a pressão dinâmica que age sobre a estrutura pela seguinte expressão:

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

$$q = 0,613 \cdot 30,55^2$$

$$q = 572,30 \text{ N/m}^2$$

De acordo com o item 4.2.1 da ABNT NBR 6123, a força do vento em uma face da edificação depende da diferença de pressão entre o meio interno e externo. Assim, é necessário descobrir os coeficientes de pressão da construção para ventos a 0° e 90° .

De acordo com as configurações geométricas apresentadas no capítulo 4, as paredes laterais e cobertura serão executadas com telhas metálicas e existirá uma abertura dominante situada a barlavento, que corresponde a porta rolante de aço de dimensões 4x4,5m. De acordo com o item 6.2.2 da norma de vento.

Para os fins desta Norma, são considerados impermeáveis os seguintes elementos construtivos e vedações: lajes e cortinas de concreto armado ou protendido; paredes de alvenaria, de pedra, de tijolos, de blocos de concreto e afins, sem portas, janelas ou quaisquer outras aberturas. Os demais elementos construtivos e vedações são considerados permeáveis. A permeabilidade deve-se à presença de aberturas, tais como juntas entre painéis de vedação e entre telhas, frestas em portas e janelas, ventilações em telhas e telhados, vãos abertos de portas e janelas, chaminés, lanternins, etc.

(ABNT NBR 6123/88, p. 12)

Assim, coberturas formadas por telhas metálicas se enquadram como permeáveis, por permitirem a passagem de ar entre os ambientes através da presença de aberturas nas juntas de fixação. Como a abertura dominante está na face de barlavento com vento a 0°, conforme o item 6.2.5 da norma deve se calcular a proporção entre a área de todas as aberturas nessa face e a área das aberturas em todas as outras faces submetidas a sucções externas. Para o cálculo, será considerado uma dimensão de 4 cm para as juntas de fixação ao longo do perímetro do galpão. Primeiro calcularemos as forças de vento atuando no galpão com treliça do tipo Pratt, posteriormente, as forças no galpão com treliça em arco.

Área das aberturas na face de sotavento:

$$4 \times 4,5 + 0,04 \times 20 = 18,8 \text{ m}^2$$

Área das aberturas nas outras faces:

$$0,04 \times (30 + 20 + 30) = 3,2 \text{ m}^2$$

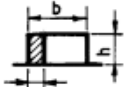
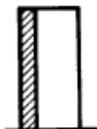
Proporção:

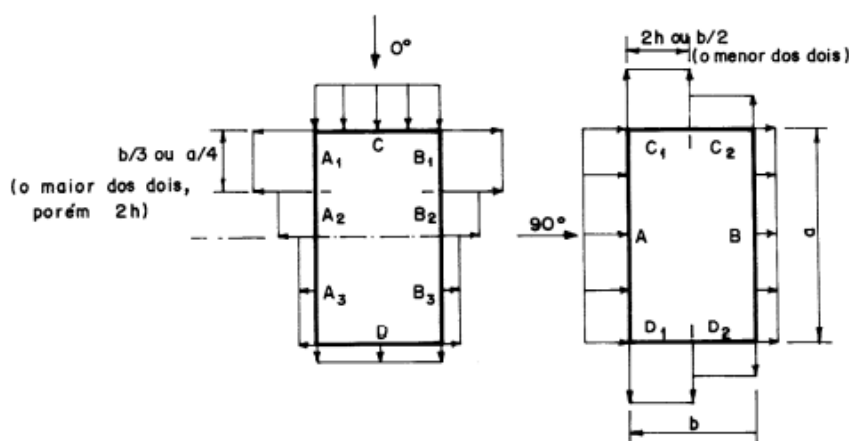
$$\frac{18,8}{3,2} = 5,875 \approx 6,0$$

Para esta proporção a letra c do item 6.2.5 da norma estipula um coeficiente de pressão interno c_{pi} igual a +0,8. Os valores positivos para coeficientes de pressão indicam sobrepressão e os negativos sucção.

Para calcular o c_{pi} para a solicitação de ventos em outras direções deve-se observar a localização da abertura dominante para cada caso. A imagem seguinte mostra os coeficientes externos adotados para o dimensionamento para as paredes laterais e a para o telhado.

Figura 24: Valores de c_{pe} .

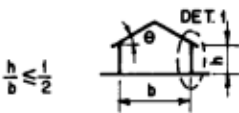
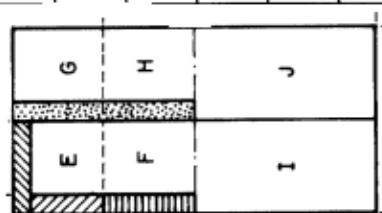
Altura relativa		Valores de C_e para								C_{pe} médio 
		$\alpha = 0^\circ$				$\alpha = 90^\circ$				
		A_1 e B_1	A_2 e B_2	C	D	A	B	C_1 e D_1	C_2 e D_2	
 0,2 b ou h (o menor dos dois) $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	- 0,8	- 0,5	+ 0,7	- 0,4	+ 0,7	- 0,4	- 0,8	- 0,4	- 0,9
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 0,8	- 0,4	+ 0,7	- 0,3	+ 0,7	- 0,5	- 0,9	- 0,5	- 1,0
 $\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	- 0,9	- 0,5	+ 0,7	- 0,5	+ 0,7	- 0,5	- 0,9	- 0,5	- 1,1
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 0,9	- 0,4	+ 0,7	- 0,3	+ 0,7	- 0,6	- 0,9	- 0,5	- 1,1
 $\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	- 1,0	- 0,6	+ 0,8	- 0,6	+ 0,8	- 0,6	- 1,0	- 0,6	- 1,2
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 1,0	- 0,5	+ 0,8	- 0,3	+ 0,8	- 0,6	- 1,0	- 0,6	- 1,2



Fonte: Tabela 4 da ABNT NBR 6123.

Figura 25: Valores de c_{pe} para o telhado.

Altura relativa	θ	Valores de C_e para				c_{pe} médio			
		$\alpha = 90^\circ (A)$		$\alpha = 0^\circ$					
		EF	GH	EG	FH				
	0°	-0,8	-0,4	-0,8	-0,4	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,9	-0,4	-0,8	-0,4	-1,4	-1,2	-1,2	-1,0
	10°	-1,2	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,4		-1,2
	15°	-1,0	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,2		-1,2
	20°	-0,4	-0,4	-0,7	-0,6	-1,0			-1,2
	30°	0	-0,4	-0,7	-0,6	-0,8			-1,1
	45°	+0,3	-0,5	-0,7	-0,6				-1,1
	60°	+0,7	-0,6	-0,7	-0,6				-1,1

Fonte: Tabela 5 da ABNT NBR 6123.

Como dados de entrada, para retirada dos valores de c_{pe} , devemos descobrir as seguintes relações:

$$\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2} \rightarrow \frac{6}{20} \leq \frac{1}{2} \rightarrow 0,3 \leq 0,5$$

$$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2} \rightarrow 1 \leq \frac{30}{20} \leq \frac{3}{2}$$

Os valores dessas relações se enquadram nas hipóteses demarcadas com o quadrado vermelho nas imagens 20 e 21.

Quando o vento soprar e a abertura dominante estar a sotavento, a norma estabelece que seja adotado para o c_{pi} o valor para o coeficiente de pressão externo c_{pe} , correspondente a esta face. De acordo com a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** o valor de $c_{pe} = -0,4$.

Para o vento a 90° a abertura dominante vai estar paralela ao vento, a norma estipula adotar o coeficiente externo médio c_{pe} , correspondente ao local da abertura nesta face. Observando a

figura, constata que a face tem dois valores para o c_{pe} , com isso, o valor da incógnita se dará pela média entre esses valores.

$$C_{pi} = \frac{-0.8 - 0,4}{2} = -0,6$$

Descoberto os valores dos coeficientes de pressão para o galpão com treliça tipo Pratt, agora é possível calcular a força do vento sobre os elementos da edificação com a fórmula seguinte. Esse cálculo o CypeCad 3D já faz automaticamente, multiplicando a carga com cada área de atuação do vento, bastando apenas a inserção manual dos valores de carga para cada situação.

$$F = (C_{pe} - C_{pi})q \cdot A$$

$$Carga = (C_{pe} - C_{pi})q$$

Sendo :

q = pressão dinâmica de 572,30 N/m².

A = área do plano de ação da força.

Os valores foram compilados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Calculado os esforços de vento para o galpão com treliça tipo Pratt, partimos para calcular os do galpão com treliça em arco. Para este galpão, as forças nas paredes laterais e os coeficientes de pressão interna serão idênticas aos já calculados na treliça tipo Pratt, porém, devido a forma espacial da cobertura ser diferente e se comportar de forma distinta com as ações externas, deve-se calcular os c_{pe} para a cobertura de acordo com o anexo E da ABNT NBR 6120.

As Figuras 26 e 27. mostram os valores de c_{pe} para vento incidindo perpendicularmente e paralelamente a geratriz da cobertura. Como dado de entrada para essas tabelas, precisamos encontrar as relações:

$$\frac{f}{a} = \frac{3}{30} = \frac{1}{10}$$

$$\frac{h}{a} = \frac{6}{30} = \frac{1}{5}$$

Consideraremos a relação h/a igual a $1/4$, em favor da segurança, para adentrar aos dados da Figura 26.

Figura 26: c_{pe} para vento soprando perpendicularmente a geratriz da cobertura.

f/l_2	h/l_2	c_{pe} para a parte					
		1	2	3	4	5	6
1/5	0	+0,3	-0,3	-0,6	-0,7	-0,6	-0,2
	1/8	-0,5	-0,5	-0,7	-0,7	-0,5	-0,2
	1/4	-0,9	-0,6	-0,8	-0,8	-0,4	-0,2
	1/2	-1,2	-0,7	-0,9	-0,8	-0,3	-0,2
	1	-1,4	-0,8	-0,9	-0,9	-0,4	-0,4
	5	-1,8	-1,0	-1,1	-1,2	-0,8	-0,7
1/10	1/8	-1,0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3
	1/4	-1,2	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3
	1/2	-1,5	-1,0	-0,7	-0,5	-0,4	-0,3
	1	-1,6	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,3

Fonte: Tabela 24 da ABNT NBR 6120.

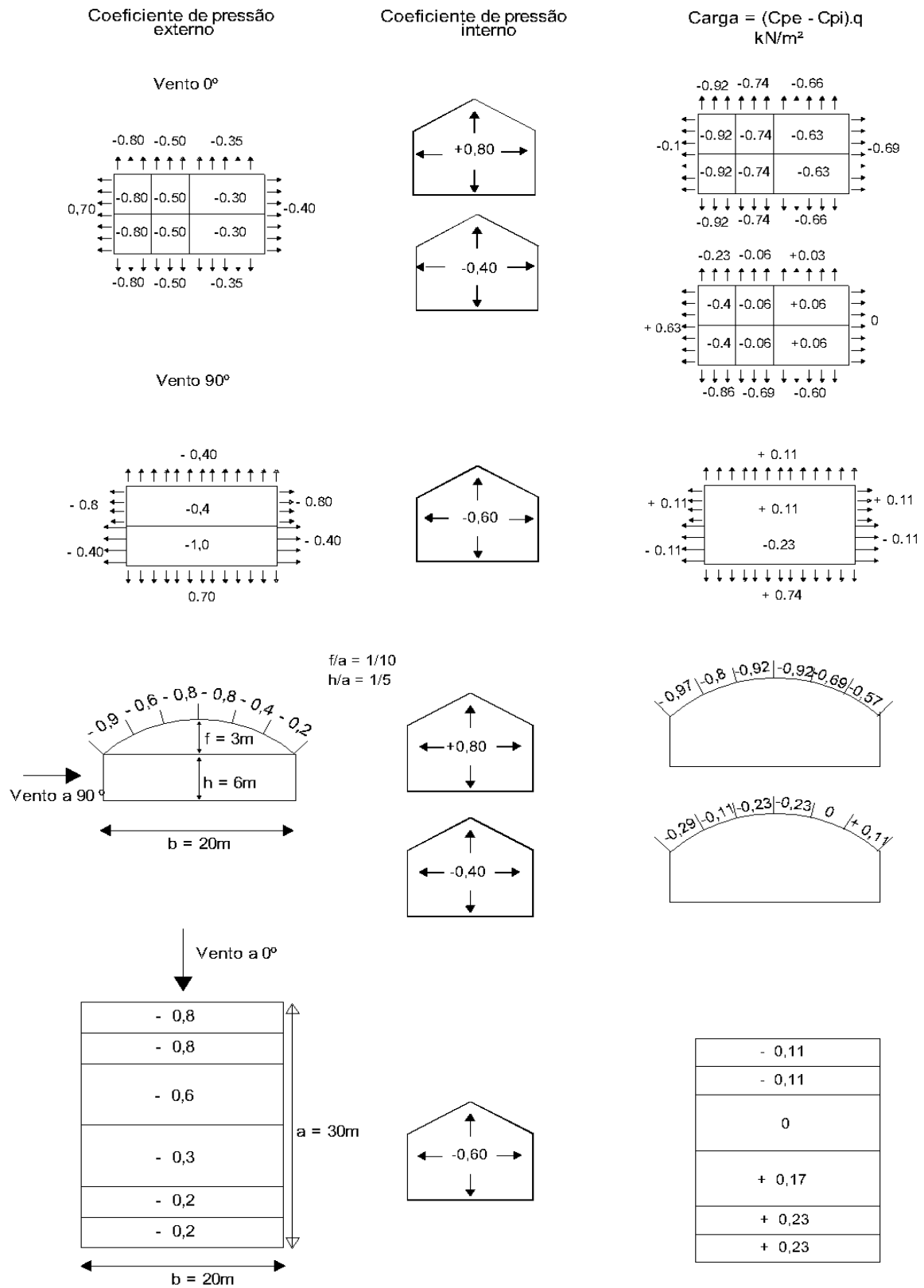
Figura 27: c_{pe} para vento paralelamente a geratriz da cobertura.

Parte da cobertura	$A_1 + A_2$	B	C	$D_1 + D_2$
c_{pe}	-0,8	-0,6	-0,3	-0,2

Fonte: Tabela 25 da ABNT NBR 6120.

Os valores dos coeficientes de pressão e a carga do vento estão na figura seguinte.

Figura 28: Coeficientes de pressão e carga sobre os galpões.



Fonte: Próprio Autor.

7.1.2.2 Ações Excepcionais

As ações excepcionais de acordo com o item 4.7.4 da ABNT NBR 6118, são as que tem duração extremamente curta e probabilidade muito baixa de ocorrência durante a vida útil da construção. São aquelas decorrentes de explosões, choques de veículos, incêndios entre outros. No nosso dimensionamento desconsideraremos as ações excepcionais, aplicando apenas as permanentes e variáveis.

7.2 COMBINAÇÃO DE AÇÕES

Segundo o item 4.7.7.1 da ABNT 8800: “um carregamento é definido pela combinação das ações que têm probabilidade não desprezíveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura, durante um período preestabelecido”. Desse modo, a combinação das ações deve ser determinada considerando os efeitos mais desfavoráveis sobre a estrutura, devendo ser realizadas em função da combinação última e de serviço

As combinações últimas relacionam ao esgotamento da capacidade resistente dos elementos constituintes da estrutura. Em cada combinação normal, as cargas permanentes são ponderadas por um coeficiente γ_g igual a 1,25 ou 1,0 (carga favorável a estrutura), para as ações variáveis uma é considerada a principal, essa ação é multiplicada pelo coeficiente de ponderação (γ_q) igual a 1,5 ou 1,4 para o vento. As demais são entendidas como secundárias, atuando com seus valores reduzidos de combinação, para sobrecarga ψ_0 igual a 0,7 para a sobrecarga e para o vento igual a 0,6.

Aplica a seguinte expressão para o cálculo de F_d .

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} * F_{G1,k}) + \gamma_{q1} * F_{q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{gj} * \psi_{0j} * F_{qj,k})$$

Onde:

F_d = força; valor de ação;

$F_{G1,k}$ = representa valores característicos a cargas permanentes;

$F_{q1,k}$ = representa a carga variável considerada principal na combinação;

$F_{qj,k}$ = representa valores característicos das cargas variáveis secundárias;

γ_g = coeficiente de ponderação de cargas permanentes;

γ_q = coeficiente de ponderação de cargas variáveis;

ψ_0 = fator de combinação de cargas variáveis.

Para o trabalho foi utilizado as seguintes combinações ultimas:

$$C1: 1,25F_{G1,k} + 1,50.F_{q1,k}$$

$$C2: 1,25F_{G1,k} + 1,50.F_{q1,k} + (0,6 * 1,4).F_{qj,k} \quad (\text{Sobrecarga como carga principal})$$

$$C3: 1,25F_{G1,k} + (0,7*1,5).F_{q1,k} + 1,4.F_{qj,k} \quad (\text{Vento como carga principal})$$

$$C4: 1,0F_{G1,k} + 1,4.F_{qj,k} \quad (\text{Carga permanente favorável})$$

As combinações de serviço são utilizadas para verificar a deformação da estrutura, formação e abertura de fissuras e vibrações excessivas. Para esse propósito, será considerado a combinação frequente de serviço, em que a ação variável principal $F_{q1,k}$ é tomada com seu valor frequente $\psi_1 F_{q1,k}$, sendo ψ_1 igual a 0,6 para sobrecarga e 0,3 para o vento. Todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{qj,k}$, com ψ_2 para o vento igual a 0 e demais ações variáveis com valor de 0,4.

$$F_{serv} = \sum_{i=1}^m F_{G1,k} + \psi_1 * F_{q1,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_2 * F_{qj,k})$$

Combinações utilizadas no trabalho.

$$C1 = 1,00F_{G1,k} + 0,60F_{q1,k} \quad (\text{Sobrecarga como principal})$$

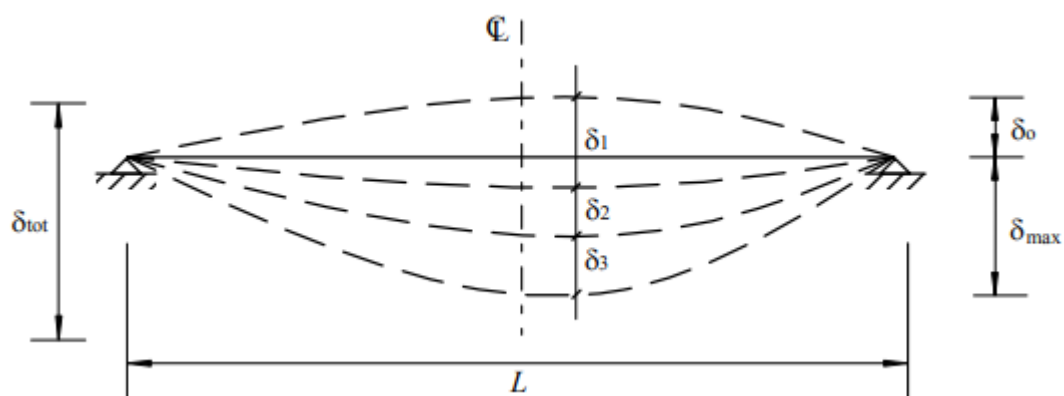
$$C2: 1,00F_{G1,k} + 0,4F_{q1,k} + 0,3F_{qj,k} \quad (\text{Vento como principal})$$

7.3 COMPRIMENTO DE FLAMBAGEM E DESLOCAMENTOS MÁXIMOS

Após a modelagem das estruturas dos galpões metálicos, visto na Figura 18, e inserido as ações atuantes, também é necessário restringir os deslocamentos das barras que compõe a estrutura e seu comprimento de flambagem.

Essa restrição se dá por meio da adoção de limites máximos de flexão que cada tipo de componente pode apresentar. Segundo o Anexo C da ABNT 8800, a soma dos deslocamentos devido a contraflecha δ_0 , ações permanentes δ_1 , ações permanentes de longa duração δ_2 e ações variáveis δ_3 , devem ser inferiores ao estipulados para $\delta_{\max}$ da Figura 30.

Figura 29: Deslocamento a serem considerados.



Fonte : Figura C.1, ABNT NBR 8800.

Figura 30: Deslocamentos máximos.

Descrição	δ^a
- Travessas de fechamento	$L/180^b$
	$L/120^{c,d}$
- Terças de cobertura ^{g)}	$L/180^e$
	$L/120^f$
- Vigas de cobertura ^{g)}	$L/250^h$
- Vigas de piso	$L/350^h$
- Vigas que suportam pilares	$L/500^h$
Vigas de rolamento: ^{j)} - Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 kN - Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN, exceto pontes siderúrgicas - Deslocamento vertical para pontes rolantes siderúrgicas com capacidade nominal igual ou superior a 200 kN - Deslocamento horizontal, exceto para pontes rolantes siderúrgicas - Deslocamento horizontal para pontes rolantes siderúrgicas	$L/600^i$ $L/800^i$ $L/1000^i$ $L/400$ $L/600$
Galpões em geral e edifícios de um pavimento: - Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base - Deslocamento horizontal do nível da viga de rolamento em relação à base	$H/300$ $H/400^{k,l}$

Fonte: Tabela C.1, ABNT NBR 8800.

O comprimento de flambagem se relaciona com o tipo de ligação nas extremidades do componente estrutural e, assim como o deslocamento máximo, deve ser inserido manualmente para cada barra. No anexo E da ABNT 8800, se encontra os valores teóricos do coeficiente de flambagem a flexão, K_x e K_y , para cada elemento isolado.

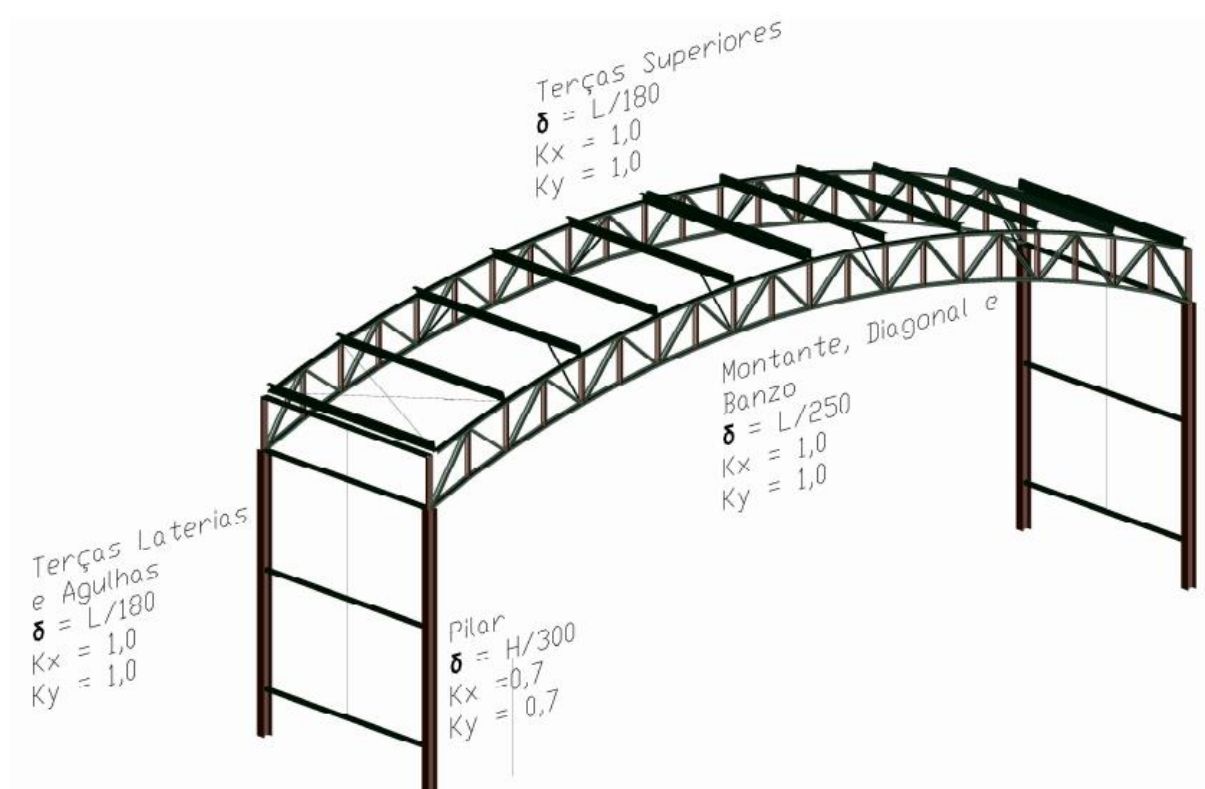
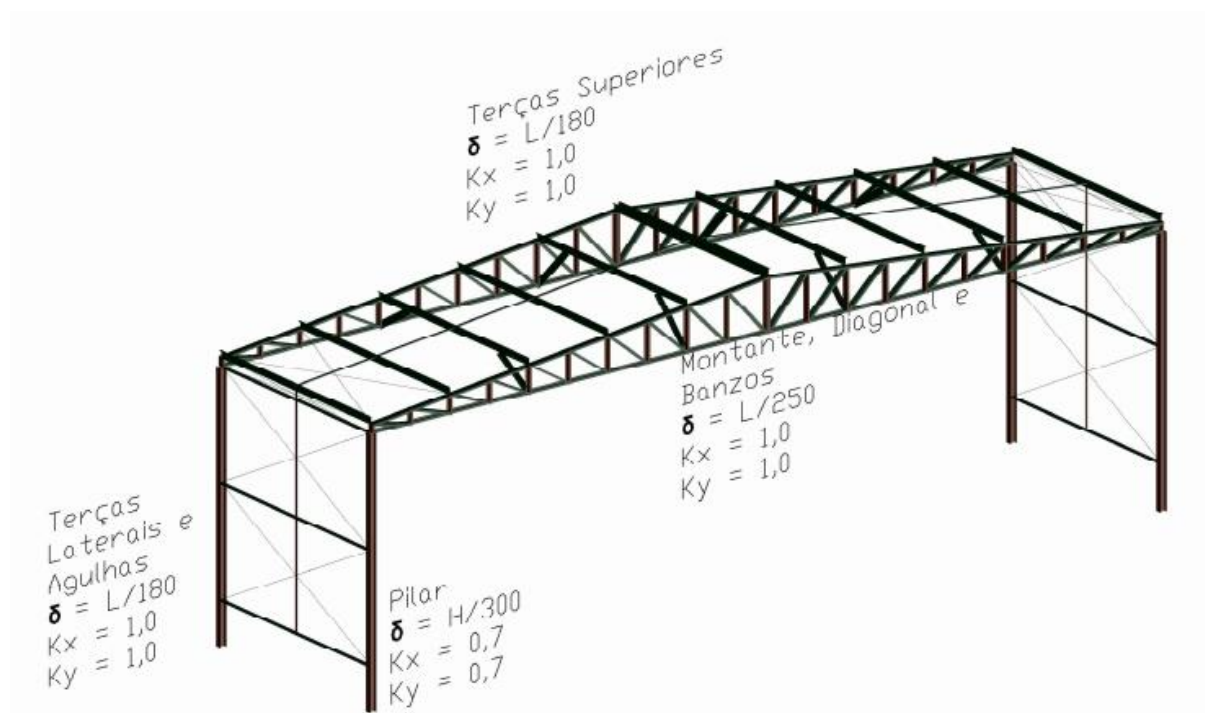
Figura 31: Coeficiente de flambagem a flexão para elementos isolados.

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

Fonte: Tabela E.1, ABNT 8800.

Os valores do deslocamento máximo, K_x e K_y adotados para cada elemento estrutural, foram compilados abaixo.

Figura 32: Valores de coeficiente de flambagem e flecha limite.



Fonte: Próprio Autor

7.4 RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES ESTRUTURAIS

Depois de inserido os dados da ação do vento, comprimento de flambagem e flecha limite no CypeCad 3D para cada galpão, já se torna possível o dimensionamento automatizado da estrutura pelo programa. O dimensionamento executado pelo software para cada componente estrutural se pauta em procurar o perfil metálico mais leve da série que atenda aos requisitos mínimos anunciados na ABNT 8800:2008 e ABNT 14762:2010.

Para o galpão com treliça tipo tesoura de Pratt o resultado do dimensionamento resultou nos seguintes perfis metálicos:

- Terças da Cobertura, terças laterais e mão francesa: perfil tipo U enrijecido de aço ASTM 36 de dimensões 200x75x25 e espessura igual a 3.04mm.
- Banzos: perfil tipo U enrijecido de aço ASTM 36 de dimensões 200x75x25 e espessura igual a 4.76mm.
- Diagonais e montantes: cantoneiras duplas de abas iguais de dimensões 2"x3/16" produzidas com aço ASTM 572 – 345 MPA.
- Agulhas: perfil tipo U 75x40 com espessura de 2mm de aço ASTM 36.
- Contraventamento: barra redonda ¼".de aço ASTM 572 – 345 MPA.
- Pilar: perfil tipo I 200x46.1 de aço ASTM 572 – 345 MPA.

Para o galpão com treliça em arco de Pratt o resultado do dimensionamento resultou nos seguintes perfis metálicos:

- Terças da Cobertura, terças laterais e mão francesa: perfil tipo U enrijecido de aço ASTM 36 de dimensões 200x75x25 e espessura igual a 3.04mm.
- Banzos: perfil tipo U enrijecido de aço ASTM 36 de dimensões 200x75x25 e espessura igual a 4.76mm.
- Diagonais e montantes: cantoneiras duplas de abas iguais de dimensões 2"x3/16" produzidas com aço ASTM 572 – 345 MPA.
- Agulhas: perfil tipo U 75x40 com espessura de 1,5mm de aço ASTM 36.
- Contraventamento: barra redonda ¼".de aço ASTM 572 – 345 MPA.
- Pilar: perfil tipo I 250x115.0 de aço ASTM 572 – 345 MPA.

7.4.1 Dimensionamento a Tração

De acordo com o item 9.6 da ABNT NBR 14762, que prescreve o dimensionamento para elementos formados a frio, e o item 5.2 da ABNT NBR 8800, para os demais perfis, a relação entre o esforço solicitante de cálculo e a força normal resistente de tração do componente estrutural deve ser menor que 1.

$$n = \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

Os esforços solicitantes de cálculo são fornecidos pelo Cype3D por meio da combinação das ações de acordo com os estados limites últimos.

De acordo com as normas, a resistência de cálculo a tração $N_{t,Rd}$ para aços é dada pela fórmula:

$$N_{t,Rd} = A_g f_y / \gamma$$

Sendo:

A_g : Área Bruta da seção transversal da barra.

F_y : tensão de escoamento.

γ : Coeficiente de ponderação das resistências, para escoamento da seção bruta $\gamma = 1.1$

Para todos os componentes estruturais, os valores de resistência à tração foram reunidos na tabela 4 e 5.

Tabela 4: Resistencia a tração para galpão com tesoura tipo Pratt.

Componente	A	f_y	γ	N_{t,Rd}	N_{t,Sd}	n
	(cm²)	(kgf/cm²)		(t)	(t)	
Terça Superior	11.55	2548.42	1.1	26.751	0.007	0.001
Banzo	17.54	2548.42	1.1	40,62	26,265	0.646
Diagonais	4.68	3516.82	1.1	14,96	9,390	0.627
Montante	4.68	3516.82	1.1	2,937	14.962	0.077
Mão Francesa	11.55	2548.42	1.1	26.751	0.853	0.032
Terça Lateral	11.55	2548.42	1.1	26.751	0.220	0.008

Agulhas	2.97	2548.42	1.1	6.874	0.063	0.009
Contraventamento	0.32	3516.82	1.1	1.012	0.373	0.368

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5: Resistencia a tração para galpão com treliça em arco de Pratt.

Componente	A	f_y	γ	N_{t,Rd}	N_{t,Sd}	n
	(cm²)	(kgf/cm²)		(t)	(t)	
Terça Superior	11.55	2548.42	1.1	26.751	0.041	0.002
Banzo	17.54	2548.42	1.1	40.628	22,346	0.033
Diagonais	8.76	3516.82	1.1	28.007	9,390	0.080
Montante	8.76	3516.82	1.1	28.007	0.704	0.025
Mão Francesa	11.55	2548.42	1.1	26.751	0.243	0.009
Terça Lateral	11.55	2548.42	1.1	26.751	0.084	0.003
Agulhas	2.97	2548.42	1.1	6.874	0.110	0.016
Contraventamento	0.32	3516.82	1.1	1.012	0.460	0.454

Fonte: Próprio autor.

7.4.2 Resistencia à compressão

Seguindo o prescrito no item 9.1.2 da tabela 4 da ABNT NBR 14762, os elementos formados a frio comprimidos com ambas as bordas vinculadas devem ter sua relação largura-espessura não superior a valores preestabelecidos. Para as almas do componente estrutural esse valor não pode ser superior a 500 e para as mesas inferior a 60. Essa relação para os elementos formados a frio, terças, banzos e mão francesa dos galpões são mostradas nas tabelas seguintes:

Tabela 6: Relação entre o comprimento efetivo e a espessura para o galpão com tesoura tipo Pratt.

Componente	b (alma)	b (mesa)	t	$\frac{b_a}{t} \leq 500$	$\frac{b_m}{t} \leq 60$
	(comprimento)	(comprimento)	(espessura)		
Terça superior	187.84	62.84	3.04	62	21
Banzo	180.96	55.96	4.76	38	12
Mão Francesa	187.84	62.84	3.04	62	21

Terça Lateral	187.84	62.84	3.04	62	21
----------------------	--------	-------	------	----	----

Fonte: Próprio autor

Tabela 7: Relação entre o comprimento efetivo e a espessura para o galpão com treliça em arco.

Componente	b (alma) (comprimento)	b (mesa) (comprimento)	t (espessura)	$\frac{b_a}{t} \leq 500$	$\frac{b_m}{t} \leq 60$
Terça superior	187.84	62.84	3.04	62	21
Banzo	180.96	55.96	4.76	38	12
Mão Francesa	187.84	62.84	3.04	62	21
Terça Lateral	187.84	62.84	3.04	62	21

Fonte: Próprio autor

Outro aspecto importante para as peças comprimidas se dá pela limitação do índice de esbeltez. Este índice não deve exceder o valor de 200 e é dado pela seguinte expressão:

$$\lambda = \frac{KL}{r} < 200$$

Sendo:

KL = comprimento efetivo de flambagem no eixo considerado

r = raio de giração no eixo considerado

Para todos os componentes do galpão os valores de λ estão reunidos na tabela a seguir.

Tabela 8: Valores do comprimento índice de esbeltez para o galpão com tesoura tipo Pratt.

Componente	K_xL_x (m)	K_yL_y (m)	r_x (cm)	r_y (cm)	λ_{xx}	λ_{yy}
Terça Superior	5	2.5	7.8	2.76	64.1	90.4
Banzo Inferior	4	1	7.68	2.67	52.1	37.1
Banzo Superior	2	1	7.68	2.67	26	37.7
Diagonal	1.5	1	1.487	1.487	75.1	148.8
Montante	1.1	1.1	1.98	1	55.5	110.1
Mão Francesa	1.4	1.4	7.8	2.76	18.1	51.2

Terça Lateral	5	2.5	7.8	2.76	64.1	90.4
Agulhas	2.5	2.5	2.99	1.27	83.6	196.9
Pilar	12	2.5	8.81	48.9	181.7	48.9

Fonte: Próprio autor

Tabela 9: Valores do índice de esbeltez para o galpão com treliça em arco.

Componente	K_xL_x	K_yL_y	r_x	r_y	λ_{xx}	λ_{yy}
	(m)	(m)	(cm)	(cm)		
Terça Superior	5	5	7.80	2.76	64.1	180.8
Banzo Inferior	2	1	7.68	2.67	26.0	37.5
Banzo Superior	4	1	7.68	2.67	52.1	37.5
Diagonal	1.35	1.35	1.89	0.99	71.4	136.7
Montante	1	1	1.89	0.99	52.8	101.1
Mão Francesa	1.41	1.41	7.80	2.76	18.1	51.0
Terça Lateral	5	2.5	7.80	2.76	64.1	90.4
Agulhas	2.5	2.5	2.99	1.27	83.6	196.9
Pilar	2.5	12	9.25	5.32	175.9	47.0

Fonte: Próprio autor

A resistência a compressão deve satisfazer a relação expressa a seguir entre a força de compressão solicitante de cálculo ($N_{c,Sd}$) e a resistência a compressão de cálculo ($N_{c,Rd}$).

$$n = \frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

O valor de $N_{c,Rd}$ para as terças, banzos e mão francesa devem ser tomado como o menor valor de cálculo entre o início de ruptura da seção efetiva e a flambagem por distorção. Como todos os componentes estruturais não possuem as limitações geométricas expostas na tabela 11 da norma ABNT NBR 14762, será utilizado nos cálculos apenas o valor de $N_{c,Rd}$ para o início de ruptura da seção efetiva. Os resultados estão apresentados nas tabelas 10 e 11.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi A_{ef} f_y}{\gamma}$$

Para as diagonais, montantes e os pilares a força axial de compressão resistente de cálculo é dada por:

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

Sendo:

Q: fator de redução total associado à resistência a compressão.

A_g: área bruta da seção transversal da barra.

χ = fator de redução associado à flambagem.

A_{ef} = área efetiva da seção transversal da barra.

γ = coeficiente de ponderação das resistências.

f_y = tensão de escoamento.

Tabela 10: Resistencia à compressão para galpão com tesoura tipo pratt.

Componente	χ	Q	A (cm ²)	γ	f _y (Kgf/cm ²)	N _{c,Rd}	N _{c,Sd} (t)	n
Terça Superior	0.57	-	10.51	1,2	2548.42	12,777	0.002	0.001
Banzo	0.91	-	17.54	1.2	2548.42	33.733	22,758	0.675
Diagonal	0.23	1	4.68	1.1	3516.82	3.389	2,942	0.868
Montante	0.41	1	4.68	1.1	3516.82	6.160	6,081	0.987
Mão francesa	0.85	-	10.11	1.2	2548.42	18.185	0.220	0.012
Terça Lateral	0.57	-	10.51	1.2	2548.42	12.770	0.315	0.025
Pilar	0.27	1	58.55	1.1	3516.82	50.668	3.115	0.061

Fonte: Próprio autor.

Tabela 11: Resistencia à compressão para galpão com treliça em arco.

Componente	χ	Q	A (cm ²)	γ	f _y (Kgf/cm ²)	N _{c,Rd}	N _{c,Sd} (t)	n
Terça Superior	0.33	-	11.55	1.2	2548.42	8.077	0.134	0.017

Banzo	0.42	-	17.54	1.2	2548.42	33,758	27,933	0,827
Diagonal	0.27	1	8.76	1.1	3516.82	7.519	2,942	0.021
Montante	0.47	1	8.76	1.1	3516.82	13.256	6,081	0.002
Mão	0.85	-	11.55	1.2	2548.42	18.199	1.155	0.063
francesa								
Terça	0.57	-	11.55	1.2	2548.42	0.617	12.770	0.048
Lateral								
Pilar	0.17	1	110.90	1.1	3516.82	3.297	59.520	0.055

Fonte: Próprio autor.

7.4.3 Resistência à flexão

A resistência à flexão dos elementos devem ser calculados em relação ao eixo x e y, devendo satisfazer:

$$n = \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \leq 1$$

Sendo:

M_{Sd} = momento fletor solicitante de cálculo.

M_{Rd} = momento fletor resistente de cálculo.

O momento fletor resistente de cálculo para terças e banzos deve ser tomado pelo menor valor entre o cálculo da resistência para o início de escoamento da seção efetiva, resistência a flambagem lateral com torção e a flambagem por distorção. Como não é possível calcular o momento da flambagem por distorção, devido ao não cumprimento das limitações geométricas expostas na norma, será considerada apenas as outras duas.

Início de escoamento da seção efetiva, item 9.8.2.1 da ABNT NBR 1476.

$$M_{rd} = \frac{W_{eff} f_y}{\gamma}$$

Flambagem lateral com torção, item 9.8.2.2 da ABNT NBR 1476.

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} W_{c,ef} f_y}{\gamma}$$

O resultado para os elementos são:

Tabela 12: Valores de flexão em relação ao eixo x e y do galpão com tesoura tipo Pratt para elementos formados a frio.

Componente	χ_{FLT}	$W_{c,ef}$ (cm ²)	γ	f_y (Kgf/cm ²)	$M_{rd(x)}$ (t.m)	$M_{Rd(x)}$ (t.m)	$M_{sd(x)}$ (t.m)	$M_{rd(y)}$ (t.m)	$M_{sd(y)}$ (t.m)	$n_{(y)}$	$n_{(x)}$
Terça Superior	0.9	70.19	1,1	2548.42	1.626	1.478	0.898	0.395	0.082	0.207	0.607
Banzo	1.0	103.54	1.1	2548.42	2.399	2.339	0.011	0.557	0.334	0.600	0.005
Terça Lateral	0.9	70.19	1.1	2548.42	1.626	1.478	1.289	0.381	0.154	0.405	0.873

Fonte: Próprio autor.

Tabela 13: Valores de flexão em relação ao eixo x e y do galpão com treliça em arco para elementos formado a frio.

Componente	χ_{FLT}	$W_{c,ef}$ (cm ²)	γ	f_y (Kgf/cm ²)	$M_{rd(x)}$ (t.m)	$M_{Rd(x)}$ (t.m)	$M_{sd(x)}$ (t.m)	$M_{rd(y)}$ (t.m)	$M_{sd(y)}$ (t.m)	$n_{(y)}$	$n_{(x)}$
Terça Superior	0.6	70.19	1.1	2548.42	1.626	1.026	0.982	0.381	0.018	0.049	0.957
Banzo	1.0	103.54	1.1	2548.42	2.399	2.399	0.101	0.557	0.054	0.098	0.042
Mão Francesa	1.0	70.19	1.1	2548.42	1.626	1.626	0.014	0.395	0.061	0.154	0.009
Terça Lateral	0.9	70.19	1.1	2548.42	1.626	1.478	0.821	0.381	0.371	0.974	0.556

Fonte: Próprio autor.

Para as diagonais e os pilares o momento deve ser tomado entre o menor valor dentre as seguintes expressões:

- Máximo momento fletor resistente de cálculo, item 5.4.2.2 da ABNT NBR 8800.

$$M_{fRd} = \frac{1,50W_u f_y}{\gamma}$$

- Estado limite último de flambagem lateral com torção, anexo G da ABNT NBR 8800.

$$M_{lRd} = \left(1,92 - 1,17 \sqrt{\frac{0,8W_u f_y}{\frac{0,46Eb^2t^2C_b}{L_b}}} \right) \frac{M_u}{\gamma_{a1}} \leq \frac{1,50M_u}{\gamma_{a1}}$$

Tabela 14: Valores de flexão em relação ao eixo x e y do galpão com tesoura de Pratt para elementos não formados a frio.

Componente	γ_{a1}	f_y (Kgf/cm ²)	$M_{fRd(x)}$ (t.m)	$M_{lRd(x)}$ (t.m)	$M_{Sd(x)}$ (t.m)	$M_{fRd(y)}$ (t.m)	$M_{Sd(y)}$ (t.m)	$n(y)$	$n(x)$
Diagonal	1,1	3516.82	0.244	0.155	0.001	0.119	0.001	0.006	0.005
Pilar	1.1	3516.82	21.489	15.477	6.936	7.245	0.705	0.097	0.448

Fonte: Próprio autor

Tabela 15: Valores de flexão em relação ao eixo x e y do galpão com tesoura de Pratt para elementos não formados a frio.

Componente	γ_{a1}	f_y (Kgf/cm ²)	$M_{fRd(x)}$ (t.m)	$M_{lRd(x)}$ (t.m)	$M_{Sd(x)}$ (t.m)	$M_{fRd(y)}$ (t.m)	$M_{Sd(y)}$ (t.m)	$n(y)$	$n(x)$
Diagonal	1.1	3516.82	0.420	0.328	0.001	0.209	0.001	0.006	0.004
Pilar	1.1	3516.82	41.035	31.466	4.200	14.405	0.628	0.044	0.343

Fonte: Próprio autor

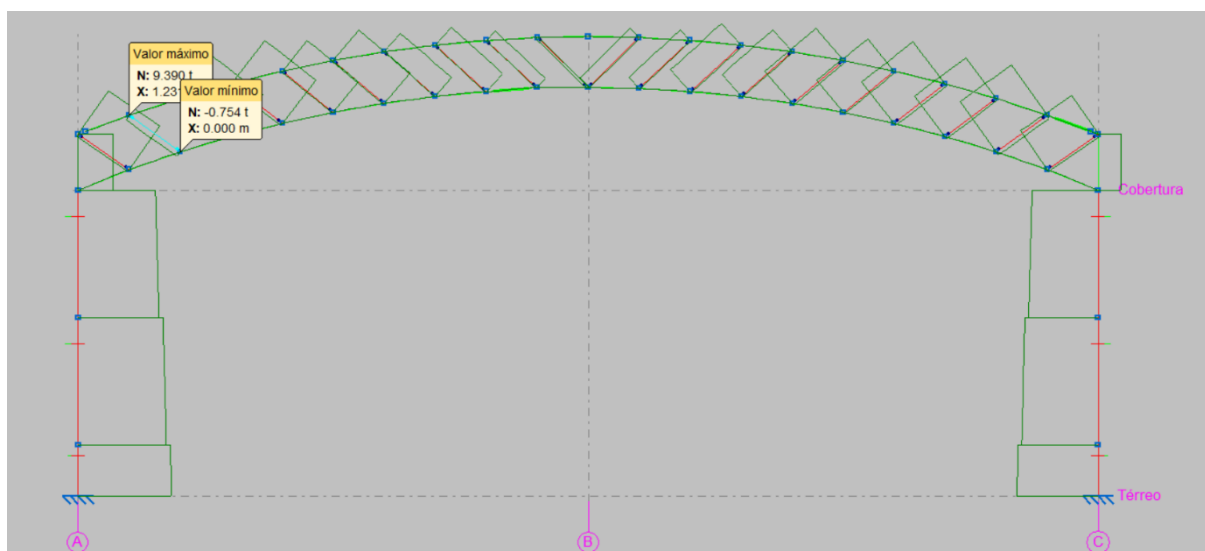
8 ANÁLISE DE RESULTADOS

8.1 RESULTADOS À TRAÇÃO

8.1.1.1 Galpão em Arco de Pratt

Na análise dos esforços de tração na treliça em Arco de Pratt é verificado que os elementos responsáveis por resistir a esse esforço são a diagonal e o banzo inferior. As diagonais próximas ao apoio são as que mais resistem a tração e o banzo tem a maior solicitação no meio do vão. A combinação de ações que gerou o maior esforço de tração nas diagonais e no banzo inferior foi a que considera o vento a 90° como carga principal. A tração máxima obtida para a diagonal foi de 9,390t e para o banzo a tração máxima foi de 22,346t.

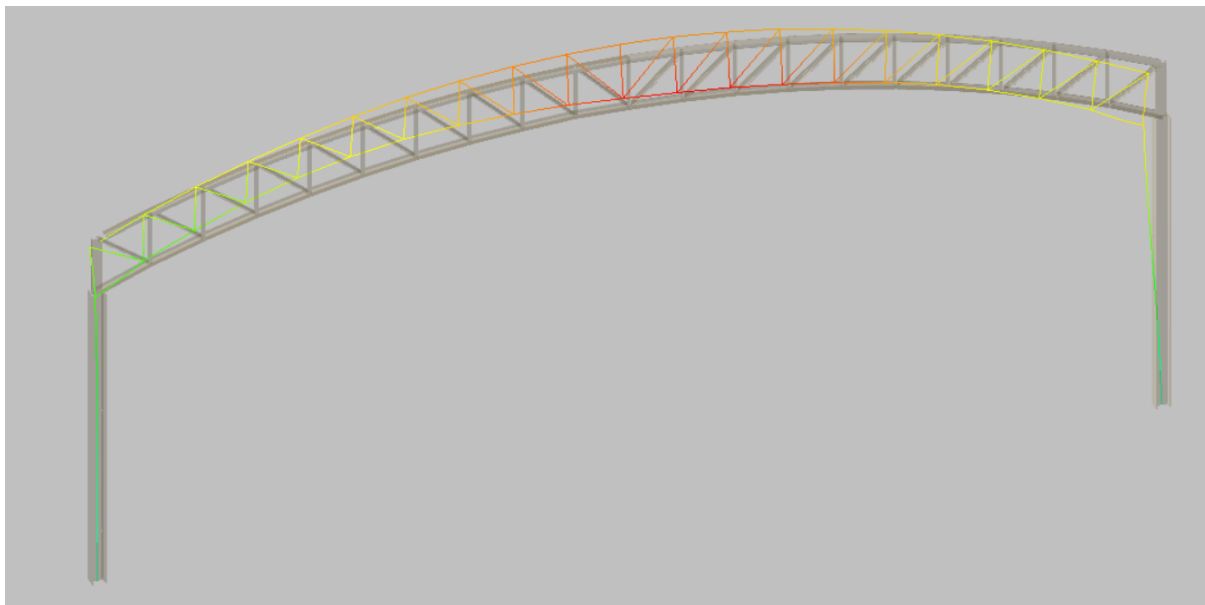
Figura 33: Tração nas diagonais da treliça em arco de Pratt. Os montantes foram retirados para melhor visualização dos diagramas.



Fonte: Próprio Autor.

Verificando a deformação da estrutura devido as cargas de pressão mostradas na figura 28, com o vento incidindo a 90°, verifica que na cobertura a força de sucção é predominante, incidindo de forma perpendicular na geratriz da cobertura, com valor máximo de 920N/m². A alta força de sucção na cobertura causa um efeito de empuxo apontada para o ambiente externo, semelhante a uma força querendo arrancar o galpão do solo, isto amplifica os esforços de tração nos elementos da cobertura, chegando num momento que esses esforços ultrapassam o peso próprio da estrutura, deformando a treliça para cima.

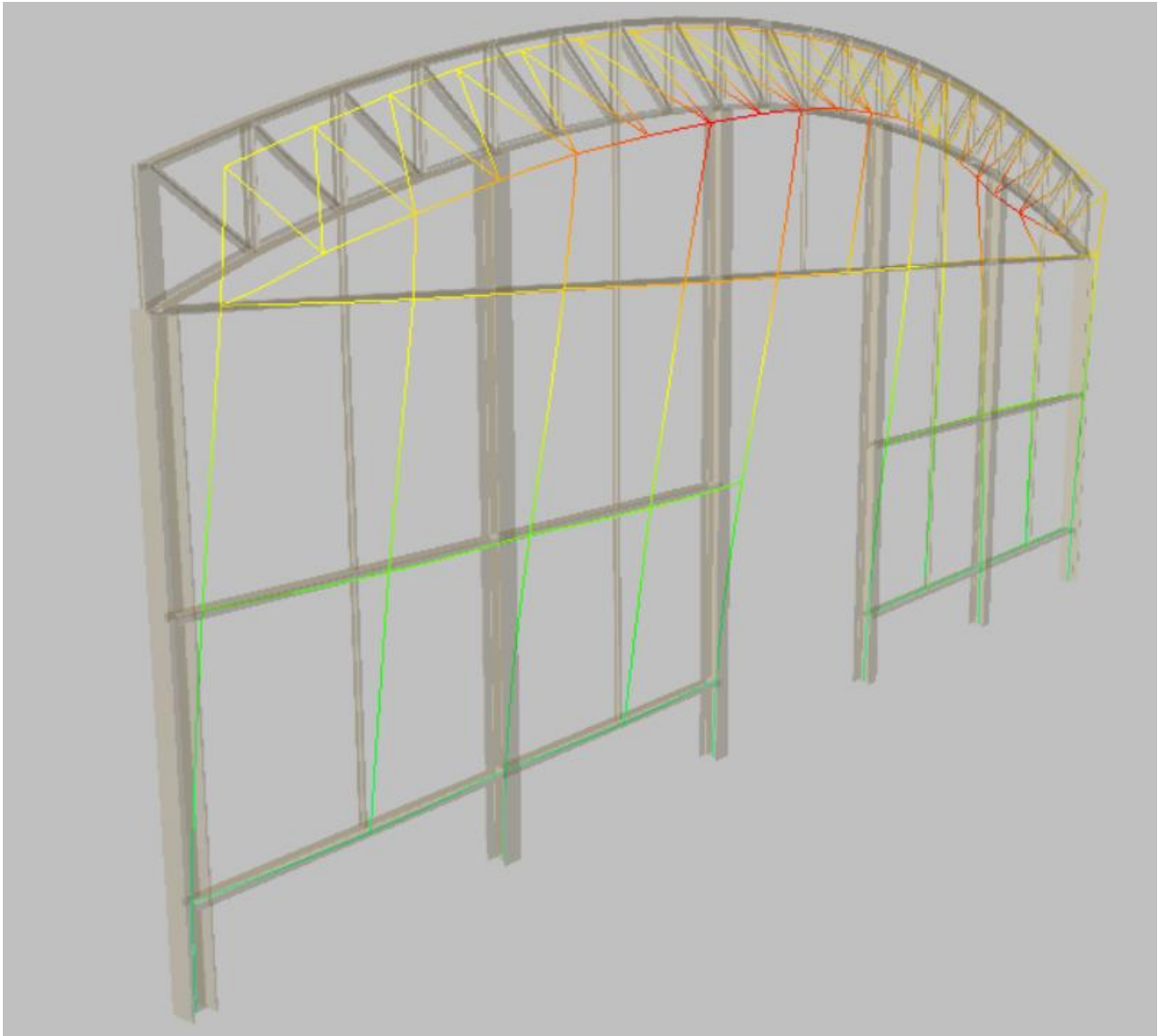
Figura 34: Deformação da treliça devido a força de sucção.



Fonte: Próprio Autor.

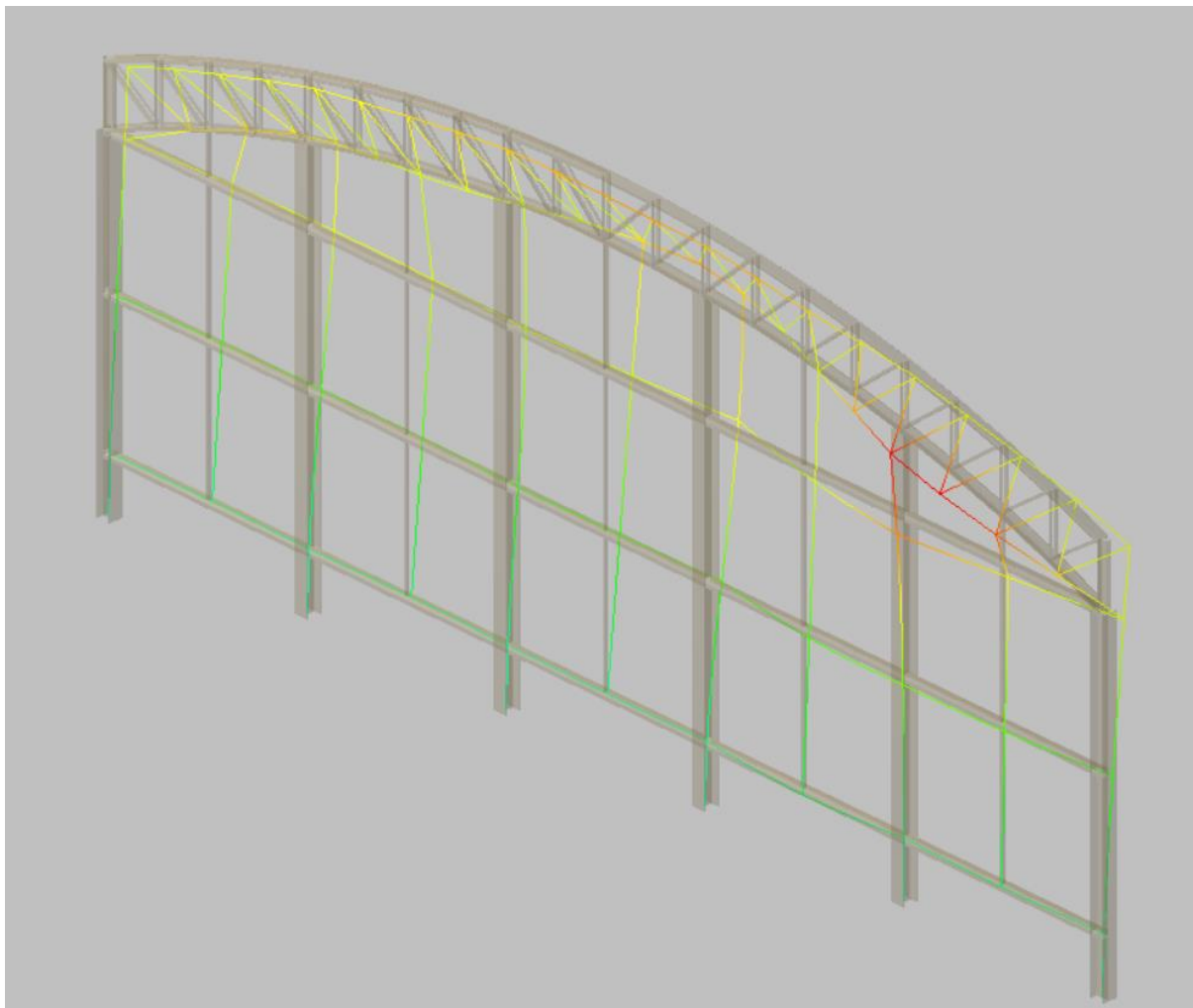
Examinando o que a força do vento a 90° produz na estrutura da parte frontal e posterior do galpão, nota que há esforços de sobrepressão e sucção com mesmo valor de 110N/m^2 em ambos os lados do galpão, deformando os elementos que apresentam sucção em direção ao ambiente exterior e os que apresentam sobrepressão em direção ao interior do galpão.

Figura 35: Deformação da face frontal do galpão



Fonte: Próprio Autor.

Figura 36: Deformação da face posterior do galpão.



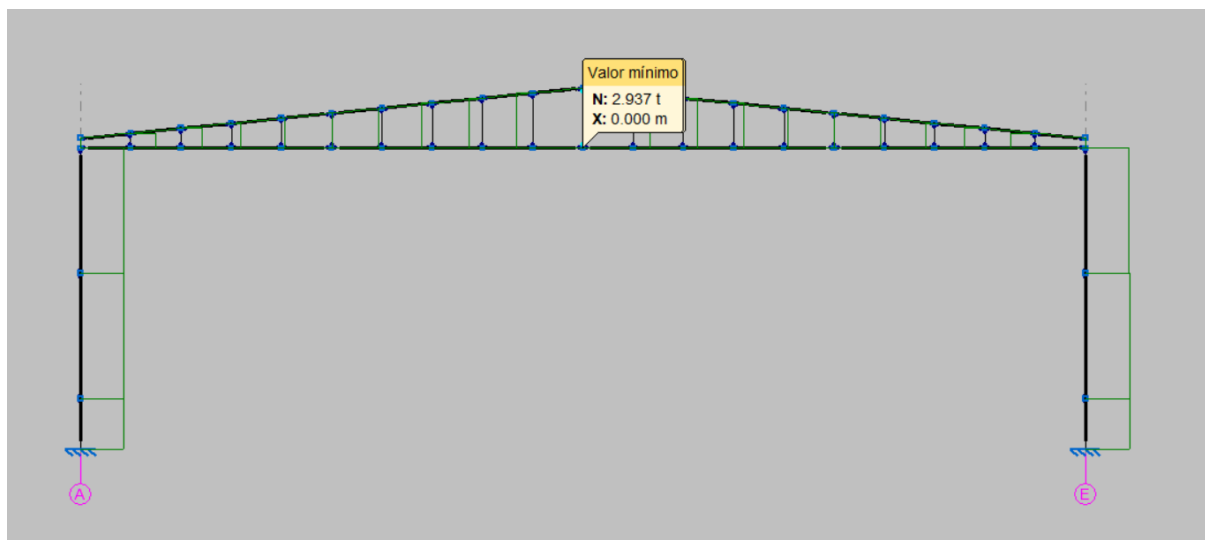
Fonte: Próprio Autor.

Dentre os elementos que compõe a estrutura frontal e posterior do galpão, o único que resiste apenas a esforços de tração são as correntes. Os outros elementos como as terças e pilares ora estão sendo mais solicitados a tração, ora a compressão.

8.1.1.2 Galpão em Treliça de Pratt

Na treliça tesoura de Pratt, devido seu aspecto geométrico os elementos responsáveis por resistir aos esforços de tração são os montantes e o banzo inferior. Os maiores esforços de tração estão localizados no montante do meio do vão e nos extremos do banzo inferior. A combinação que gerou maior esforço de tração nos montantes e no banzo inferior foi a combinação que considera o vento a 0° como carga principal. A tração máxima obtida para o montante foi de 2,937t e para o banzo inferior 26,265t.

Figura 37: Tração nos montantes do galpão com tesoura de Pratt. As diagonais foram retiradas para melhor visualização dos diagramas.



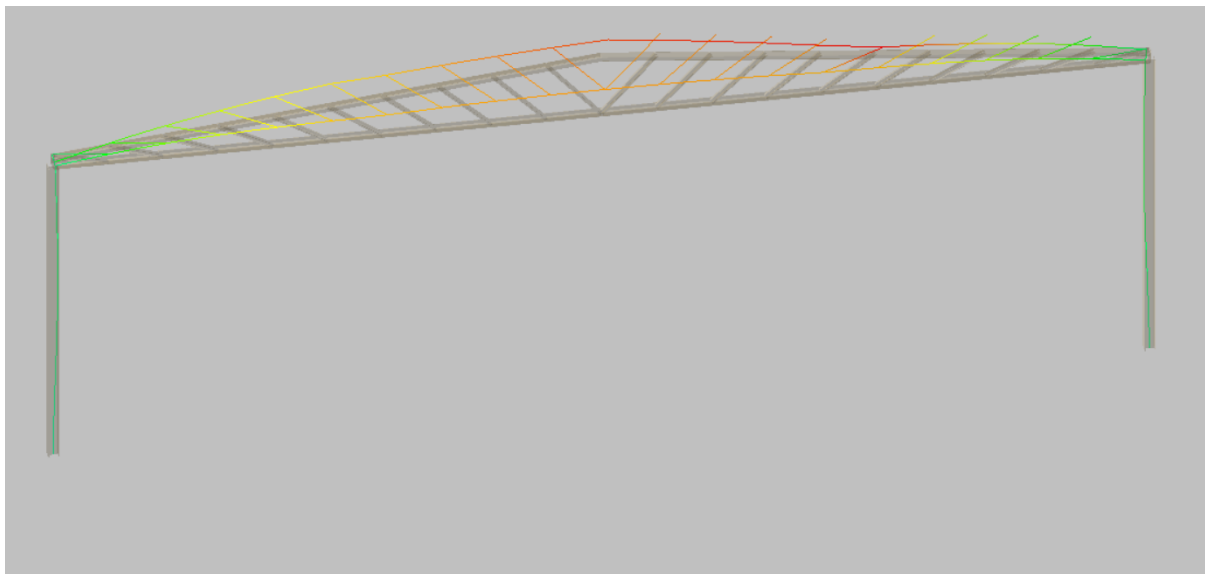
Fonte: Próprio Autor.

Analisando as cargas de pressão mostradas na figura 28, com o vento incidindo a 0° verifica que na cobertura a força que mais influência por área é a força de sucção, estando presente na parte frontal do telhado com valores máximos de 920N/m^2 .

Assim como ocorre na treliça em arco de Pratt, a alta força de sucção na cobertura causa um efeito de empuxo apontada para o ambiente externo, semelhante a uma força querendo arrancar o galpão do solo, isto amplifica os esforços de tração nos elementos da cobertura, chegando num momento que esses esforços ultrapassam o peso próprio da estrutura deformando a treliça para cima.

Figura 34: Deformação da treliça devido a força de sucção.

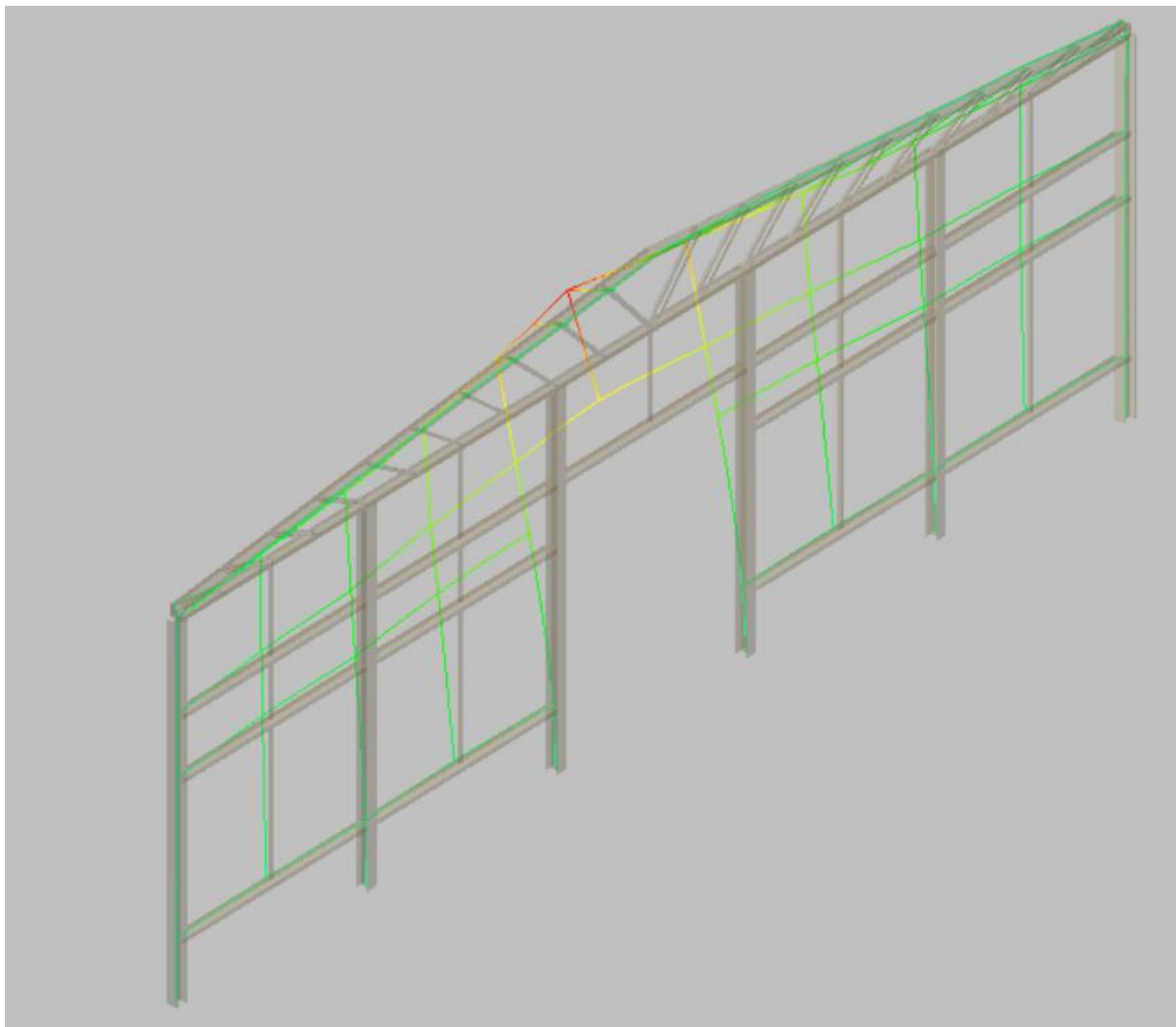
Figura 38: Deformação da treliça devido a força de sucção.



Fonte: Próprio Autor.

Assim como ocorre no galpão em arco de Pratt, a força do vento a 0° produz na estrutura da parte frontal um esforço de sobrepressão com valor de 630N/m^2 , deformando os elementos em direção ao interior do galpão.

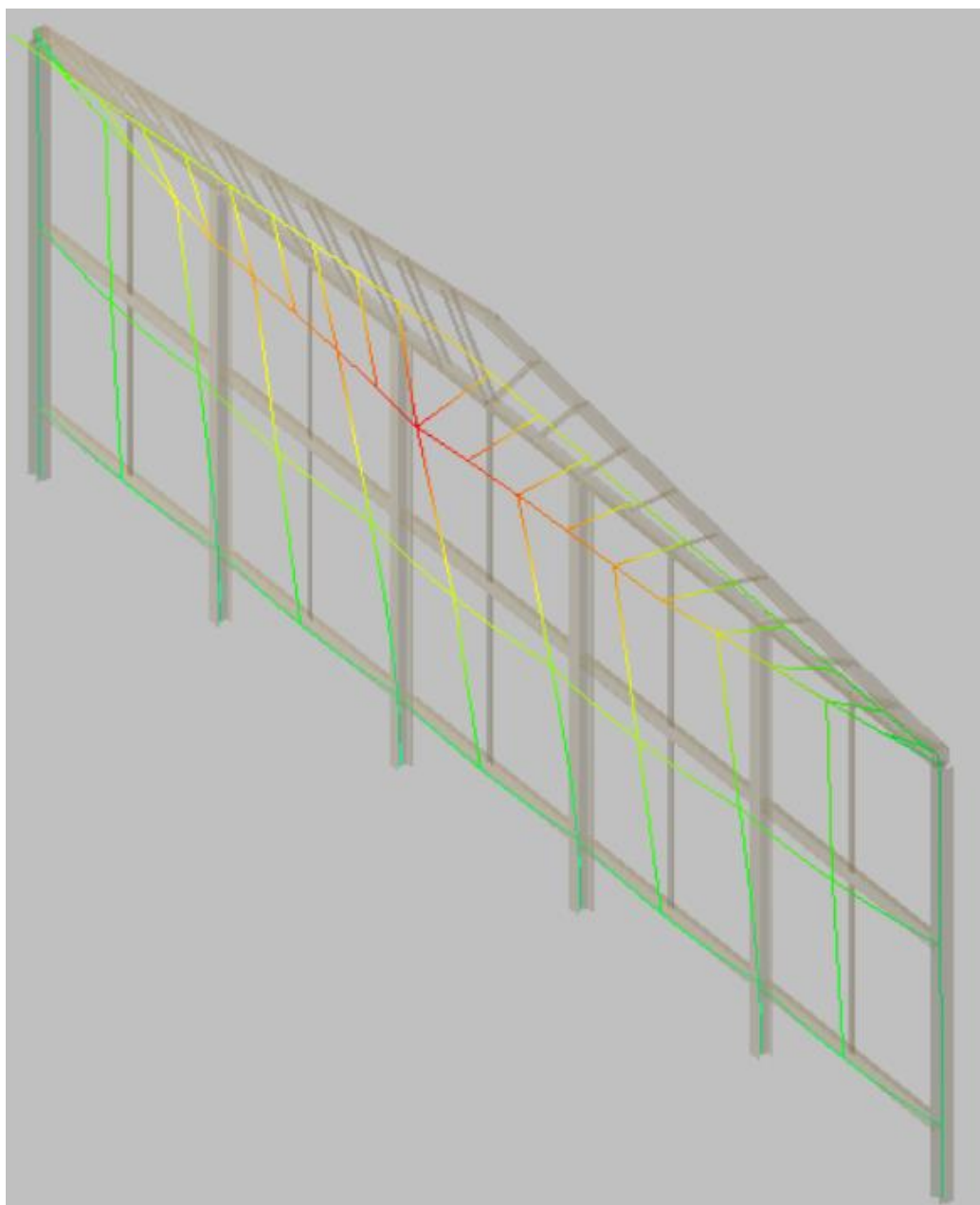
Figura 39: Deformação da face frontal do galpão.



Fonte: Próprio Autor.

Já na parte posterior do galpão ocorre sucção, causando uma força nos elementos que fazem eles deformarem para o lado externo.

Figura 40: Deformação da face posterior do galpão.



Fonte: Próprio Autor.

Quando se analisa a deformação da estrutura lateral dos dois galpões, percebe-se que considerando o mesmo ângulo de incidência de vento como carga principal a deformação e esforços serão semelhantes. Isso se deve aos esforços do vento serem iguais nos planos laterais dos dois galpões.

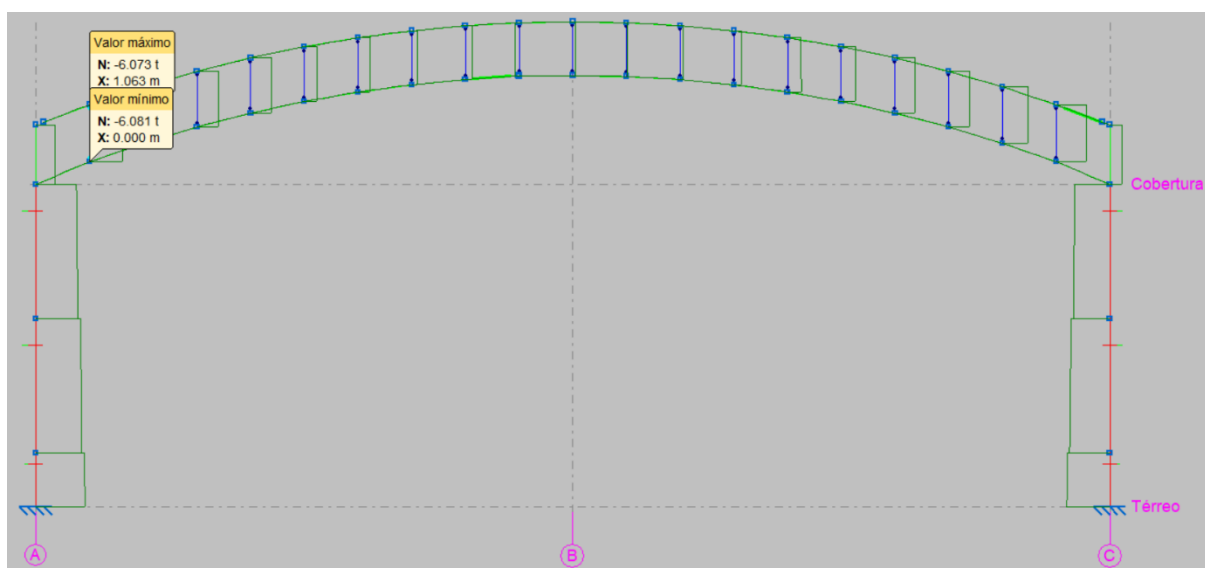
8.2 RESULTADOS À COMPRESSÃO

8.2.1.1 Galpão em Arco de Pratt

Na análise dos esforços de compressão na treliça em arco de Pratt é verificado que os elementos responsáveis por resistir a esse esforço são os montantes e o banzo superior. Os montantes próximos ao apoio são os que mais resistem a compressão e o banzo superior tem a maior solicitação de compressão no meio do vão.

A combinação de ações que gerou o maior esforço de compressão nos montantes e banzo superior foi a que considera o vento a 90° como carga principal. A compressão máxima obtida para o montante foi de 6,081t, para o banzo superior compressão máxima de 27,933t.

Figura 41: Compressão nos montantes do galpão em Arco de Pratt.



Fonte: Próprio Autor.

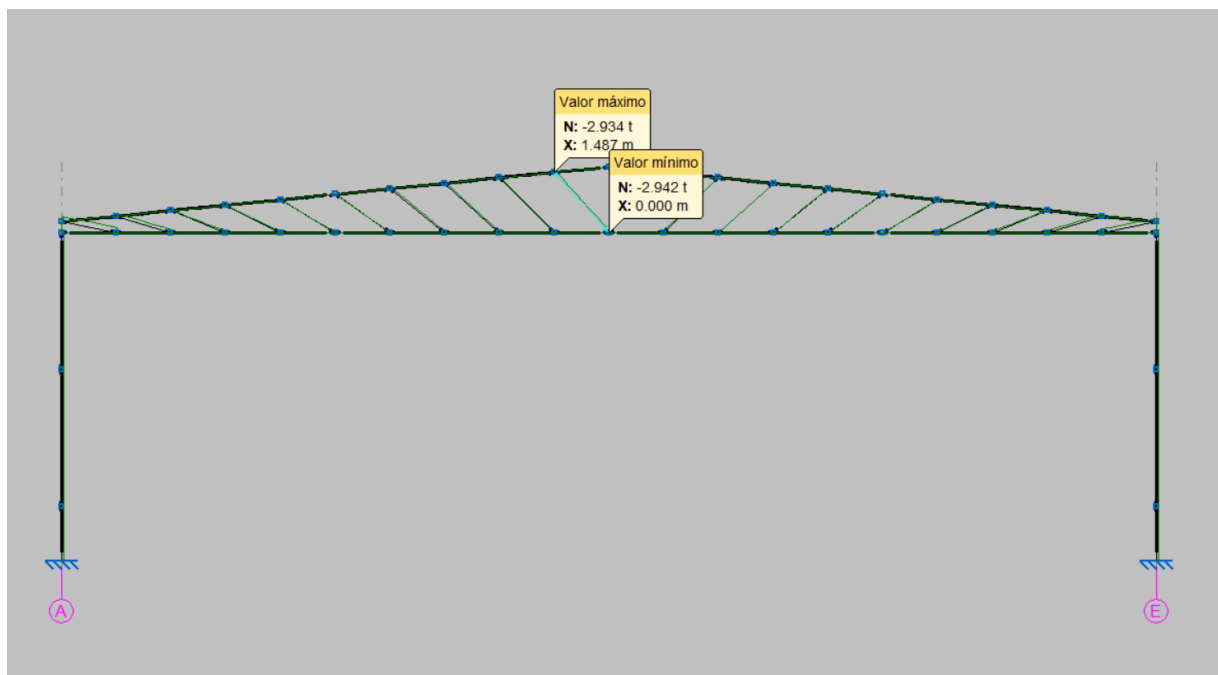
A deformação da treliça é a mesma da figura 34.

8.2.1.2 Galpão em Tesoura de Pratt

Na treliça tesoura de Pratt os elementos responsáveis por resistir aos esforços de compressão são as diagonais e o banzo superior. Os maiores esforços de compressão estão localizados nas diagonais do meio do vão e nos extremos do banzo superior. A combinação que gerou maior

esforço de compressão foi a combinação que considera o vento a 90° como carga principal. A compressão máxima obtida para a diagonal foi de 2,942t e para o banzo superior 22,758t.

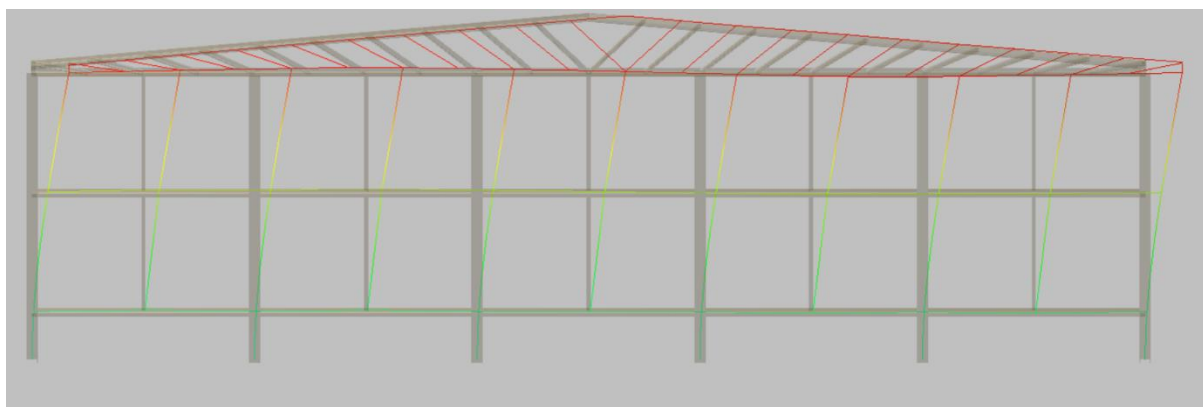
Figura 42: Compressão nas diagonais do galpão com treliça de Pratt.



Fonte: Próprio Autor.

O vento incidindo a 90° na cobertura gera no plano esquerdo da cobertura uma sobrepressão de 110N/m² e uma sucção de 230 N/m² no plano direito. Enquanto a sucção amplifica os esforços de tração nos elementos da cobertura, a sobrepressão intensifica os esforços de compressão.

Figura 43: Compressão nos montantes do galpão com treliça de Pratt.



Fonte: Próprio Autor.

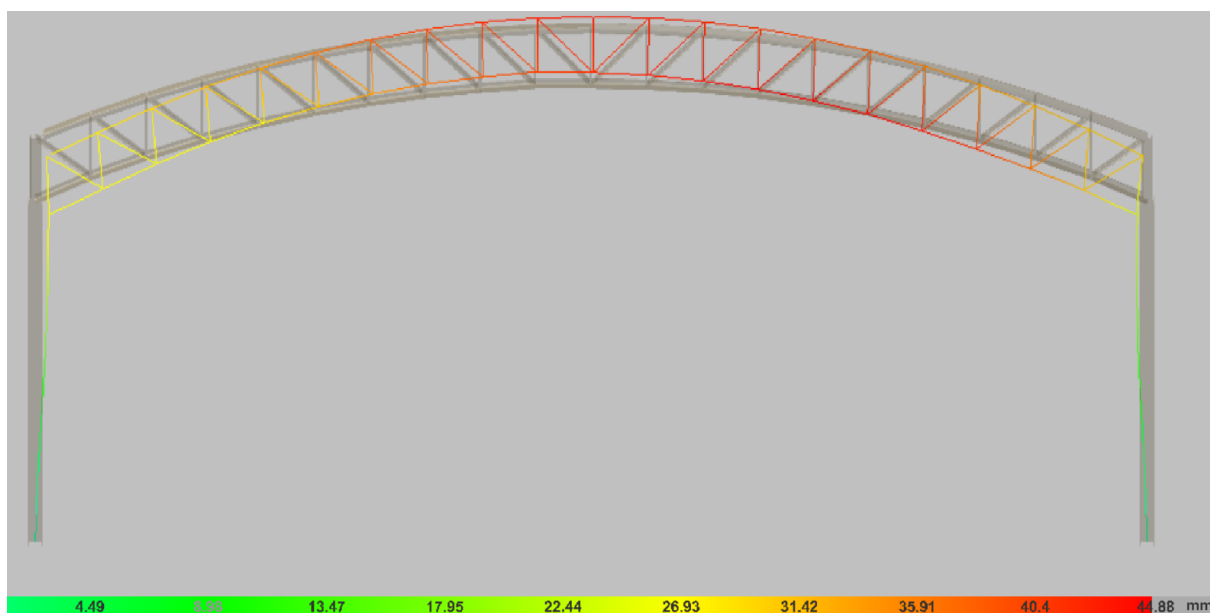
8.3 FLECHA MÁXIMA

8.3.1.1 Galpão em Arco de Pratt

A flecha das treliças aumenta gradativamente do apoio em direção ao meio do vão. De acordo com a norma NBR 8800/08 a flecha máxima para vigas da cobertura é igual a $L/250$. Como o vão é de 20 metros, a flecha máxima permitida é de 8 cm.

Na treliça em arco de Pratt o deslocamento máximo foi alcançado na combinação que considera o vento a 90° como principal, resultando em uma flecha de 4,48 cm, dentro das exigências.

Figura 44: Flecha máxima para a treliça no galpão em arco de Pratt.

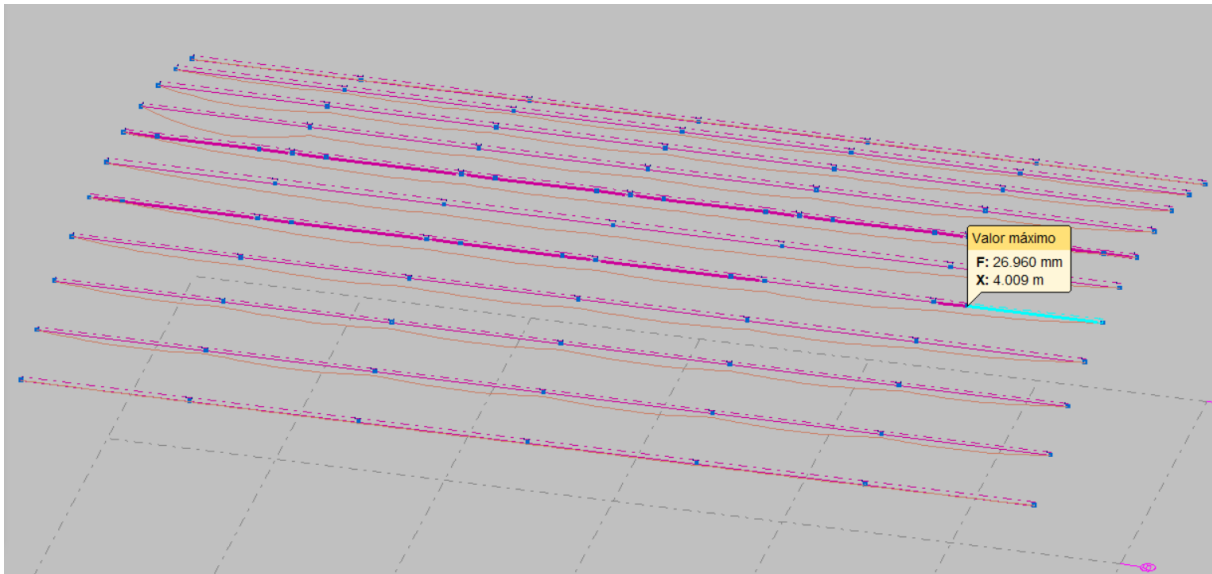


Fonte: Próprio Autor.

Na tabela C.1 da ABNT NBR 8800:2008 estabelece dois critérios distintos para o cálculo da flecha para as terças de cobertura. O primeiro restringe a flecha em $L/180$, somente com a incidência de ações variáveis de mesmo sentido que o da ação permanente. O segundo critério restringe o deslocamento a $L/120$ considerando apenas as ações variáveis de sentido oposto ao da ação permanente, ou seja, para o vento de sucção.

A flecha máxima para as terças de cobertura foi de 2,61cm, dentro do limite dos dois critérios.

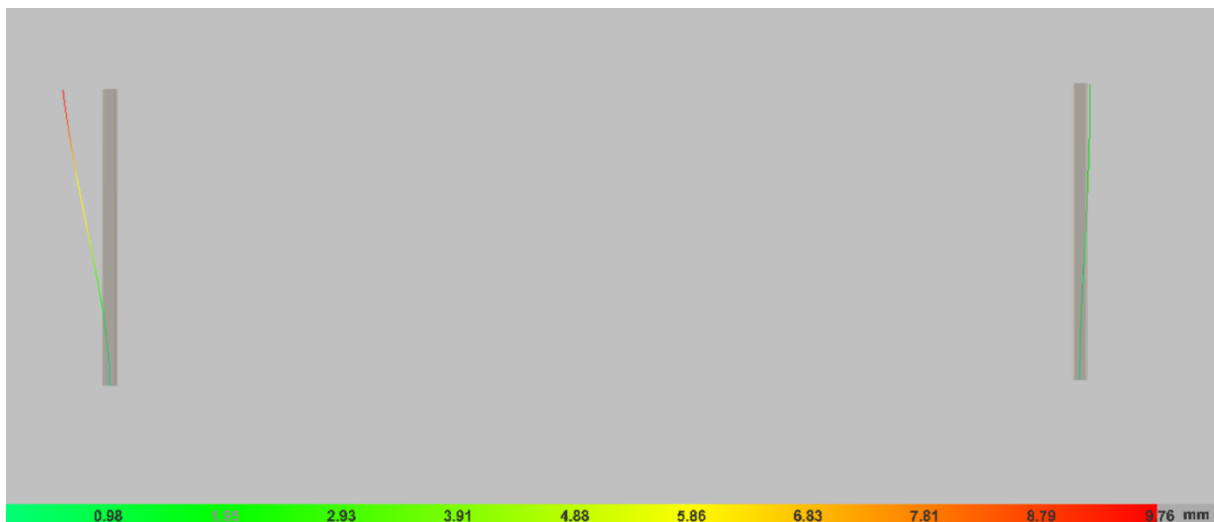
Figura 45: Flecha máxima das terças superiores no galpão em arco de Pratt.



Fonte: Próprio Autor.

O deslocamento máximo permitido entre o topo do pilar e a base é de $H/300$. Sendo assim, o valor limite da flecha para o pilar deve ser inferior a 2cm. O máximo alcançado foi cerca de 1cm, portanto dentro do limite.

Figura 46: Deslocamento do topo dos pilares para o galpão em arco de Pratt.

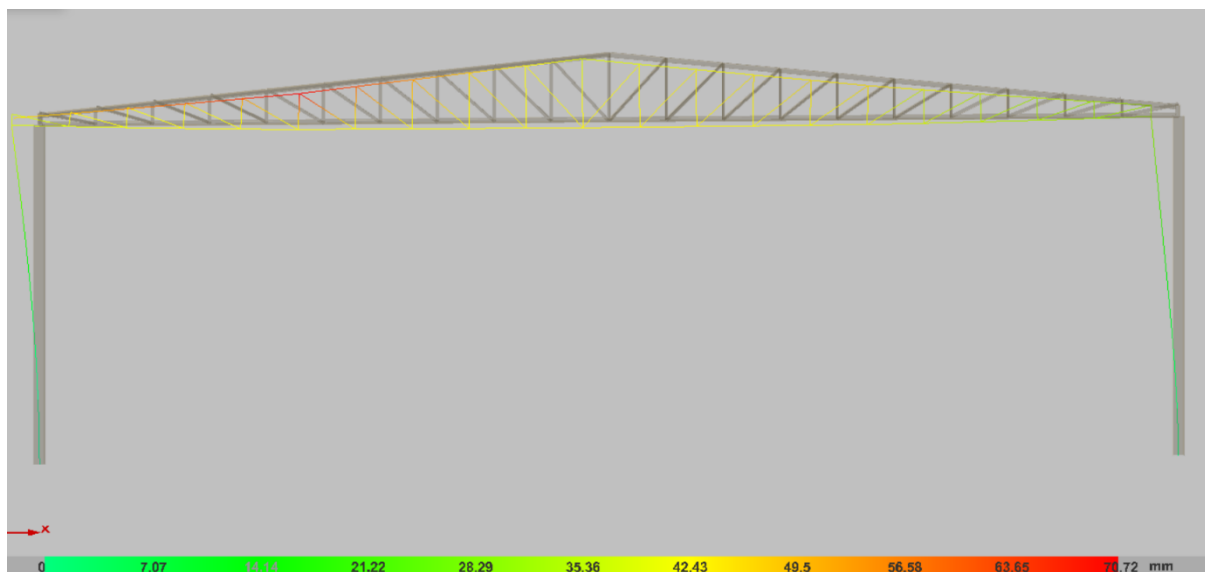


Fonte: Próprio Autor.

8.3.1.2 Galpão em Tesoura de Pratt

Na tesoura de Pratt o deslocamento máximo foi alcançado na combinação que considera o vento a 0° como principal, resultando em uma flecha de 7,02cm, dentro das exigências.

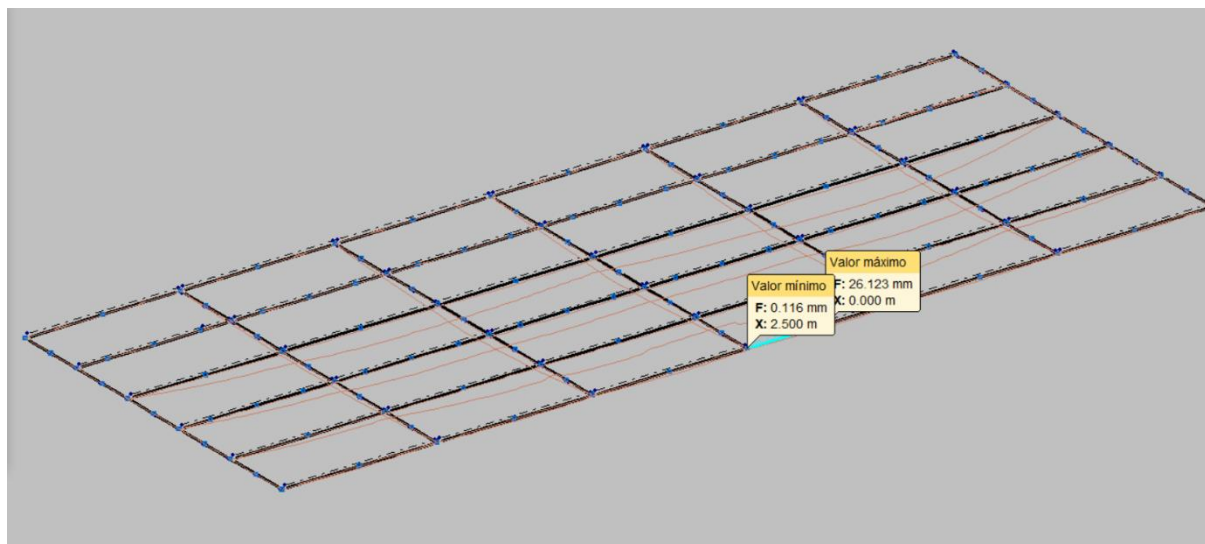
Figura 47: Flecha máxima para a treliça no galpão com tesoura de Pratt.



Fonte: Próprio Autor.

A flecha máxima para as terças de cobertura foi de aproximadamente 2,7cm.

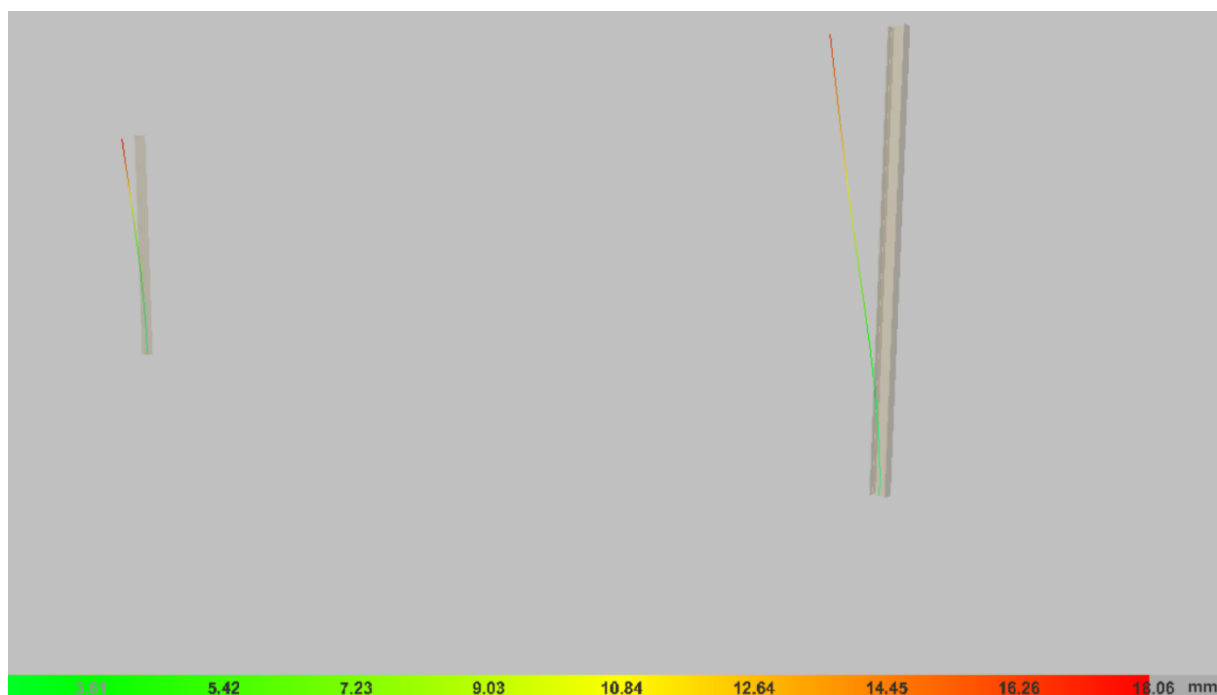
Figura 48: Flecha máxima das terças superiores no galpão com tesoura de Pratt.



Fonte: Próprio Autor.

O deslocamento máximo entre o topo do pilar e a base é de $H/300$. Sendo assim, o valor limite da flecha para o pilar deve ser inferior a 2cm. O máximo alcançado foi de aproximadamente 1,8 cm, portanto dentro do limite.

Figura 49: Deslocamento do topo dos pilares para o galpão em treliça de Pratt.



Fonte: Próprio Autor.

8.3.2 Consumo de aço

O quantitativo de material é fornecido pelo CypeCad 3D de forma automatizada, fornecendo as seguintes tabelas resumos de cada galpão:

Tabela 16: Resumo de material para o galpão com tesoura de Pratt.

Tabela resumo do Galpão com treliça com Tesoura de Pratt			
Material	Perfil	Comprimento (m)	Peso Total (Kg)
Tipo			
Aço laminado A-572 345MPa	W200X46.1	132,0	6067,0
	L 2 X 3/16	258,6	1900,2
	Barra redonda 1/4"	560,7	139,4
Aço dobrado A-36	C200X75X25X4.76	283,5	3902,7
	C200X75X25X3.04	663,9	6289,9
	U75X40X2.00	237,9	554,1

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 17: Resumo de material para o galpão com arco de Pratt.

Tabela resumo do Galpão com treliça em Arco de Pratt			
Material	Perfil	Comprimento (m)	Peso Total (Kg)
Aço laminado A-572 345MPa	L 2 x 3/16"	318.0	2286.8
	Barra redonda 1/4"	735.2	182.8
	W 250 x 115.0	145.1	16641.5
Aço dobrado A-36	C200X75X25X4.76	302.0	4157.5
	C200X75X25X3.04	750.1	6957.2
	U75X40X1.52	132.3	236.7

Fonte: Próprio Autor.

Através das tabelas de materiais geradas pelo programa foi realizado o orçamento dos materiais em três lojas de Goiânia e Região, apresentados a seguir: .

Na loja Metal Rápido situado no bairro Residencial Center Ville em Goiânia, o orçamento para os 2 galpões foi dado pelas tabelas 18 e 19.

Tabela 18: Orçamento para o galpão com tesoura de Pratt na primeira loja.

Tabela resumo do Galpão com treliça com Tesoura de Pratt			
Perfil	Peso Total (Kg)	Preço	
		Preço (kg)	Preço (total)
W200X46.1	6067,0	2,32	14.093,52
L 2 X 3/16	1900,2	12,76	24.246,68
1/4"	139,4	12,41	1.729,95
C200X75X25X4.76	3902,7	13,25	51.710,51
C200X75X25X3.04	6289,9	11,55	72.648,58
U75X40X2.00	554,1	12,17	6.745,32
			171174,6

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 19: Orçamento para o galpão com arco de Pratt na primeira loja.

Tabela resumo do Galpão com treliça em Arco de Pratt			
Perfil	Peso Total (Kg)	Preço	
		Preço (kg)	Preço (total)
L 2 x 3/16"	2.286,8	12,8	29.179,57
1/4"	182,8	12,4	2.268,18
W 250 x 115.0	16.641,5	2,0	33.615,85
C200X75X25X4.76	4.157,4	13,3	55.085,42
C200X75X25X3.04	6.957,2	11,6	80.355,66
U75X40X1.52	236,7	12,8	3.036,08
			203540,7

Fonte: Próprio Autor.

Na loja da Metal Forte, situada no endereço Km 8, Qd. 70-A - Vila Brasília, Aparecida de Goiânia, o orçamento dado para os galpões foi dado pelas tabelas 20 e 21.

Tabela 20: Orçamento para o galpão com treliça de Pratt na segunda loja.

Tabela resumo do Galpão com treliça com Tesoura de Pratt			
Perfil	Peso Total (Kg)	Preço	
		Preço (kg)	Preço (total)
W200X46.1	6067,0	2,2	13.247,79
L 2 X 3/16	1900,2	11,0	20.849,10
1/4"	139,4	10,8	1.498,55
C200X75X25X4.76	3902,7	11,2	43.620,25
C200X75X25X3.04	6289,9	10,7	67.207,80
U75X40X2.00	554,1	10,3	5.734,24
			152.157,74

Fonte: Próprio Autor

Tabela 21: Orçamento para o galpão com arco de Pratt na segunda loja.

Tabela resumo do Galpão com treliça em Arco de Pratt			
Perfil	Peso Total (Kg)	Preço	
		Preço (kg)	Preço (total)
L 2 x 3/16"	2.286,8	11,0	25.089,85

1/4"	182,8	10,8	1.964,78
W 250 x 115.0	16.641,5	2,0	32.662,29
C200X75X25X4.76	4.157,4	11,2	46.467,15
C200X75X25X3.04	6.957,2	10,7	74.337,68
U75X40X1.52	236,7	10,3	2.449,06
			182.970,82

Fonte: Próprio Autor

Na loja Ferreira Ferro e Aço, situada no endereço Av. Consolação, Cidade Jardim, Goiânia , o orçamento para os 2 galpões foi dado pelas tabelas 22 e 23.

Tabela 22: Orçamento para o galpão com treliça de Pratt na terceira loja.

Tabela resumo do Galpão com treliça com Tesoura de Pratt			
Perfil	Peso Total (Kg)	Preço	
		Preço (kg)	Preço (total)
W200X46.1	6067,0	2,225	13.498,96
L 2 X 3/16	1900,2	11,25	21.377,36
1/4"	139,4	11,06	1.541,76
C200X75X25X4.76	3902,7	11,58	45.193,03
C200X75X25X3.04	6289,9	10,87	68.371,43
U75X40X2.00	554,1	11,85	6.566,56
			156.549,11

Fonte: Próprio Autor

Tabela 23: Orçamento para o galpão com arco de Pratt na terceira loja.

Tabela resumo do Galpão com treliça em Arco de Pratt			
Perfil	Peso Total (Kg)	Preço	
		Preço (kg)	Preço (total)
L 2 x 3/16"	2286,8	11,25	25.726,50
1/4"	182,77	11,06	2.021,44
W 250 x 115.0	16641,51	1,989	33.099,96
C200X75X25X4.76	4157,39	11,58	48.142,58

C200X75X25X3.04	6957,2	10,87	75.624,76
U75X40X1.52	236,67	12,66	2.996,24
			187.611,48

Fonte: Próprio Autor

Para chegar no custo total de cada galpão foi feita a média de preço de cada elemento estrutural nas lojas pesquisadas, obtendo como custo de cada galpão:

Tabela 24: Custo médio do material para o galpão com tesoura de Pratt.

Tabela resumo do Galpão com treliça com Tesoura de Pratt			
Perfil	Peso Total (Kg)	Preço Médio	
		Preço (Kg)	Preço (total)
W200X46.1	6.067,0	2,2	13.613,4
L 2 X 3/16	1.900,2	11,7	22.157,7
1/4"	139,4	11,4	1.590,1
C200X75X25X4.76	3.902,7	12,0	46.841,3
C200X75X25X3.04	6.289,9	11,0	69.409,3
U75X40X2.00	554,1	11,5	6.348,7
			159.960,5

Fonte: Próprio Autor

Tabela 25: Custo médio do material para o galpão com arco de Pratt.

Tabela resumo do Galpão com treliça em Arco de Pratt			
Perfil	Peso Total (Kg)	Preço Médio	
		Preço (kg)	Preço (total)
L 2 x 3/16"	2286,8	11,7	26665,3
1/4"	182,8	11,4	2084,8
W 250 x 115.0	16641,5	2,0	33126,0
C200X75X25X4.76	4157,4	12,0	49898,4
C200X75X25X3.04	6957,2	11,0	76772,7
U75X40X1.52	236,7	11,9	2827,1
			191.374,4

Fonte: Próprio Autor

A diferença de custos foi bastante considerável entre os dois galpões, alcançando uma diferença total de R\$ 31.413,88.

Entre os elementos que apresentarão maiores impacto no orçamento são os pilares e as terças de cobertura. A diferença de custos entre os pilares foi de R\$ 19.512,61, essa desproporção se deve aos pilares do galpão com treliça em arco de Pratt terem dimensões e peso maior que os pilares usados no galpão com treliça em arco de Pratt.

Embora o perfil das terças de cobertura seja idêntica para os dois galpões analisados, a forma em curva da cobertura do galpão em arco de Pratt exige que mais material seja empregado na execução, atingindo uma diferença de custo de R\$ 7.363,44.

9 CONCLUSÃO

Ao analisar as duas tipologias de galpões, um formado com a treliça em arco de Pratt e o outro formado pela treliça tipo tesoura de Pratt, com as dimensões 20x30x6m e finalidade comercial, observa-se que em relação ao custo o galpão com tesoura de Pratt se apresentou como melhor alternativa.

No dimensionamento de estruturas metálicas, os esforços variáveis de vento são considerados determinantes para o cálculo dos elementos estruturais. Através do dimensionamento da força de vento, executado de acordo com a ABNT NBR 6123:1988, constatou que os esforços nas faces laterais dos galpões são idênticos, porém na cobertura em arco os esforços são maiores se comparados aos esforços na cobertura com formato de tesoura. Indicando uma intensa zona de sucção no telhado e induzindo a perfis estruturais mais robustos, principalmente para os pilares. Devido a diferença geométrica das treliças, os elementos estruturais responsáveis por suportar os esforços de tração e compressão são distintos entre os galpões. Na treliça em arco de Pratt os elementos responsáveis em resistir aos esforços de tração são as diagonais e aos esforços de compressão os montantes, já na treliça tipo tesoura de Pratt ocorre o inverso, os montantes resistem a tração e as diagonais resistem a compressão. Nas combinações de ações, a treliça em arco obteve maiores esforços tanto de tração quanto de compressão, no entanto sua flecha foi inferior ao da treliça tipo tesoura.

A diferença de custos entre os galpões foi de 19,63%, totalizando um valor de R\$ 31.413,88. Os elementos que mais contribuirão para essa diferença foi os pilares somando R\$ 19.512,61 de diferença e as terças com diferença de R\$ 7.363,44.

10 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas

de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios: apresentação. Rio de Janeiro, 2008.

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

PFEIL, Walter.; PFEIL, Michele. **Estrutura de Aço. Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008**: 8 ed. Rio de Janeiro: Editora JLC, 2009.

PINHEIRO, A. **Estrutura Metalicas. Calculos, Detalhes, exercicios e Projetos**: 2 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2005.

D'ALAMBERT, F. **Galpões em pórticos com perfis estruturais laminados.**: 7 ed. São Paulo: Gerdau, 2018.

DREHMER, Gilnei.;JÚNIOR, Enio. **Galpões para usos gerais.**: 4 ed. Rio de janeiro: Instituto Aço Brasil, 2010.

FIGUEROA, Mario.; DIAS, Ricardo. **Tipologias projetuais para estruturas metálicas.**: 1 ed. São Paulo: Gerdau, 2012

CHAMBERLAIN, Zacarias. **Ações do vento em edificações**. Disponível em: http://usuarios.upf.br/~zacarias/acoes_vento.pdf. Acesso em: 05 de Março de 2020.

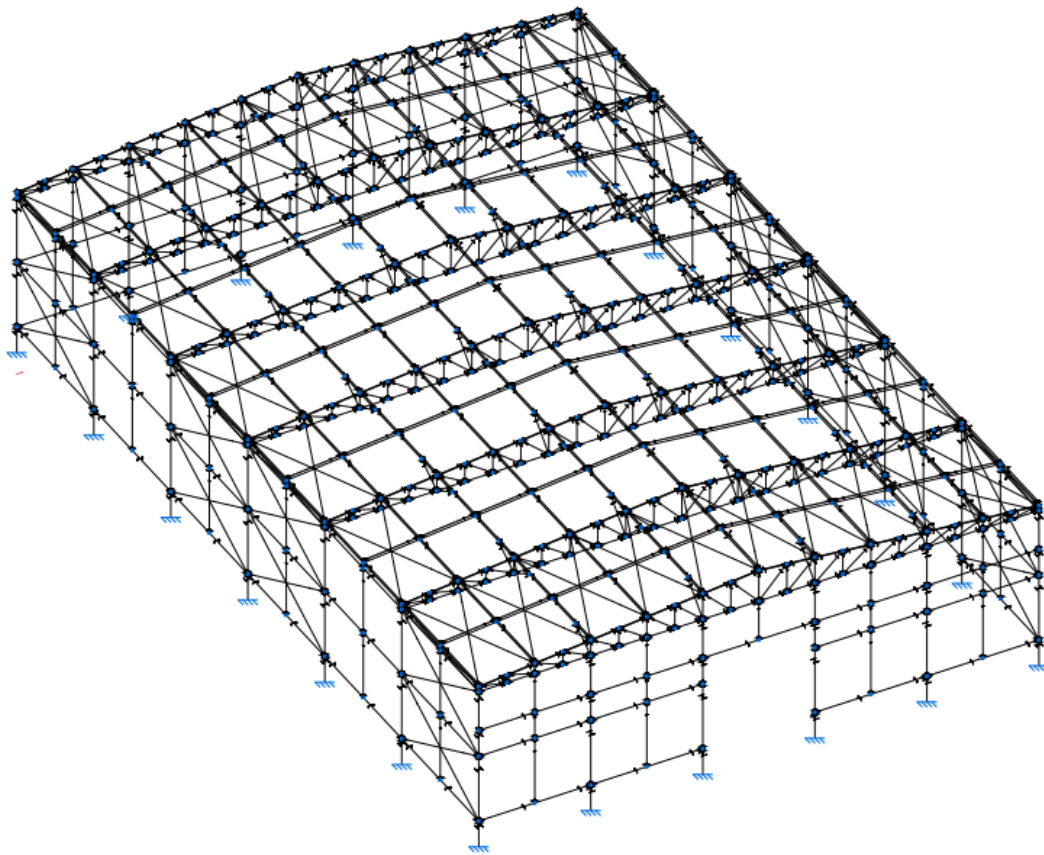
BAREIRO, Walter. **Estudo e modelagem de estruturas treliçadas utilizadas em galpões industriais considerando imperfeições iniciais e efeitos de segunda ordem**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

JUNIOR, Marcelo. **Análise de dimensionamento de perfis de cobertura metálica estudo de caso**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

BRAGA, Kelly. **Projeto estrutural de galpão metálico Segundo recomendações da NBR 8800**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

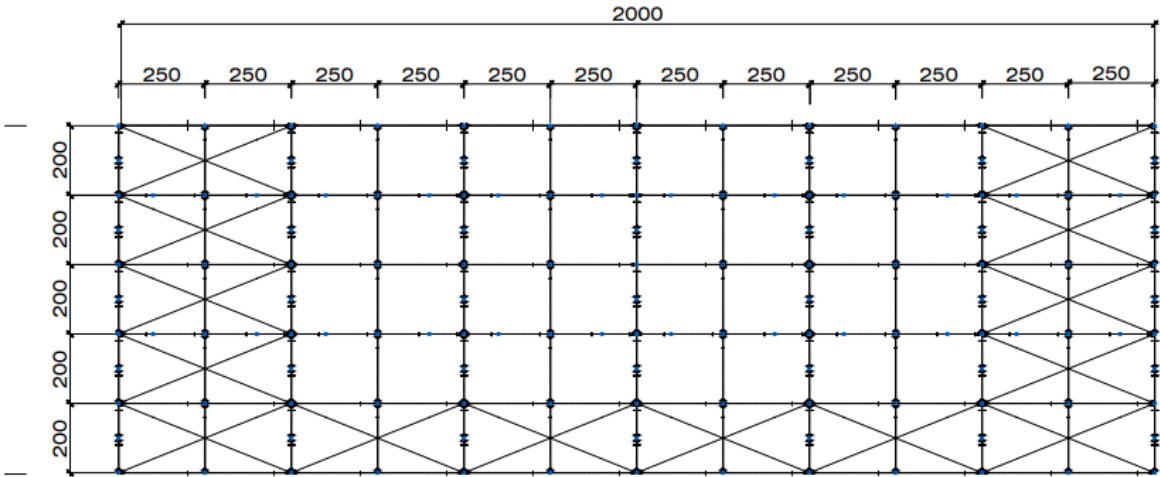
11 APÊNDICE A – PROJETO DO GALPÃO COM TESOURA DE PRATT

Figura 50: Estrutura 3D do Galpão com treliça tesoura de Pratt.



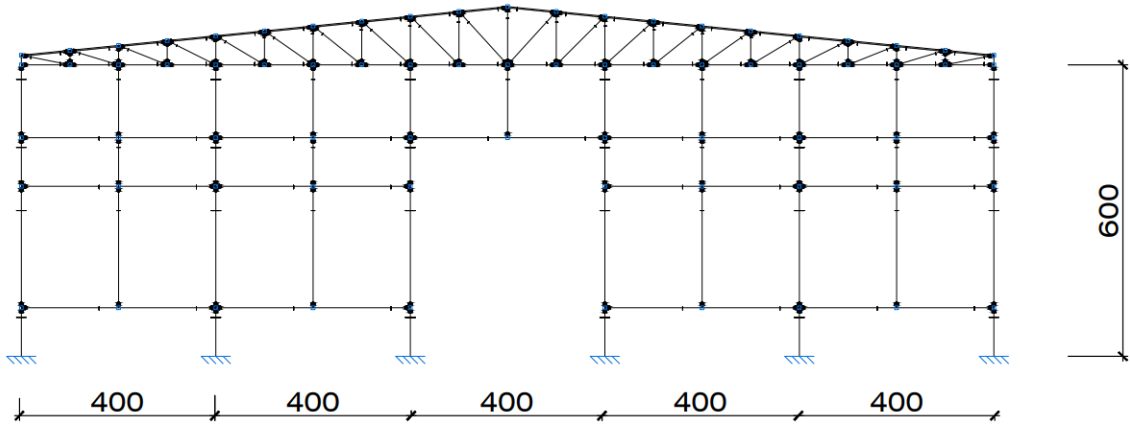
Fonte: Próprio Autor.

Figura 51: Estrutura do telhado do Galpão com treliça tesoura de Pratt.



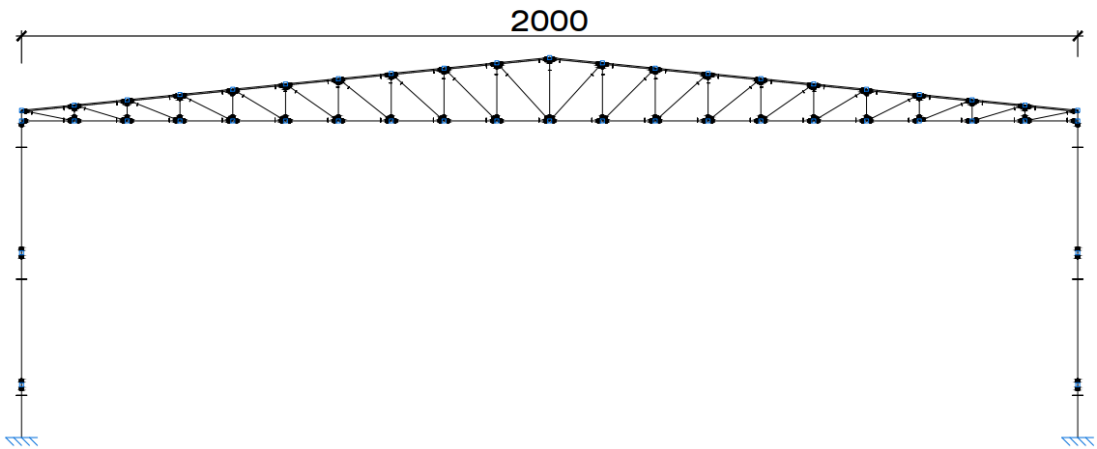
Fonte: Próprio Autor

Figura 52: Estrutura Frontal do Galpão com treliça tesoura de Pratt



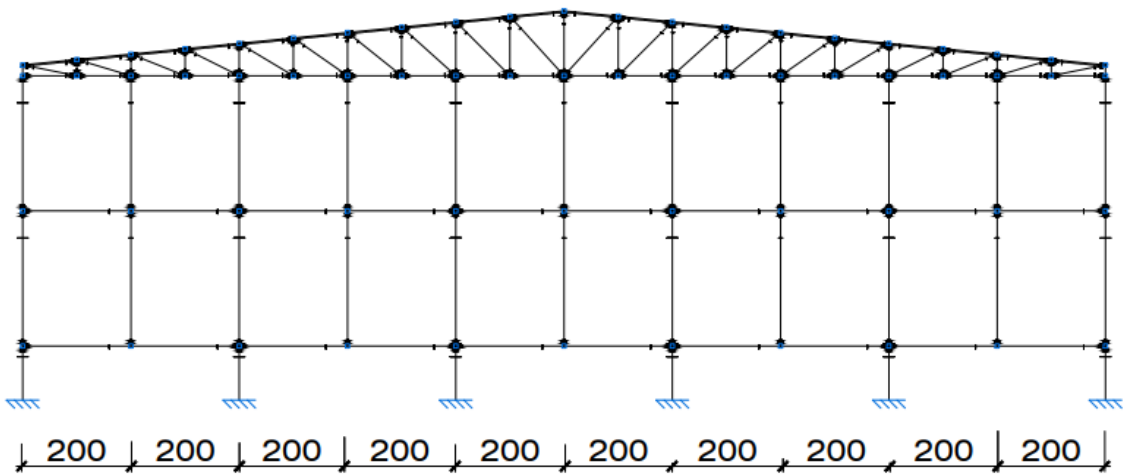
Fonte: Próprio Autor

Figura 53: Estrutura tipo do Galpão com treliça tesoura de Pratt.



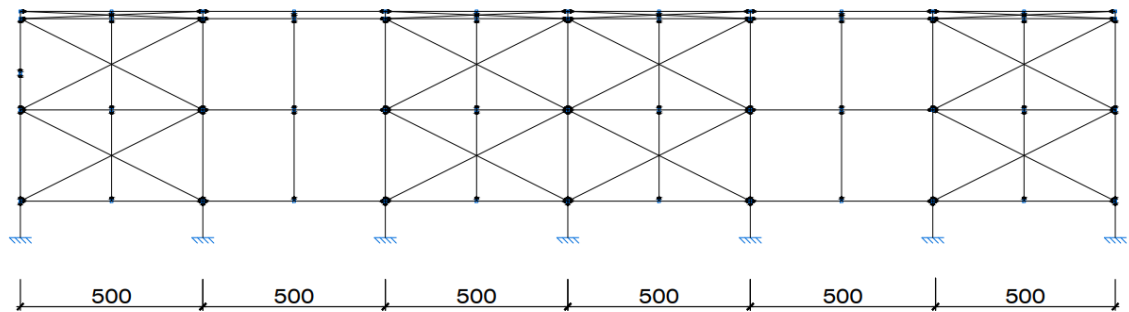
Fonte: Próprio Autor

Figura 54: Estrutura posterior do Galpão com treliça tesoura de Pratt.



Fonte: Próprio Autor

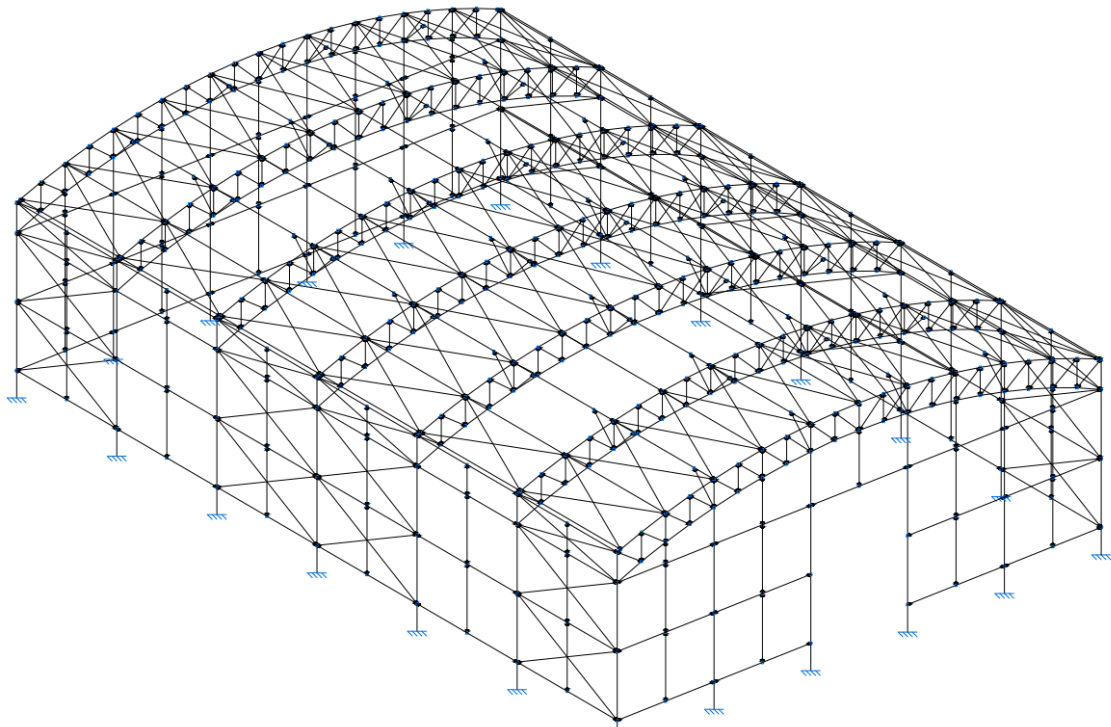
Figura 55: : Estrutura lateral do Galpão com treliça tesoura de Pratt.



Fonte: Próprio Autor

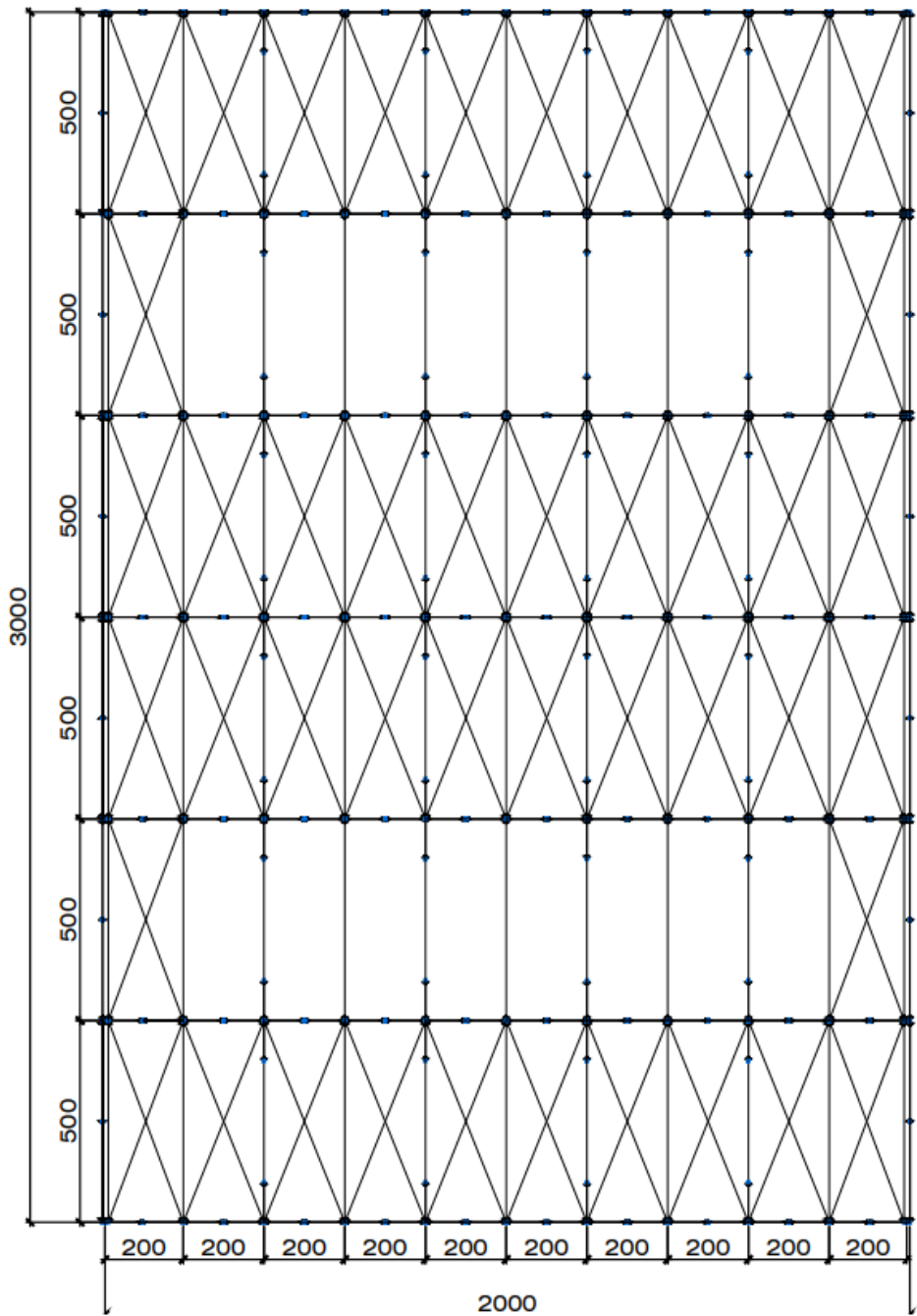
12 APÊNDICE B – PROJETO DO GALPÃO COM ARCO DE PRATT.

Figura 56: Estrutura 3D do Galpão com treliça em arco de Pratt.



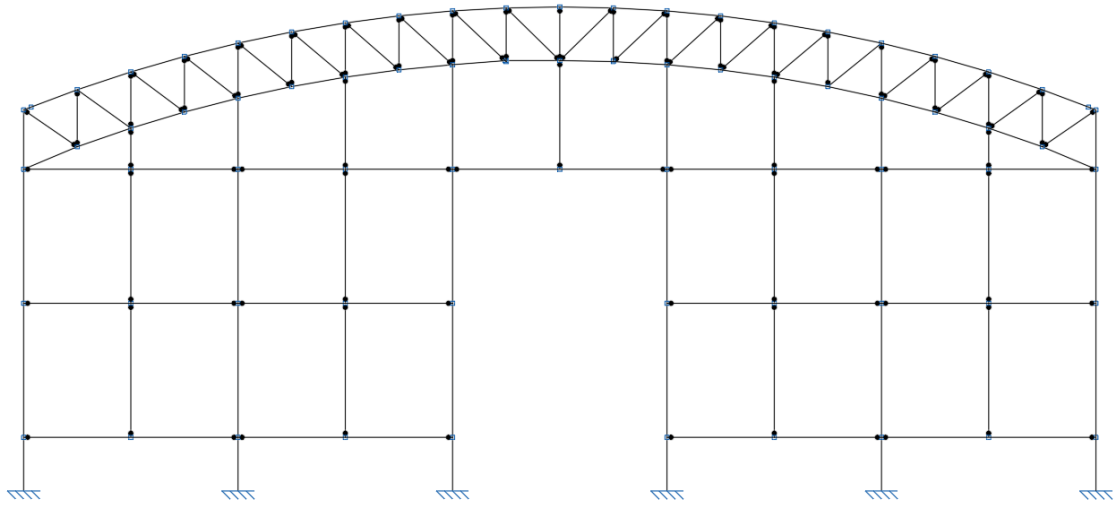
Fonte: Próprio Autor

Figura 57: Estrutura do telhado do Galpão com treliça em arco de Pratt.



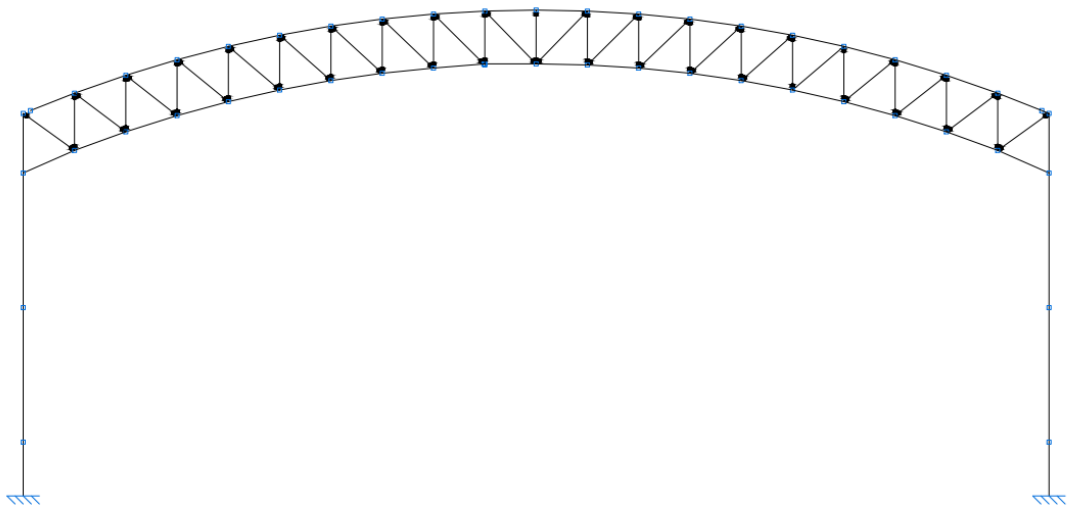
Fonte: Próprio Autor

Figura 58: Estrutura Frontal do Galpão com treliça em arco de Pratt.



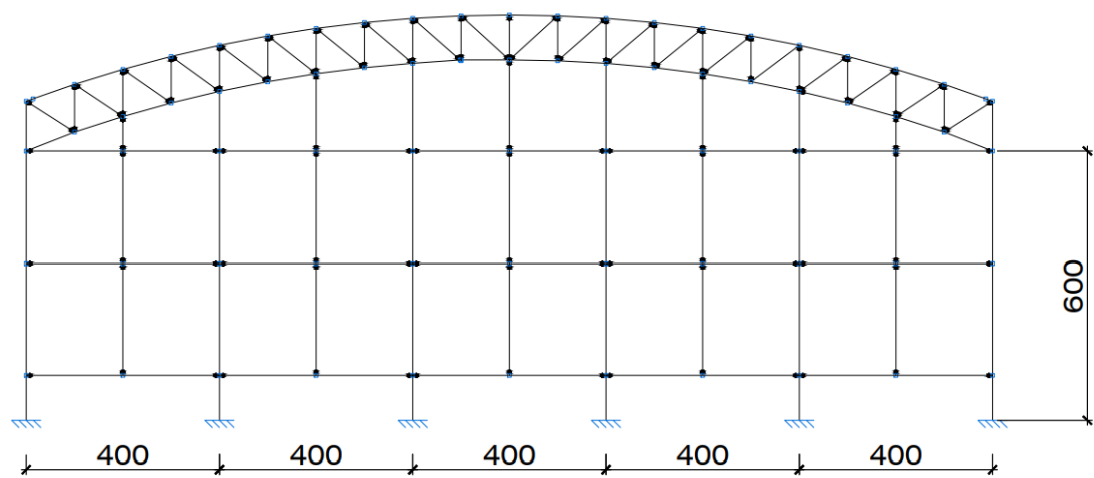
Fonte: Próprio Autor

Figura 59: Estrutura tipo do Galpão com treliça em arco de Pratt.



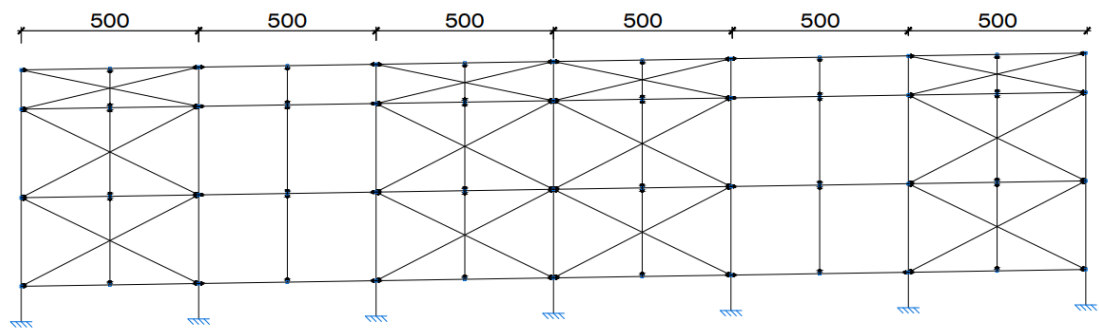
Fonte: Próprio Autor

Figura 60: Estrutura posterior do Galpão com treliça em arco de Pratt.



Fonte: Próprio Autor

Figura 61: Estrutura lateral do Galpão com treliça em arco de Pratt.



Fonte: Próprio Autor