



CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS

Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

Mariana Gonçalves Chaves da Silva

ESTUDO COMPARATIVO DAS TIPOLOGIAS ESTRUTURAIS DE TRELIÇAS PARA UM GALPÃO INDUSTRIAL EM AÇO

Palmas - TO

2020

Mariana Gonçalves Chaves da Silva

ESTUDO COMPARATIVO DAS TIPOLOGIAS ESTRUTURAIS DE TRELIÇAS PARA
UM GALPÃO INDUSTRIAL EM AÇO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II elaborado e apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Prof. M.e Daniel Iglesias de Carvalho.

Palmas - TO

2020

Mariana Gonçalves Chaves da Silva
ESTUDO COMPARATIVO DAS TIPOLOGIAS ESTRUTURAIS DE TRELIÇAS PARA
UM GALPÃO INDUSTRIAL EM AÇO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II elaborado e apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Prof. M.e Daniel Iglesias de Carvalho.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. M.e Daniel Iglesias de Carvalho

Orientador

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

1º Avaliador

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

2º Avaliador

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Palmas - TO

2020

Dedico este trabalho ao meu Senhor e Amado Jesus, Aquele que é rico em amor, graça, favor, bondade, humildade, compaixão e misericórdia. A Ele toda honra, glória e majestade. Sem ele, eu nada poderia fazer.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu amado Deus, autor e consumidor da minha vida, que colocou pessoas especiais no meu caminho.

Agradeço aos meus pais, Marilda e Marcelino, que desde a minha infância priorizaram meus estudos, indo atrás de boas escolas para que eu crescesse como profissional, além das diversas vezes que se sacrificaram para que chegasse o dia de hoje, a vocês minha eterna gratidão.

À minha família paterna (tios e avôs) por todo apoio financeiro e por me inspirarem a crescer com suas histórias de vida.

Aos meus primos, por quem tenho grande admiração, aqueles que fazem os momentos em família serem inesquecíveis.

Ao meu tio Chico que me presenteou com este computador, permitindo que eu me aprofundasse nos estudos e redigisse este TCC, obrigada por tanto.

Aos meus tios, Antônio João, Meire, Elias e Eva, por aceitarem ser meus fiadores se dispondo a me acompanhar nas diversas idas ao banco.

À minha prima Daniela que me estendeu a mão no momento mais difícil que vivi durante estes 6 anos da graduação, jamais esquecerei o que fizeste por mim.

À minha família materna que sempre demonstrou grande amor e admiração por mim, em especial as minhas tias, Nete e Detinha.

Aos meus colegas e amigos da graduação, em especial à Mariana, Ianka, Aline, Kainã, Marcelo, Andressa e Victor Hugo, que me acolheram, ensinaram e me inspiraram com suas histórias de vida e superação.

Aos meus professores e mestres, em especial ao Jarles, Reginaldo, Roldão, Kênia, Edivaldo, Euzir, Patrícia, Dalton, Enéias, Miguel, Natanael, Marcieli, Washington, Fernando, Roberta, Jacqueline, Joaquim, Carol, Ângela, Fábio Moreira, Fábio Henrique, Elaine e Michele, obrigada de coração, por vocês tenho grande admiração.

Ao meu orientador, Prof^o Daniel, que fora um dos responsáveis pela escolha do tema e aceitou o desafio.

Ao Eng^o José Silvério que não mediu esforços para me auxiliar com este trabalho, dispondo do seu tempo e conhecimento.

Aos meus queridos amigos, em especial as minhas amigas Karla, Luzeni, Raíssa, Tuanny e Vanessa, aquelas que foram e continuam sendo o motivo de muitas alegrias que vivi ao longo do caminho, pois me sustentaram em oração com ouvidos sempre prontos a me entender.

Aos meus pastores e líderes, em especial ao Pr. Guilherme, Patrícia e Gustavo, aqueles que Deus escolheu para falar em minha vida.

À querida Sualla, minha professora, que me ensina a escrever melhor e está sempre me ajudando com as tarefas diárias.

Às minhas ex-colegas de trabalho que não estão mais presentes no meu dia a dia, contudo, continuam em meu coração, as queridas Ellen, Thaynná, Carol, Ingrid, Daniela, Gabi, Géssica, Isabela, Lucinha, Léo e Layla, vocês me inspiram.

Aos queridos Oscar, Aurenice e Carlos, profissionais incríveis, que encheram os meus dias de palavras amáveis e me motivaram a ser melhor no desempenho do trabalho.

Às minhas queridas amigas, Laila e Andressa, pessoas alegres e de alma leve, que me incentivaram a escolher este curso.

“Cada vez que você faz uma opção está transformando sua essência em alguma coisa um pouco diferente do que era antes.” (C. S. Lewis)

RESUMO

DA SILVA, Mariana Gonçalves Chaves. **Estudo comparativo das tipologias estruturais de treliças para um galpão em estrutura de aço**. 2020. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas/TO, 2020.

O presente trabalho relaciona três tipologias de treliças (triangular, trapezoidal e banzos paralelos) aplicadas em um galpão industrial projetado para a cidade de Caldas Novas - GO. Tendo em vista que, as treliças constituem-se partes imprescindíveis na composição de pórticos planos e espaciais, e que tais tipologias são comumente empregadas em empreendimentos dos tipos galpões industriais e agrícolas, quadras esportivas, postos de gasolina, entre outros (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2010). Diante disso utilizara-se, a princípio, a pesquisa exploratória quanto à revisão do projeto de um galpão industrial arquitetado em treliça do tipo Trapezoidal com pilares treliçados. Posteriormente, fora feito o dimensionamento das outras duas tipologias de treliças, triangular e banzos paralelos, aplicado ao galpão, portanto, realizara-se uma análise quali-quantitativa da estrutura. Na investigação da pesquisa utilizara-se os métodos de cálculos presentes nas NBRs 6123:1988 e 14762:2010 que, de acordo com os resultados, há uma entres as três tipologias de treliças que apresenta um consumo menor de material sem que haja a necessidade de aplicar estrutura adicional ao pórtico. Evidenciando assim a importância de se conhecer e estudar as diferentes estruturas a serem empregadas no processo criacionista de um galpão para se obter, como resultado, estruturas mais leves e resistentes.

Palavras-chave: Galpão, Treliças, Tipologias.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ponte de Paraíba do Sul no estado do Rio de Janeiro.	19
Figura 2 - Perfis U simples formados a frio (PFF).	23
Figura 3 - Perfil U enrijecido formado a frio (PFF).	23
Figura 4 - Perfis Z simples formados a frio (PFF).	24
Figura 5 - Perfis Z enrijecidos formados a frio (PFF).	24
Figura 6 - Perfis C cartola formados a frio (PFF).	24
Figura 7 - Galpão industrial em aço na fase de execução.	26
Figura 8 - Galpão industrial em aço em perfil I laminado.	27
Figura 9 - Treliça Triangular (TT).	28
Figura 10 - Treliça Trapezoidal (TZ).	29
Figura 11 - Treliça de Banzos Paralelos (TP).	30
Figura 12 – Galpão (objeto de estudo).	31
Figura 18 – Determinação dos coeficientes de pressão para paredes e telhados.	33
Figura 19 - Perfis U simples e U enrijecido	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEULP	Centro Universitário Luterano de Palmas
PFF	Perfil Formado a Frio
SAE	Society of Automotive Engineers
ULBRA	Universidade Luterana do Brasil

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
Amín	Área mínima
AP	Ação permanente
CPE	Coefficiente de pressão externa
CPI	Coefficiente de pressão interna
CW	Constante de empenamento
E	Módulo de elasticidade transversal
FV	Força do vento
FY	Tensão de escoamento do aço
G	Porcentagem do módulo de elasticidade
I _x	Inércia em x
I _y	Inércia em y
J	Constante de torção uniforme
K _x	Condição de contorno em x
K _y	Condição de contorno em y
L _{bx}	Comprimento de flambagem em x
L _{by}	Comprimento de flambagem em y
m/s	Metros por segundo
m ²	Metros quadrados
m ⁴	Metros a quarta
NC, RD	Normal de compressão, resistente de cálculo
NC, SD	Normal de compressão, solicitante de cálculo
NE	Normal elástica
NEX	Normal de flambagem por flexão em x
NEXZ	Normal de flambagem flexo torcional
NEY	Normal de flambagem por flexão em y
NEZ	Normal de flambagem por flexão
NT, RD	Normal de tração, resistente de cálculo
NT, SD	Normal de tração solicitante de cálculo
q	Pressão dinâmica
R ₀	Raio de giração
R _x	Raio de giração em x

Ry	Raio de giração em y
S1	Fator topográfico
S2	Fator de rugosidade do terreno
S3	Estatístico
SC	Sobre carga de utilização
V0	Velocidade básica do vento
VK	Velocidade característica do vento
kgf	Quilograma força
γ_x	Esbeltez em x
γ_y	Esbeltez em y
η	Número Neta
π	Número PI

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	16
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
1.4 JUSTIFICATIVA	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 HISTÓRICO DO USO DO AÇO	18
2.1.1 Histórico do aço no mundo	18
2.1.2 Histórico do aço no Brasil	19
2.2 VANTAGENS DO USO DO AÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	20
2.3 AÇOS ESTRUTURAIS	21
2.4. PERFIS FORMADOS À FRIO	22
2.5 NORMAS TÉCNICAS	25
2.6 GALPÃO	25
2.7 TRELIÇAS	27
2.7.1 Treliça Triangular (TT)	28
2.7.2 Treliça Trapezoidal (TZ)	28
2.7.3 Treliça de Banzos Paralelos (TP)	30
3 METODOLOGIA.....	31
3.1 DESENHO DO ESTUDO (TIPO DE ESTUDO)	31
3.2 OBJETO DE ESTUDO	31
3.3 ETAPAS DA PESQUISA	32
3.3.1 Vento na estrutura do galpão	32
3.3.2 Carregamento na estrutura do galpão	33
3.3.3 Lançamento das treliças no <i>Software</i> AutoMetal	34
3.3.4 Planilha com valores de tração e compressão	35
3.3.5 Tração nas peças e escolha dos perfis	35
3.3.6 Compressão nas peças e escolha dos perfis	36
3.3.7 Critérios para escolha dos perfis.....	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1 PERFIS ESCOLHIDOS	40
4.2 CONSUMO DE AÇO DE CADA TIPOLOGIA	43

REFERÊNCIAS 44

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Centro de Estudos de Estruturas de Aço e Misturas de Aço e Concreto da Universidade Federal de Minas Gerais - CEAM-UFMG (2020), até a segunda metade do século XIX, o aço fora pouco usado na construção civil em razão do alto custo de seus processos de fabricação, contudo, no ano de 1856, o inglês Henry Bessemer criou um forno, que ficara conhecido como Conversor de Bessemer, que em 1860 tornara possível a produção de aço em grande escala.

Em conformidade com o Instituto Aço Brasil (2020), o mercado de estruturas metálicas no Brasil começara a desenvolver-se no início do século XX, entre os anos de 1917 a 1930, graças a um surto industrial que favoreceu a extração de ferro dos minérios localizados no atual estado de Minas Gerais.

Ainda segundo o Instituto Aço Brasil (2010), galpões projetados em aço são uma das estruturas mais utilizada na construção civil, em geral, é constituído por um único pavimento em duas águas com diversos fins como, por exemplo, comercial, industrial e agrícola. Ao passo em que são formados, basicamente, por pórticos planos ou espaciais com distanciamento constante entre si, por terças que servem como apoio para a cobertura metálica e para interligar os pórticos, e por sistemas de travamento lateral e superior conhecidos como sistemas de contraventamento.

Os pórticos planos são compostos por pilares e por treliças, tais treliças são classificadas de acordo com sua forma geométrica, aqui foram analisadas três tipologias (triangular, trapezoidal, e banzos paralelos). Insta destacar que, a tipologia de treliça escolhida para os projetos de galpões é essencial para garantir que tais estruturas sejam dimensionadas com o menor consumo de aço atendendo aos critérios estabelecidos pelas normas vigentes e às forças solicitantes de cálculo.

Na concepção do projeto de uma estrutura metálica é definido o tipo de perfil a ser utilizado, laminado ou formado a frio. De acordo com Garcia *et al* (2017), os perfis metálicos formados à frio – PFF, também conhecidos como perfis de chapas dobradas, são produzidos pelo dobramento de chapas planas em temperatura ambiente, tais perfis são facilmente encontrados no mercado, são mais leves, se comparados aos laminados, e, pelas características intrínsecas de suas peças, possibilitam maiores vantagens na montagem das estruturas.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT padronizou por meio NBR 14762:2010 o dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Além desta norma, há, também, outras que a complementa para o eficaz dimensionamento do

projeto em estrutura metálica, como a norma de forças devidas ao vento em edificações (NBR6123:1988), a das ações e segurança nas estruturas (NBR 8681:2003), a das cargas para o cálculo de estruturas de edificações (NBR 6120:1980), e a da padronização dos perfis estruturais de aço formados a frio (NBR 6355:2012).

Em síntese, este trabalho identificou a tipologia de treliça em estrutura metálica mais leve para a construção de um galpão industrial. O projeto do galpão, objeto do estudo, utilizou treliça do tipo trapezoidal, com pilares treliçados e área útil de 1.530 m². Ao final desta pesquisa fora possível identificar entre as treliças (trapezoidal, triangular e banzos paralelos) a que tornara-se mais vantajosa no que tange ao menor consumo de aço.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Partindo do pressuposto de que há três modelos de treliças mais usuais para projetos de galpões em estrutura metálica surge a problemática: para a construção de um galpão industrial em aço, projetado para o município de Caldas Novas - GO, qual tipologia de treliça gera menor consumo de aço atendendo aos critérios da NBR 14762:2010?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Identificar a tipologia de treliça em estrutura metálica que atende ao critério de menor consumo de aço para a projeto de um galpão industrial para a cidade de Caldas Novas - GO.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Verificar os maiores valores dos esforços de tração e compressão para as três tipologias de treliças em seus elementos estruturais;
- Calcular e comparar os perfis metálicos, que atendam às solicitações, para os três modelos de treliças analisados;
- Determinar qual das treliças possui o menor consumo de aço.

1.4 JUSTIFICATIVA

De acordo com o Centro de Informações Metal e Mecânica (2019), a construção civil é a maior consumidora de aço. O emprego crescente desse material se deve a sua versatilidade, pois estruturas metálicas garantem, quando corretamente utilizadas, redução da mão de obra, tempo mínimo na execução do projeto, fato que assegura produtividade e eficiência. Além disso, a estrutura metálica é indicada para vencer grandes vãos, o que permite a redução da quantidade de colunas.

A escolha da estrutura metálica para o projeto é fundamental não só para garantir a segurança da edificação, mas também para diminuir o consumo de material.

Este estudo visa identificar a tipologia de estrutura metálica mais leve para a construção de um galpão industrial na cidade de Caldas Novas - GO. O projeto do galpão, objeto do estudo, utilizou treliça do tipo trapezoidal, seus pilares são treliçados, e possui área útil de 1.530 m². O fator que determinou a escolha de tal galpão como objeto de análise desta pesquisa fora o fato de ser um galpão comum, ou seja, possui características que atendem aos empreendimentos industriais.

Esta pesquisa torna-se relevante ao determinar a tipologia de treliça mais leve para o galpão em análise. Além disso, este estudo fornecerá ao engenheiro civil projetista a

importância do conhecimento detalhado para dimensionar um galpão que atenda aos esforços solicitantes com o menor consumo de aço.

Outrossim, do ponto de vista acadêmico, o estudo possibilitará a aplicação prática de disciplinas presentes na grade curricular do curso, uma vez que, abrange disciplinas como projetos de estruturas de aço, resistência dos materiais e estruturas isostáticas. Por fim, os resultados deste projeto constituirão como acervo técnico para pesquisas relacionadas à resistência estrutural de treliças.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 HISTÓRICO DO USO DO AÇO

Aqui fora exposto um breve histórico do uso de estruturas metálicas no mundo e no Brasil.

2.1.1 Histórico do aço no mundo

De acordo com o Centro de Estudos de Estruturas de Aço e Misturas de Aço e Concreto da Universidade Federal de Minas Gerais - CEAM-UFMG (2020), até a segunda metade do século XIX, o aço fora pouco usado na construção civil em razão do alto custo de seus processos de fabricação, contudo, no ano de 1856, o inglês Henry Bessemer criou um forno, que ficara conhecido como Conversor de Bessemer, que em 1860 tornara possível a produção de aço em grande escala, já no ano de 1865 fora desenvolvido o processo *Siemens-Martin* para produção do aço e, por volta de 1880, surgiram os primeiros laminadores.

Precedente ao uso do aço em estruturas, o ferro fundido fora empregado do século XII até a segunda metade do século XIX, posto isto, segue uma breve linha do tempo que relaciona o uso destes dois elementos na construção civil:

- Século XII: uso misto do ferro fundido em estruturas de madeira como tirantes, por exemplo, também fora empregado em sustentações de telhado;
- Final do século XVIII: perfis de ferro fundido, submetidos à compressão, foram utilizados em cúpulas de igrejas e pontes;
- Primeira metade do século XIX: surgimento do ferro laminado e avanço do cálculo estrutural com sistemas estaticamente lógicos. Neste período, houvera a produção industrializada do ferro laminado e eventos importantes, como a construção da primeira ferrovia no ano de 1827, e o início da construção de edifícios industriais de múltiplos andares que só fora possível graças à invenção do elevador que acontecera em 1853;
- Segunda metade do século XIX: em razão da necessidade do uso de um material com melhores características mecânicas, ao final deste século, houvera a difusão do uso do Conversor de Bessemer que produzira aço em grande escala utilizado na construção de obras como a Torre Eiffel, finalizada no ano de 1889 por Gustave Eiffel;
- Século XX até os dias de hoje: houvera grande avanço no que tange ao comportamento de estruturas em aço, foram desenvolvidos parafusos de alta resistência, aços resistentes aos grandes esforços mecânicos e à corrosão, solda elétrica, entre outros. Comumente, galpões industriais, edifícios de múltiplos andares, pontes, ferrovias, linhas de transmissão de energia, e assim por diante, passaram a ser executados em sistemas estruturais cada vez mais desenvolvidos.

2.1.2 Histórico do aço no Brasil

Segundo Bellei (1998), supõe-se que, no Brasil, a primeira obra construída com ferro fundido fora a ponte de Paraíba do Sul - RJ no ano de 1857, já a primeira obra na qual usou-se aço importado fora o Teatro de Santa Izabel, localizado em Recife - PE.

A figura 1 abaixo mostra a Ponte de Paraíba do Sul, localizada no Estado do Rio de Janeiro, que possui cinco vãos, de trinta metros cada, edificados em estrutura metálica.

Figura 1 - Ponte de Paraíba do Sul no estado do Rio de Janeiro.



Fonte: Prefeitura da Paraíba do Sul – RJ.

De acordo com o Instituto Aço Brasil (2020), O mercado de estruturas metálicas no Brasil começou a desenvolver-se no início do século XX, entre os anos de 1917 a 1930, graças a um surto industrial que favoreceu a extração de ferro dos minérios localizados no atual estado de Minas Gerais.

No ano de 1921 foi concebida a Companhia Siderúrgica Mineira que, após sua junção ao consórcio industrial belgo-luxemburguês (*ARBEd-Acières Réunies de Bubach-Eichdudelage*), tornou-se a Siderúrgica Belgo-Mineira. Tal Siderúrgica inaugurou, em 1937, a usina de Monlevade que tivera capacidade inicial de produzir cerca de 50 mil toneladas de lingotes de aço (Instituto Aço Brasil, 2020).

Ainda segundo o Instituto de Aço Brasil (2020), embora a Siderúrgica Belgo-Mineira possuísse uma capacidade considerável de produção, o país continuava dependente do aço importado, neste ínterim, foi criada a Companhia Siderúrgica Nacional – CSN no ano de 1946

na cidade de Volta Redonda - RJ fazendo com que, em 1970, a produção de aço bruto chegasse a 5,5 milhões toneladas.

Em 1991 iniciou-se o processo de privatização do setor siderúrgico brasileiro responsável por alçar economia de escala e competitividade.

De acordo com os dados disponibilizados no acervo do Instituto de Aço Brasil (2020), o Brasil é responsável pelo maior parque industrial da América do Sul, é o maior produtor da América Latina, ocupa o sexto lugar como maior exportador de aço no mundo, e ainda conquistara o nono lugar como produtor mundial.

2.2 VANTAGENS DO USO DO AÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Segundo Bellei (1998), são diversas as vantagens da utilização do aço na construção civil, entre elas estão a alta resistência do aço aos diversos esforços (tração, compressão, torção, flexão, entre outros) mesmo com seções relativamente pequenas fazendo com que a estrutura, quando comparada às construções em concreto armado, seja mais leve. Possui também elementos homogêneos com características, como módulo de elasticidade, limite de escoamento e ruptura, bem definidos.

Outrossim, tais estruturas dispõem de componentes seriados com montagem mecanizada, reduzindo o tempo de execução das obras, além de poderem ser desmontados, substituídos, e reaproveitados em fundações, por exemplo, quando submetidos à pintura anticorrosiva.

De acordo com o CEAM-UFMG (2020), as vantagens na utilização do aço podem ser pontuadas conforme se segue:

- Elevada resistência: a relação entre a resistência e o peso específico faz do aço o material com maior índice de resistência encontrado no mercado, em função disso, as estruturas metálicas possuem dimensões menores, quando comparadas ao concreto armado, mesmo que a força axial empregada, nas diferentes estruturas, seja equivalente;
- Elevada ductilidade: a deformação do aço antes do seu rompimento se situa entre 15% e 25%, em razão disso, fora considerado como um elemento de elevada ductilidade;
- Aproximação entre teoria e realidade: a propriedade da homogeneidade das construções em aço permite conhecer, na teoria, as ações de carregamento que ocorrem na prática;
- Facilidade de reforço estrutural e ampliação: o reforço em perfis metálicos é realizado por meio da soldagem de chapas na estrutura já existente, aumentando assim sua resistência;

- Possibilidade de reaproveitamento: as estruturas metálicas com conexões parafusadas ou livres de ligações em concreto armado podem ser desmontadas e reaproveitadas.
- Rapidez na execução: a pré-fabricação de peças permite que as estruturas em aço sejam montadas com rapidez.

2.3 AÇOS ESTRUTURAIS

O aço é produzido para atender as exigências do mercado, sejam elas quanto às aplicações específicas em obras com alto grau de complexidade, controle tecnológico da composição química dos elementos, elevada resistência, propriedades específicas, entre outras, para tais, fora desenvolvido o aço estrutural e aprimorado os estudos no que se refere às características intrínsecas ao elemento.

A seguir foram listadas algumas das propriedades do aço estrutural:

- Elasticidade: Conforme Berleli (1998, p.8) “[...] é a capacidade que têm os metais de voltar a sua forma original após sucessivos ciclos de carregamento [...]”;
- Ductilidade: é definida como a capacidade dos metais de se deformar na fase inelástica sem sofrer ruptura, conhecida graficamente como limite de escoamento do aço;
- Dureza: é a maior tensão de tração que o aço consegue suportar sem que haja redução de sua seção transversal.

Algumas propriedades do aço são constantes, como sua massa específica (7,85 t/m³), seu módulo de elasticidade (210.000 MPa), seu coeficiente de Poisson no regime inelástico (0,3) e no regime plástico (0,5), módulo transversal de agressividade (78.850 MPa) e o seu coeficiente de dilatação térmica (12x10⁻⁶/°C).

Segundo o Centro Brasileiro da Construção em Aço - CBCA (2020), há mais de 3.500 tipos diferentes de aço estrutural e aproximadamente 75% destes foram produzidos nos últimos 20 anos.

O CBCA (2020) destaca que o aço estrutural possui quantidades limitadas dos elementos químicos carbono, silício, manganês, enxofre, fósforo e outros componentes em menores quantidades, logo, podem ser classificados em três grandes grupos, listados a seguir, de acordo com a porcentagem de carbono presente em sua composição:

- Aços de baixo carbono: possuem no máximo 0,3% de carbono e apresentam elevada ductilidade. São utilizados para construção de edifícios, pontes, navios automóveis, entre outros;

- Aços de médio carbono: a porcentagem de carbono está entre 0,3% e 0,6%. São utilizados em engrenagem, bielas, entres outros;
- Aços de alto carbono: possuem mais de 0,6% de carbono em sua composição, dispõem de elevada dureza e resistência. São utilizados em trilhos, molas, engrenagens, entre outros.

Tais elementos também são classificados em outros três grandes grupos em conformidade com o limite mínimo de escoamento em Mega Pascal (MPa):

- Aço carbono de média resistência: 195 a 259 MPa, possui elevada dureza e resistência;
- Aço de alta resistência e baixa liga: 290 a 345 MPa, possui boa soldabilidade e dureza;
- Aços ligados tratados termicamente: 630 a 700 MPa, resistente à corrosão atmosférica da ordem de duas a quatro vezes maior que os outros tipos, logo, é ideal para regiões expostas às classes de agressividade III e IV segundo a NBR 6118:2013.

Ainda segundo o CBCA (2020), o aço estrutural mais utilizado na construção civil é o ASTM A36, classificado como aço carbono de média resistência, contudo, a necessidade de se construir estruturas cada vez maiores tem levado os profissionais a utilizar elementos mais resistentes, para tanto, foram desenvolvidos os aços de alta resistência e baixa liga que têm como objetivo aumentar a resistência mecânicas das estruturas, melhorar a resistência à corrosão atmosférica, melhorar a resistência ao choque e ao limite de fadiga, e elevar o limite de escoamento para o de resistência à tração sem perda de ductilidade.

2.4. PERFIS FORMADOS À FRIO

Os perfis metálicos formados a frio (PFF), também conhecidos como perfis de chapas dobradas, são produzidos pelo dobramento de chapas planas em temperatura ambiente, sendo facilmente encontrados no mercado, com vantagens no desempenho estrutural das peças e na montagem dos elementos. Insta destacar que são regidos pela NBR 14762, em vigor desde 2001, com sua última atualização no ano de 2010.

Segundo Garcia *et al* (2017), os PFFs são esbeltos, mais leves, quando comparados aos laminados, e eficientes, são de fácil fabricação e produção em massa, contudo, apresentam comportamentos de instabilidade, devido às ação de compressão nas peças, que devem ser levados em consideração, como as flambagens locais, globais e distorcionais.

A Figura 2 abaixo apresenta um perfil de aço formado a frio do tipo U simples, ou seja, são possui extremidades enrijecidas, por isso o nome “Simples”.

Figura 2 - Perfis U simples formados a frio (PFF).



Fonte: O calculista de aço - estruturas metálicas sem mistério.

A Seguir estão as figuras de 3 a 6 que representam alguns dos perfis formados a frio disponíveis no mercado.

Figura 3 - Perfil U enrijecido formado a frio (PFF).



Fonte: Casa do Serralheiro.

Figura 4 - Perfis Z simples formados a frio (PFF).



Fonte: Perfimax, Aços planos.

Figura 5 - Perfis Z enrijecidos formados a frio (PFF).



Fonte: Perfimax, Aços planos.

Figura 6 - Perfis C cartola formados a frio (PFF).



Fonte: Perfimax, Aços planos.

2.5 NORMAS TÉCNICAS

A seguir estão relacionadas a normas técnicas pertinentes ao dimensionamento e às verificações de estruturas projetadas em perfis formados a frio:

NBR 14762:2010 (Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio):

Esta Norma, com base no método dos estados-limites, estabelece os requisitos básicos que devem ser obedecidos no dimensionamento, à temperatura ambiente, de perfis estruturais de aço formados a frio, constituídos por chapas ou tiras de aço-carbono ou aço de baixa liga, conectados por parafusos ou soldas e destinados a estruturas de edifícios (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 1).

NBR 6123:1988 (Forças devidas ao vento em edificações):

Esta Norma fixa as condições exigíveis na consideração das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento, para efeitos de cálculo de edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 1).

NBR 8681:2003 (Ações e Segurança nas Estruturas – Procedimento):

Esta Norma fixa os requisitos exigíveis na verificação da segurança das estruturas usuais da construção civil e estabelece as definições e os critérios de quantificação das ações e das resistências a serem consideradas no projeto das estruturas de edificações, quaisquer que sejam sua classe e destino, salvo os casos previstos em Normas Brasileiras específicas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 1).

NBR 6120:1980 (Cargas para o cálculo de estruturas de edificações):

Esta Norma fixa as condições exigíveis para determinação dos valores das cargas que devem ser consideradas no projeto de estrutura de edificações, qualquer que seja sua classe e destino, salvo os casos previstos em normas especiais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980, p. 1).

NBR 6355:2012 (Perfis estruturais de aço formados a frio - Padronização): “Esta Norma estabelece os requisitos exigíveis dos perfis estruturais de aço formados a frio, com seção transversal aberta” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 210, p. 1).

2.6 GALPÃO

Segundo o Instituto Aço Brasil (2010), o galpão em aço é uma das estruturas mais utilizada na construção civil, em geral, é constituído por um único pavimento em duas águas com diversos fins como, por exemplo, comercial, industrial e agrícola.

Insta destacar que, são formados por pórticos, com espaçamento entre si constante, por terças, que servem como apoio para a cobertura metálica e para interligar os pórticos longitudinalmente, além dos sistemas de travamento lateral e superior, conhecidos como contraventamento, e ainda elementos como as linhas de correntes, os tirantes, as diagonais, os montantes, mão francesa, entre outros.

Posto isto, o galpão aqui estudado fora dimensionado para se utilizar os perfis formados a frio, tendo como base NBR 14769/2010 para fins de cálculo das peças submetidas às ações de carregamento (tração e compressão).

A figura 7, a seguir, expõe a execução de um galpão constituído por PFFs.

Figura 7 - Galpão industrial em aço na fase de execução.



Fonte: R4 metais.

A figura 8, a seguir, demonstra o exemplo de um galpão em duas águas que dispensou o uso de treliças, onde foram substituídas por perfil do tipo I laminado regido por outra norma, a NBR 8800/2008.

Figura 8 - Galpão industrial em aço em perfil I laminado.



Fonte: Full Estruturas, Consultorias, Projetos e Monitoramentos.

2.7 TRELIÇAS

Treliças são pórticos planos ou espaciais capazes de absorver os esforços de flexão, torção e flexo-torção. Sua utilização na construção civil é habitual, motivo que evidencia a necessidade de estudá-la e compreender como tais esforços se manifestam.

Posto isto, no presente estudo, foram dimensionadas, para um galpão industrial, três treliças com seus respectivos elementos estruturais (banzos inferior e superior, montantes e diagonais) que trabalham à tração e compressão.

A seguir foram relacionadas três tipologias de treliças, as mais empregadas na construção civil, com um breve resumo de suas características.

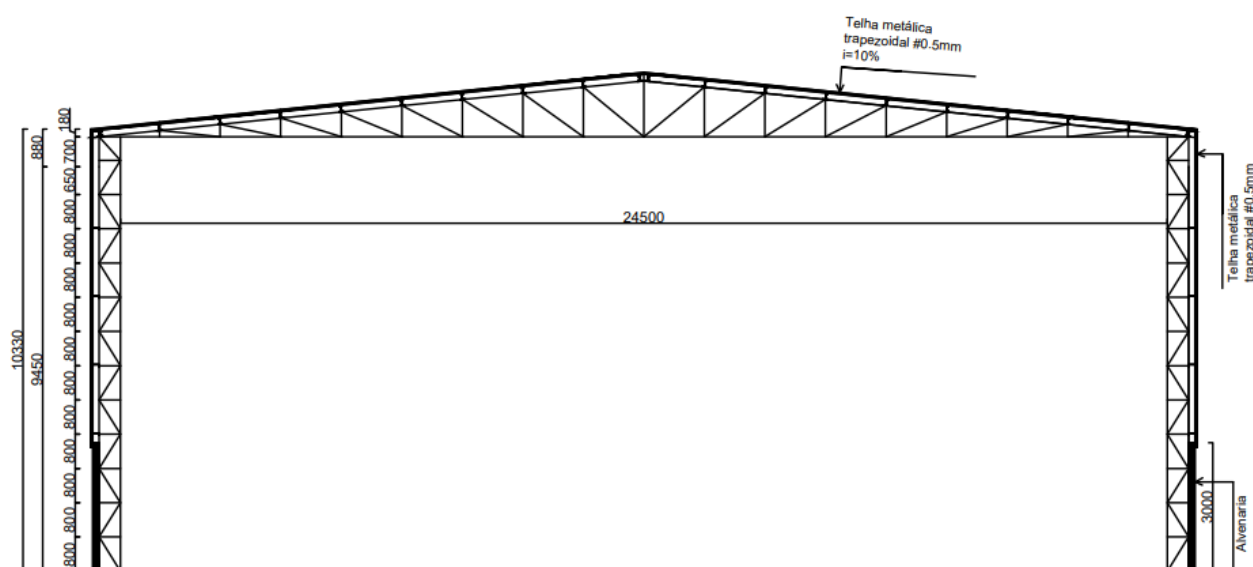
2.7.1 Treliça Triangular (TT)

Este tipo de treliça permite o encontro entre os banzos superiores e o inferior, logo, os montantes dispõem de alturas menores quando comparados aos da treliça trapezoidal.

Ademais, segundo de Brito (2010), as treliças do tipo triangular possuem ligações articuladas, ou seja, o momento fletor nos nós é igual à zero o que gera um número maior das ações de compressão e tração em seus elementos estruturais.

A figura 9, abaixo, apresenta o modelo de galpão estudado em treliça triangular com seus pilares conectados à base por meio de ligações flexíveis, possui um vão de 24,50 metros, inclinação do telhado igual a 10%, com pórticos a cada 6 metros. Insta destacar que todas as medidas estão em milímetros.

Figura 9 - Treliça Triangular (TT).



Fonte: autora.

2.7.2 Treliça Trapezoidal (TZ)

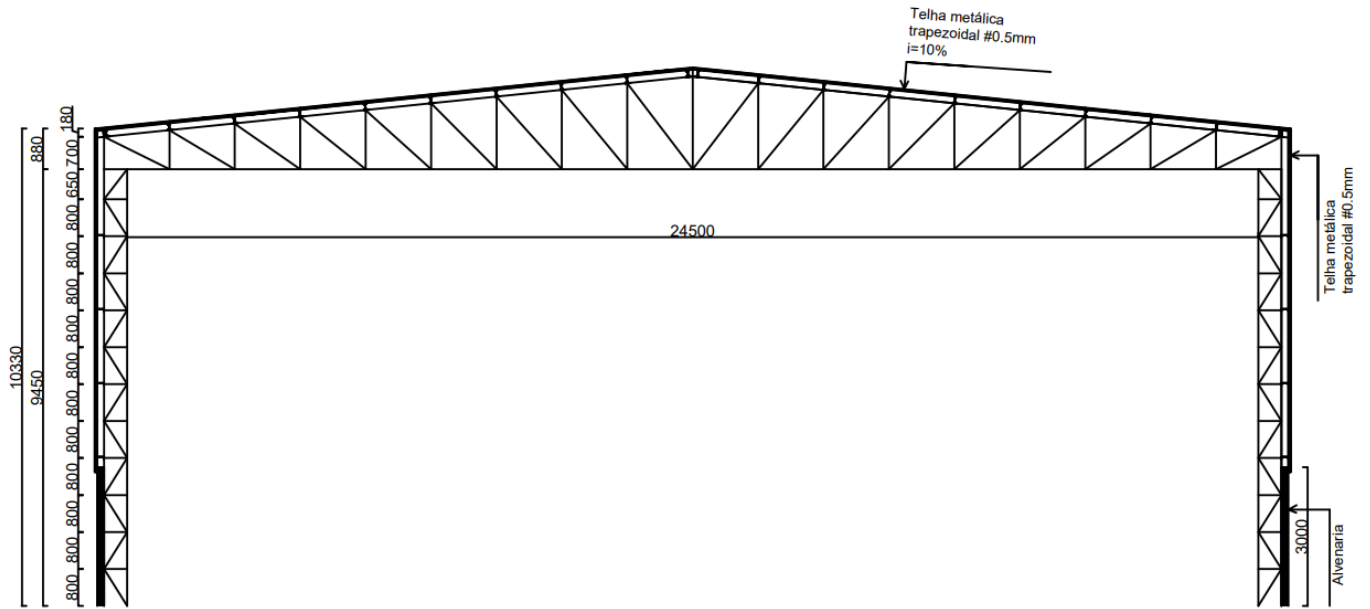
Este tipo de treliça não permite o encontro entre os banzos superiores e o inferior, logo, os montantes dispõem de alturas maiores.

Insta destacar que, segundo de Brito (2010), as ligações entre os elementos estruturais da TZ podem ser rígidas ou articuladas, deste modo, no presente estudo, fora adotada ligação flexível para o encontro entre os pilares e as bases.

Outrossim, de acordo com de Brito (2010), as treliças do tipo trapezoidal possuem nas extremidades dos banzos uma pequena altura que resulta em menores esforços nos seus elementos estruturais.

A figura 10, abaixo, apresenta o mesmo modelo de galpão onde mudou-se apenas a tipologia de treliça para a do tipo trapezoidal.

Figura 10 - Treliça Trapezoidal (TZ).



Fonte: autora.

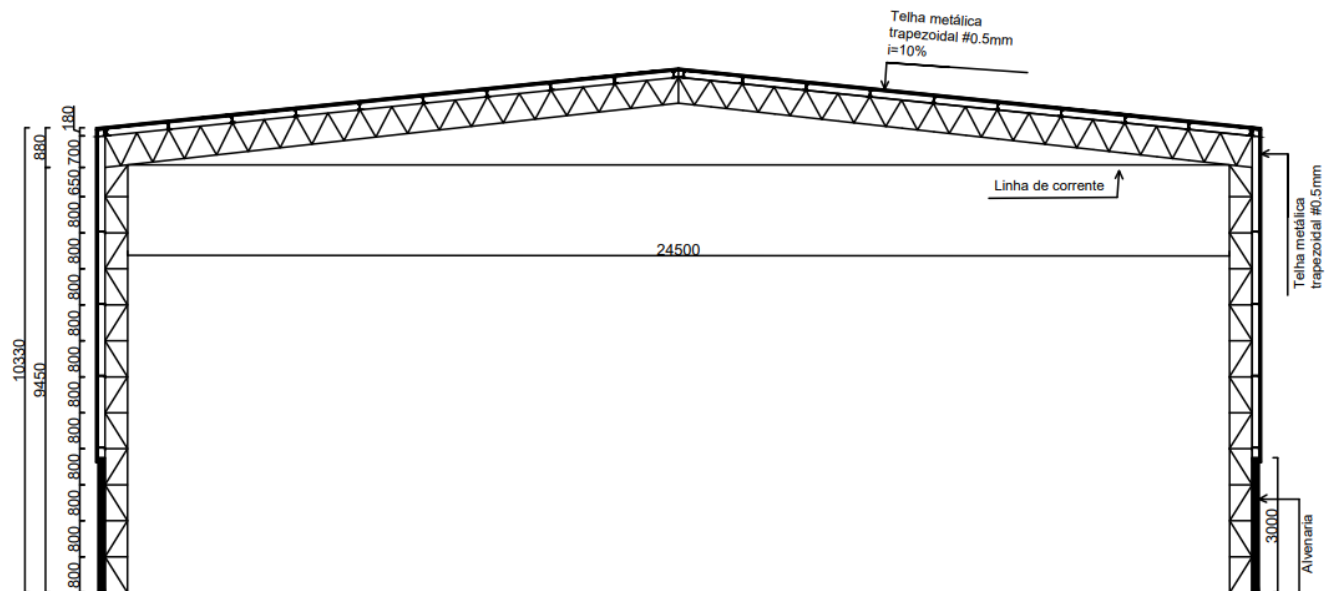
2.7.3 Treliça de Banzos Paralelos (TP)

Este tipo de treliça não permite o encontro entre os banzos superiores e os inferiores, além do que, os banzos inferiores possuem inclinação análoga a dos banzos superiores.

Outrossim, são geralmente empregadas quando existe a necessidade de elevadas inclinações para a cobertura. Faz-se necessário destacar que, para enrijecer a estrutura, usa-se tirantes ligando os apoios que trabalham a tração (DE BRITO, 2010).

A figura 11, abaixo, apresenta o mesmo modelo de galpão onde mudara-se apenas a tipologia de treliça para a do tipo banzos paralelos.

Figura 11 - Treliça de Banzos Paralelos (TP)



Fonte: autora.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para a execução desta pesquisa.

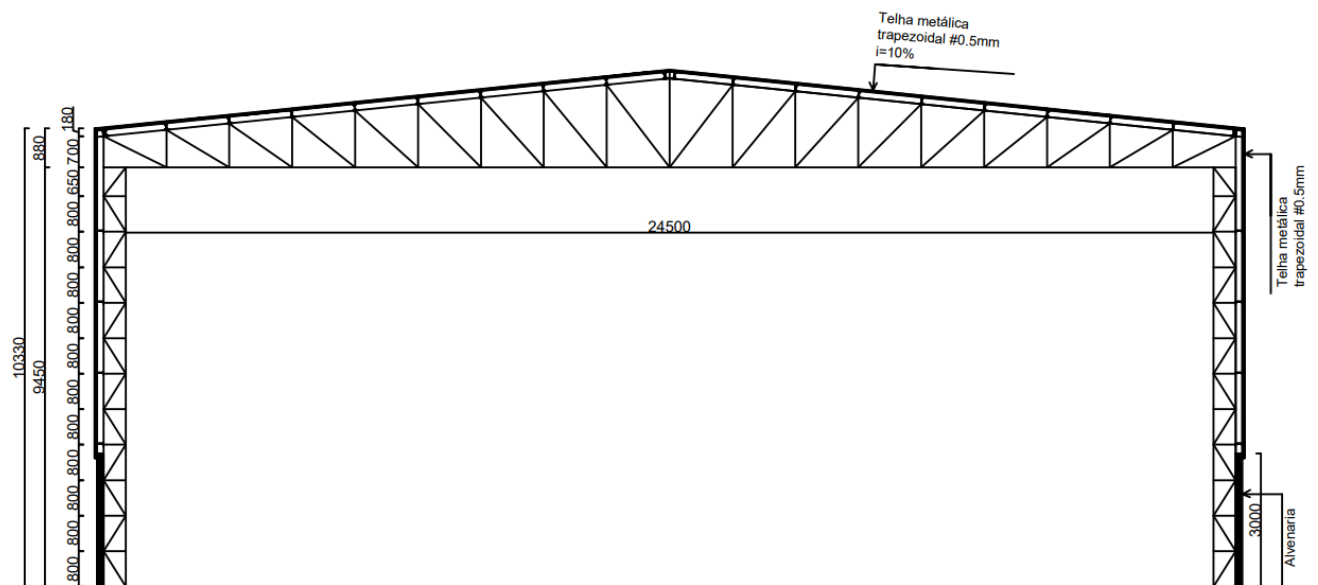
3.1 DESENHO DO ESTUDO (TIPO DE ESTUDO)

Quanto à finalidade metodológica este estudo é do tipo aplicado. Quanto a natureza/abordagem da pesquisa fora realizada uma análise quali-quantitativa, quanto ao objeto metodológico é uma pesquisa exploratória. E quanto ao procedimento metodológico trata-se de um estudo de caso.

3.2 OBJETO DE ESTUDO

O objeto aqui estudado é um galpão em estrutura metálica, projetado para a cidade de Caldas Novas - GO, desenvolvido pelos acadêmicos Kainnã Lundller Ribeiro e Mariana Gonçalves Chaves da Silva, no decorrer da disciplina de Projeto de Estruturas de Aço, orientados pelo Prof. Esp. José Silvério, no primeiro semestre de 2019. Projetado para fim industrial, o galpão apresenta treliça do tipo Trapezoidal, com ligações flexíveis de 2º gênero entre os pilares e a base, vão de 24,50 metros, inclinação do telhado de 10%, com pórticos espaçados a cada 6 metros. Todas as medidas estão em milímetros, conforme a Figura 12 abaixo.

Figura 12 - Galpão (objeto de estudo).



Fonte: autora.

3.3 ETAPAS DA PESQUISA

3.3.1 Vento na estrutura do galpão

A NBR 6123:1988 estabelece o procedimento para o cálculo das forças devido ao vento nas edificações que fora executado no presente estudo.

- a. Fora determinada a velocidade básica do vento (V_0) em m/s, por meio do mapa das Isopletas, Figura 1 da NBR, que estabelece as velocidades de vento para diversas regiões do país, com período médio de ocorrência de 50 anos, no caso de Caldas Novas - GO, esse valor fora igual a 35 m/s;
- b. Fator topográfico - S1: fora levado em consideração as variações do relevo do terreno para sua determinação, no caso do Galpão Industrial, objeto de estudo, o fator S1 fora igual a uma unidade, pois considerara-se o terreno plano ou fracamente acidentado;
- c. Fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno - S2: este fator considera o efeito combinado destas três variáveis, logo, fora determinado por meio da Tabela 2 da NBR, que estabelece as categorias de I a V para a rugosidade do terreno, as classes de A a C para as dimensões da edificação e o número Z que é a altura total da edificação. Neste caso, o fator S2 é igual 0,80, tendo em vista que pertence a Categoria IV, Classe C;
- d. Fator estatístico - S3: este fator considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação, para tanto, fora determinado por meio da Tabela 3 da NBR que divide as edificações em grupos. No caso do Galpão Industrial estudado, pertencera ao grupo 2, logo, o fator S3 fora igual a uma unidade;
- e. Velocidade característica do vento - VK: fora estabelecida pela multiplicação dos fatores S1, S2 e S3, e a velocidade básica do vento (V_0):

$$VK = V_0 * S_1 * S_2 * S_3$$

$$VK = 35 * 1 * 0,80 * 1$$

$$VK = 28 \text{ m/s}$$

- f. Pressão dinâmica (q): fora determinada pela expressão a seguir:

$$q = 0,613 * VK^2$$

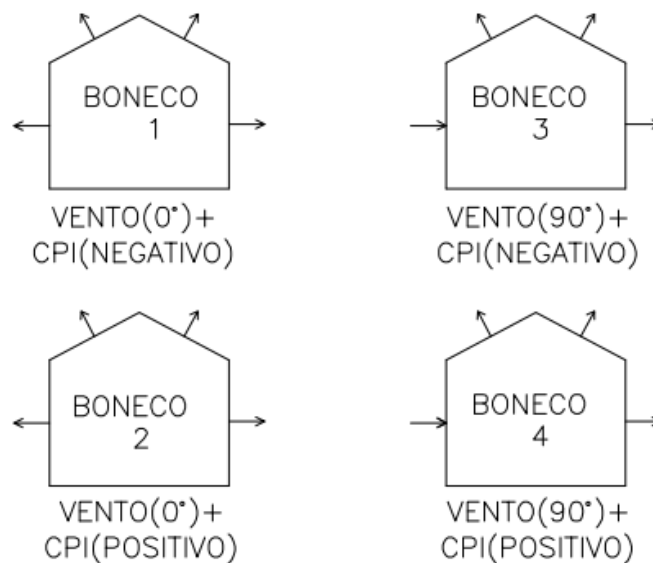
$$q = 0,613 * 28^2$$

$$q = 48,06 \text{ kgf/m}^2$$

- g. Coeficientes de pressão e de forma, externos - CPE: para obter os valores desses coeficientes analisara-se a Tabela 4 da NBR que estabelece os CPEs para as paredes, e a Tabela 5 da NBR que estabelece os CPEs para os telhados. Ambas consideraram a atuação do vento na estrutura com ângulos de 0° e 90° .

- h. Coeficientes de pressão externa - CPI: para obter os valores destes coeficientes, as quatro faces do galpão foram consideradas permeáveis com CPI igual a -0,3 ou 0, onde o valor adotado fora o mais nocivo à estrutura;
- i. O resultado dessas combinações de valores dos CPEs e CPI foram quatro “bonecos”, dois considerando o ângulo a 90° mais CPI -0,3 e 0, e dois considerando o ângulo a 0° e CPI -0,3 e 0, conforme a Figura 13 abaixo:

Figura 13 - Determinação dos coeficientes de pressão para paredes e telhados.



Fonte: Material do Prof. José Silvério.

3.3.2 Carregamento na estrutura do galpão

Nesta etapa, segundo a NBR 14762:2010, foram consideradas as ações permanentes na estrutura, em kgf por unidade de m², são elas: peso das telhas, das instalações, do forro de gesso e o peso próprio da estrutura, e ainda, levar-se em importância a ação variável que, segundo o anexo B da NBR 8800:2008, é a sobrecarga de utilização em kgf por unidade de m².

As ações foram combinadas com a força do vento, resultando num total de quatro combinações, numeradas a seguir, que foram aplicadas nos quatro “bonecos” e calculadas para as quatro partes do galpão (coluna esquerda e direita, telhado esquerdo e direito), no entanto, este trabalho se ativera somente ao telhado da estrutura. Nestas combinações as ações foram majoradas, conforme os coeficientes das equações relacionadas abaixo:

- a. Combinação da ação permanente - AP com a sobrecarga de utilização - SC:

$$1,4 * AP + 1,5 * SC$$

Aqui fora calculada para apenas um boneco, pois não houvera força do vento.

- b. Combinação da ação permanente - AP com a sobrecarga de utilização - SC e a Força do Vento - FV:

$$1,4 * AP + 1,5 * SC + 1,4 * 0,6 * (-FV)$$

- c. Combinação da ação permanente – AP com a sobrecarga de utilização - SC e a Força do Vento - FV:

$$1,4 * AP + 1,5 * 0,7 * SC + 1,4 * (-FV)$$

- d. Combinação da ação permanente - AP com a força do vento - FV:

$$AP + 1,4 * (-FV)$$

Todas estas combinações foram lançadas e calculadas no *Software* AutoMetal com o objetivo de determinar situações de carregamento que ocorreram na estrutura do galpão.

3.3.3 Lançamento das treliças no *Software* AutoMetal

Este capítulo apresenta as treliças que foram lançadas no *Software* AutoMetal.

3.3.3.1 Treliça Triangular - TT

a. Geração Automática de Geometrias: nesta etapa os valores usados para a entrada de dados no programa foram o vão igual a 25,50 m, inclinação do banzo superior igual a 10%, altura do primeiro montante igual a zero, por se tratar de uma treliça triangular, máxima distância entre as terças igual a 1,50 m, e o número de divisões entre as terças fora igual a zero.

b. Os apoios nas extremidades da treliça foram considerados fixos, onde a mesma fora analisada separadamente.

c. No carregamento da estrutura foram considerados os seguintes valores: peso das telhas igual a 4,56 kgf/m², conforme o catálogo da METFORM, peso estimado das terças igual a 6 kgf/m², sobrecarga de utilização igual a 25 kgf/m², segundo consta na NBR 8800:2008, e a carga genérica igual a 20 kgf/m², na qual fora feita a somatória do peso de forro de gesso (15kgf/m²), em conformidade com a NBR 6120:2019, com o peso próprio dos outros elementos da estrutura estimado em 6 kgf/m².

d. As combinações de ações foram lançadas no *software* conforme o item 3.3.2, do presente estudo.

3.3.3.2 Treliça Trapezoidal – TZ

a. Geração Automática de Geometrias: nesta etapa os valores usados para a entrada de dados no programa foram o vão igual a 25,50 m, inclinação do banzo superior igual a 10%, altura do primeiro montante igual a 0,70 m, máxima distância entre as terças igual a 1,50 m, e o número de divisões entre as terças foi igual a zero, conforme o projeto.

b. Os apoios nas extremidades da treliça, foram considerados fixos, onde a mesma fora analisada separadamente.

c. No carregamento da estrutura foram considerados os seguintes valores: peso das telhas igual a 4,56 kgf/m², conforme o catálogo da METFORM, peso estimado das terças igual a 6 kgf/m², sobrecarga de utilização igual a 25 kgf/m², segundo consta na NBR 8800:2008, e a carga genérica igual a 20 kgf/m², na qual fora feita a somatória do peso de forro de gesso (15kgf/m²), em conformidade com a NBR 6120:2019, com o peso próprio dos outros elementos da estrutura estimado em 6 kgf/m².

d. As combinações de ações foram lançadas no *software* conforme o item 3.3.2, do presente estudo.

3.3.3.3 Treliça Banzos Paralelos – TP

a. Geração Automática de Geometrias: nesta etapa os valores usados para a entrada de dados no programa foram o vão igual a 25,50 m, inclinação do banzo superior e inferior igual a 10%, altura do primeiro montante igual a 0,70 m, máxima distância entre as terças igual a 1,50 m, e o número de divisões entre as terças foi igual a 3, conforme o projeto.

b. Os apoios nas extremidades da treliça, foram considerados fixos, onde a mesma fora analisada separadamente.

c. No carregamento da estrutura foram considerados os seguintes valores: peso das telhas igual a 4,56 kgf/m², conforme o catálogo da METFORM, peso estimado das terças igual a 6 kgf/m², sobrecarga de utilização igual a 25 kgf/m², segundo consta na NBR 8800:2008, e a carga genérica igual a 20 kgf/m², na qual fora feita a somatória do peso de forro de gesso (15kgf/m²), em conformidade com a NBR 6120:2019, com o peso próprio dos outros elementos da estrutura, estimado em 6 kgf/m².

d. As combinações de ações foram lançadas no *software* conforme o item 3.3.2, do presente estudo.

3.3.4 Planilha com valores de tração e compressão

Por meio do *Software* AutoMetal, foram geradas 3 (três) planilhas, uma para cada tipologia de treliça, com as 13 combinações e os valores de tração e compressão de cada uma das suas barras (banzos superiores e inferiores, montantes e diagonais). Insta destacar que, as duas últimas colunas desta planilha possuem as maiores solicitações de tração e compressão que foram utilizadas para dimensionar as os perfis de aço das treliças.

3.3.5 Tração nas peças e escolha dos perfis

Aqui fora considerada apenas a seção líquida das peças, ou seja, sem ligações parafusadas, pois os perfis serão soldados.

1. Entrada dos dados;

NT, SD (Normal de Tração Solicitante de Cálculo) - kgf

2. Cálculo da Área Mínima;

$$A_{mín} = \frac{NT, SD * 1,1}{FY}$$

Com as tabelas da norma 6355 fora adotado, inicialmente, um perfil do tipo U simples para entrada dos dados através da determinação da área mínima.

3. Fora escolhido o Perfil por meio das tabelas na norma 6355;

Entrada dos dados do Perfil de aço;

Rx (raio de giração no eixo x) – cm

Ry (raio de giração no eixo y) – cm

A (área a seção transversal da peça) – cm²

Kx e Ky (Condição de Contorno da Estrutura) – adimensional

Lbx (Comprimento de Flambagem em Torno do eixo x) – cm

Lby (Comprimento de Flambagem em Torno do eixo y) – cm

FY (Tensão de escoamento do aço) – kgf/cm²

4. Cálculo de Esbeltez em x;

$$\gamma_x = \frac{Kx * Lbx}{Rx}$$

5. Cálculo da Esbeltez em y;

$$\gamma_y = \frac{Ky * Lby}{Ry}$$

6. Caso as Esbeltez tivessem sido menor que 300, deveria ter sido uso outro perfil, pois o inicial fora muito esbelto;

7. Cálculo da NT, RD (Normal de Tração Resistente de Cálculo);

$$NT, RD = \frac{A * FY}{1,1}$$

8. Comparar a NT, SD com a NT, RD;

Caso a Normal de Tração Resistente de Cálculo (NT, RD) tivesse sido maior que a Normal de Tração Solicitante de Cálculo (NT, SD) o perfil atenderia à solicitação, do contrário, outro perfil deveria ter sido adotado.

3.3.6 Compressão nas peças e escolha dos perfis

1. Cálculo da Área Mínima;

$$A_{mín} = \frac{NC, SD * 1,1}{FY}$$

Com as tabelas da norma 6355 fora adotado, inicialmente, um perfil do tipo U simples para entrada dos dados através da determinação da área mínima.

2. Entrada dos dados do perfil em planilha do Excel;

I_x e I_y (Inércia em x e em y) – cm^4

R_x (raio de giração no eixo x) – cm

R_y (raio de giração no eixo y) – cm

R_0 (Raio de giração) - cm

CW (Constante de empenamento) - cm^5

J (Constante de torção uniforme - cm^4

A (área a seção transversal da peça) – cm^2

K_x e K_y (Condição de Contorno da Estrutura) – adimensional

E (Módulo de elasticidade do aço) – kgf/cm^2

G (Porcentagem do módulo de elasticidade) - kgf/cm^2

FY (Tensão de escoamento do aço) - kgf/cm^2

3. Cálculo de Esbeltez em x;

$$\gamma_x = \frac{K_x * L_{bx}}{R_x}$$

4. Cálculo da Esbeltez em y;

$$\gamma_y = \frac{K_y * L_{by}}{R_y}$$

5. Caso as Esbeltez tivessem sido menor que 200, deveria ter sido uso outro perfil, pois o inicial fora muito esbelto;

6. Para Perfis do tipo U simples, U enrijecido, Z simples e Z enrijecido;

- a) Cálculo da Flambagem por Flexão em y;

$$NEY = \frac{\pi^2 * E * I_y}{(K_y * L_{by})^2}$$

- b) Cálculo da Flambagem por Flexão em x;

$$NEX = \frac{\pi^2 * E * I_x}{(K_x * L_{bx})^2}$$

- c) Flambagem por Torção em Z;

$$NEZ = \frac{1}{R_0^2} * \left[(G * J) + \frac{\pi^2 * E * CW}{(K_z * L_{bz})^2} \right]$$

Onde K_z e L_{bz} foram os menores valores entre K_x e K_y e entre L_{bx} e L_{by} .

- d) Flambagem Flexo Torcional;

$$NEXZ = \frac{NEX + NEY}{2 * \left[1 - \left(\frac{X0}{R0}\right)^2\right]} * \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{4 * NEX * NEZ * \left[1 - \left(\frac{X0}{R0}\right)^2\right]}{(NEX + NEZ)^2}\right)}\right]$$

7. Definição da NE (Normal Elástica);

A Normal Elástica fora o menor valor entre NEX, NEY, NEZ e NEXZ.

8. Cálculo da Esbeltez Reduzida do Perfil (γ_0);

$$\gamma_0 = \left(\frac{A * FY}{NE}\right)^{0,5}$$

9. Caso o γ_0 tivesse sido $\leq 1,5$, deveria ter sido usada a seguinte fórmula;

$$X(PERFIL) = 0,658\gamma_0^2$$

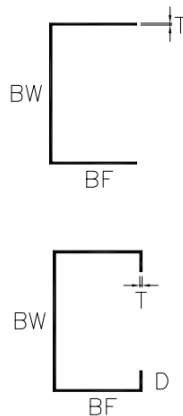
10. Caso o γ_0 tivesse sido $> 1,5$, deveria ter sido usada a seguinte fórmula;

$$X(PERFIL) = \frac{0,877}{\gamma_0^2}$$

11. Entrada de dados do perfil;

A Figura 14, a seguir, representa a nomenclatura das partes de dois tipos de perfis, U simples e U enrijecido, neste estudo fora adotado o perfil do tipo U simples.

Figura 14 - Perfis U simples e U enrijecido



Fonte: Material do Prof. José Silvério.

Os dados T, BF, BW e D foram usados em cm.

12. Cálculo do Neta (η);

$$\eta = \frac{BF}{BW}$$

13. Fora utilizada a tabela 9 da NBR 14762:2010

O perfil fora classificado no caso “a”, pois é do tipo U simples.

$$K = 4 + 3,4 * \eta + 21,8 * \eta^2 - 174,3 * \eta^3 + 319,9 * \eta^4 - 237,6 * \eta^5 + 63,6 * \eta^6$$

14. Normal Elástica para flambagem local (kN);

$$N1 = \left(\frac{K * \pi^2 * E}{12 * (1 - \nu^2) * \left(\frac{BW}{T}\right)^2} \right) * A$$

15. Cálculo da Esbeltez Reduzida Local (γP);

$$\gamma P = \left(\frac{X * A * FY}{N1} \right)^{0,5}$$

16. Caso o γP tivesse sido $\leq 0,776$, a área efetiva deveria ser igual à área bruta;

17. Caso γP tivesse sido $> 0,776$, deveria ter sido usada a seguinte fórmula;

$$\gamma P = A * \left[1 - \left(\frac{0,15}{\gamma P^{0,8}} \right) \right] * \left(\frac{1}{\gamma P^{0,8}} \right)$$

18. Cálculo da Normal de Compressão Resistente de Cálculo (kN);

$$NC, RD = \frac{X * A_{efetiva} * FY}{1,2}$$

19. Caso a Normal de Compressão que resiste (NC, RD) tivesse sido maior que a Normal de Compressão que atuou (NC, SD) o perfil atenderia à solicitação, do contrário, outro perfil deveria ter sido adotado.

3.3.7 Critérios para escolha dos perfis

Os critérios para escolhas dos perfis em aço, que obtiveram resistências maiores em relação às solicitações de cálculo, foram os seguintes:

1. Os perfis deveriam ser comerciais, para tanto, fora utilizado o catálogo de perfis da empresa Gerdal;
2. A porcentagem de uso dos perfis deveria ser próxima de 100%;
3. Encaixe dos perfis;
4. Para as barras submetidas à tração, o perfil escolhido necessitou, também, atender aos critérios de compressão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos ao longo desta pesquisa, bem como as discussões acerca destes resultados.

4.1 PERFIS ESCOLHIDOS

A seguir estão relacionadas as planilhas, referentes às três tipologias de treliças (triangular, trapezoidal e banzos paralelos), que apontam os perfis de chapas dobradas calculados para compor as partes de cada uma dessas treliças.

Insta destacar que, encontrara-se a porcentagem do uso de cada perfil escolhido pela correlação entre os valores das forças normais solicitantes (N_c, S_d e N_c, R_d) e as normais resistentes (N_t, S_d e N_t, R_d).

TRELIÇA TRIANGULAR				
Barras submetidas à compressão				
	Banzo Superior	Banzo Inferior	Diagonais	Montantes
N_c, S_d - kN	574,19	130,66	43,25	16,51
Esbeltez X	63,69	63,01	49,11	34,96
Esbeltez Y	48,43	48,10	153,94	109,59
Constante de tração uniforme - cm^4	17,07	8,33	1,29	1,29
Flexão X - kN	1830,39	1502,14	638,49	1259,90
Flexão Y - kN	3175,92	2583,92	64,82	127,91
Torção - kN	3107,97	2499,84	382,56	434,07
Flexo-torção - kN	1566,80	1280,97	311,59	391,81
Cálculo λ_o - kN	0,77	0,77	1,74	1,24
N - kN	0,33	0,33	0,40	0,40
k - kN	4,16	4,16	3,71	3,71
N_1 - kN	2011,11	1001,21	1181,64	1181,64
x - kN	0,78	0,78	0,29	0,53
λ_P - kN	0,60	0,77	0,22	0,30
Área efetiva - cm^2	37,62	30,20	7,81	7,81
N_c, R_d - kN	609,63	491,62	47,37	85,89
Perfil escolhido	300X100X8,00	300X100X6,30	100X40X4,75	100X40X4,75
Uso do Perfil - %	94,19	25,58	91,30	19,22

TRELIÇA TRIANGULAR			
Barras Submetidas à Tração			
	Banzo Superior	Banzo Inferior	Montantes
Nt,Sd - kN	107,47	136,48	54,01
Esbeltez X	60,76	90,47	34,96
Esbeltez Y	151,9	45,49	109,59
Nt,Rd - kN	199,09	543,18	177,50
Perfil escolhido	100X50X4,75	300X100X6,30	100X40X4,75
Uso do Perfil - %	53,98	25,13	30,43

TRELIÇA TRAPEZOIDAL				
Barras submetidas à compressão				
	Banzo Superior	Banzo Inferior	Diagonais	Montantes
Nc,Sd - kN	222,74	168,96	48,72	60,87
Esbeltez X	94,31	100,28	60,76	52,12
Esbeltez Y	63,56	105,46	151,90	130,30
Constante de tração uniforme - cm4	5,83	5,00	1,43	1,43
Flexão X - kN	460,83	345,79	469,29	637,75
Flexão Y- kN	1017,38	313,58	75,25	102,26
Torção - kN	958,10	500,47	297,87	314,56
Flexo-torção - kN	400,66	305,76	225,54	255,42
Cálculo λ_o - kN	1,14	1,20	1,71	1,46
N - kN	0,38	0,25	0,50	0,50
k - kN	3,89	4,52	2,93	2,93
N1 - kN	1447,78	1427,54	1045,02	1045,02
x - kN	0,58	0,55	0,30	0,41
λ_P - kN	0,46	0,41	0,25	0,29
Área efetiva - cm ²	20,75	17,60	8,76	8,76
Nc,Rd - kN	251,44	200,77	55,00	74,47
Perfil escolhido	200X75X6,30	200X50X6,30	100X50X4,75	100X50X4,75
Uso do Perfil - %	88,59	84,16	88,59	81,74

TRELIÇA TRAPEZOIDAL	
Barras Submetidas à Tração	
	Diagonais
Nt,Sd - kN	107,47
Esbeltez X	60,76
Esbeltez Y	151,9
Nt,Rd - kN	199,09
Perfil escolhido	100X50X4,75
Uso do Perfil - %	53,98

TRELIÇA BANZOS PARALELOS			
Barras submetidas à compressão			
	Banzo Superior	Banzo Inferior	Diagonais
Nc,Sd - kN	200,67	240,38	47,44
Esbeltez X	94,31	94,31	27,62
Esbeltez Y	63,56	63,56	64,22
Constante de tração uniforme - cm ⁴	5,83	5,83	1,11
Flexão X - kN	460,83	460,83	1710,57
Flexão Y- kN	1017,38	1017,38	315,41
Torção - kN	958,10	958,10	601,37
Flexo-torção - kN	400,66	400,66	515,55
Cálculo λ_0 - kN	1,14	1,14	0,72
N - kN	0,38	0,38	0,53
k - kN	3,89	3,89	2,67
N1 - kN	1447,78	1447,78	1279,59
x - kN	0,58	0,58	0,80
λ_P - kN	0,46	0,46	0,32
Área efetiva - cm ²	20,75	20,75	6,62
Nc,Rd - kN	251,44	251,44	110,72
Perfil escolhido	200X75X6,30	200X75X6,30	75X40X4,75
Uso do Perfil - %	79,81	95,60	42,85

4.2 CONSUMO DE AÇO DE CADA TIPOLOGIA

A planilha, a seguir, apresenta o consumo de aço das três tipologias de treliça, no que se refere aos seus elementos estruturais, após o dimensionamento dos perfis metálicos.

CONSUMO DE AÇO			
	Treliça Triangular - TT	Treliça Trapezoidal - TZ	Treliça Banzos Paralelos -TP
Banzo Superior	757,15	417,68	417,68
Banzo Inferior	604,35	352,16	418,00
Diagonais	155,70	239,29	292,14
Montantes	72,27	162,85	-
Total - kgf	1589,47	1171,97	1127,81

Os resultados revelam que a treliça do tipo triangular obtivera o maior consumo de aço, em razão de possuir a menor rigidez entre as estruturas, fato que se justifica pela altura inicial no encontro entre os banzos superiores e inferior ser igual a zero fazendo com que seus banzos superiores sejam os mais solicitados em relação aos das demais.

Ademais, o consumo de aço das outras duas tipologias fora parecido, a TP obtivera o menor consumo, cerca de 4% inferior ao da TZ, entretanto, tal treliça necessita do emprego de tirantes, ligando os apoios, para enrijecer sua estrutura aumentando seu peso próprio.

Em síntese, com base nos resultados obtidos e nas características de cada uma das treliças, conclui-se que a tipologia mais adequada para se empregar no Galpão industrial, aqui estudado, é a do tipo trapezoidal, em função de possuir um consumo de aço próximo ao da banzos paralelos e não necessitar do uso de estrutura adicional, como os tirantes.

REFERÊNCIAS

ANA LYDIA REIS DE CASTRO E SILVA (Minas Gerais). Universidade Federal de Minas Gerais. **Centro de Estudos de Estruturas de Aço e Mistras de Aço e Concreto**. 2020. Disponível em: <<https://www.sites.google.com/site/acoufmg/home>>. Acesso em: 21 out. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2010. 93 p.

_____. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 1980. 6 p.

_____. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 1988. 66 p.

_____. **NBR 6355**: Perfis estruturais de aço formados a frio - Padronização. 4 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2012. 36 p.

_____. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2003. 15 p.

_____. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2008. 237 p.

AÇO, O Calculista de. **Perfis estruturais, chapas e barras**. 2018. Disponível em: <<http://calculistadeaco.com.br/capitulo-1-perfis-estruturais-chapas-e-barras/>>. Acesso em: 15 mar. 2019.

BELLEI, Ildony Hélio. **Edifícios Industriais em Aço: Projeto e Cálculo**. 2. ed. São Paulo: Pini Ltda, 1998. 483 f.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA (Brasil). **Introdução - Crescimento e vantagens do uso do aço na Construção Civil**. 2018. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6334-introducao-crescimento-e-vantagens-do-uso-do-aco-na-construcao-civil#.XJIqoslKgoB>. Acesso em: 10 mar. 2019.

CORRÊA, Natália Morais. **VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DE UM GALPÃO INDUSTRIAL COM ESTRUTURA DE AÇO CONSTITUÍDA POR PERFIS FORMADOS A FRIO**. 2018. 101 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Cap. 4.

DE BRITO, Mauro César. **Estruturas de Cobertura**. Departamento de Artes e Arquitetura, Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiânia, 2010.

GARCIA, João Pedro Magalhães; BATISTA, Eduardo de Miranda; FRANCO, Juarez Moara Santos. STABILITY AND RESISTANCE OF STRUCTURAL COLD-FORMED STEEL ELEMENTS WITH STIFFENED SECTIONS. **Proceedings Of The Xxxviii Iberian Latin American Congress On Computational Methods In Engineering**, Rio de Janeiro, p.1-20, 1 jan. 2017. ABMEC Brazilian Association of Computational Methods in Engineering. <http://dx.doi.org/10.20906/cps/cilamce2017-0463>.

JOHNSON, Sara. AÇO BRASIL ENTREVISTA – DIRETORA SÊNIOR DE PESQUISAS DA IHS MARKIT ECONOMICS. **Aço Brasil Informa**. Rio de Janeiro, p. 1-4. 10 abr. 2019. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/siderurgiaemfoco/Aco_Brasil_Informa_Out16_web.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2019.

METAIS, R4. **Galpão Metálico**. 2016. Disponível em: <<http://r4metais.com.br/galpaometalico.aspx>>. Acesso em: 17 mar. 2019.

SILVA, Mauro César de Brito e. **Estruturas de cobertura**. Goiânia: Passei Direto, 2010. 32 slides, color.

SUL, Prefeitura da Paraíba do. **Turismo**. 2018. Disponível em: <<http://paraibadosul.rj.gov.br/turismo/arquitetura>>. Acesso em: 05 mar. 2019.

