



**CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**DALILA LUZ FERREIRA DA SILVA**

**ANÁLISE PARAMÉTRICA DE TRELIÇAS METÁLICAS TIPO HOWE  
COMPOSTAS POR PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO**

**FORTALEZA  
2020**

DALILA LUZ FERREIRA DA SILVA

ANÁLISE PARAMÉTRICA DE TRELIÇAS METÁLICAS TIPO HOWE COMPOSTAS  
POR PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao curso de Engenharia Civil  
do Centro Universitário Christus, como  
requisito parcial para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. MSc. Mariana de  
Araújo Leite

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Centro Universitário Christus - Unichristus  
Gerada automaticamente pelo Sistema de Elaboração de Ficha Catalográfica do  
Centro Universitário Christus - Unichristus, com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586a Silva, Dalila Luz Ferreira da.  
Análise paramétrica de treliças metálicas tipo Howe  
compostas por perfis de aço formados a frio / Dalila Luz Ferreira  
da Silva. - 2020.  
100 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro  
Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil,  
Fortaleza, 2020.  
Orientação: Profa. Ma. Mariana de Araújo Leite.

1. Estruturas metálicas. 2. Análise paramétrica. 3. Cobertura  
treliçada. 4. Perfis formados a frio. I. Título.

CDD 624

DALILA LUZ FERREIRA DA SILVA

ANÁLISE PARAMÉTRICA DE TRELIÇAS METÁLICAS TIPO HOWE  
COMPOSTAS POR PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao curso de Engenharia Civil  
do Centro Universitário Christus, como  
requisito parcial para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> MSc. Mariana de  
Araújo Leite.

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

BANCA EXAMINADORA

---

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> MSc. Mariana de Araújo Leite  
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

---

Prof. MSc. Bergson da Silva Matias  
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

---

Prof. MSc. Agérbon César Cunha da Nobrega  
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

## RESUMO

O uso de estruturas metálicas está cada vez mais presente no mercado brasileiro da construção, especialmente pelos benefícios que as peças metálicas industrializadas trazem frente ao método convencional de construção em concreto armado. Porém, para que esses benefícios sejam aproveitados, é indispensável ter um projeto bem elaborado, que vise o uso eficiente dos materiais e a consequente redução de custos. Contudo, o elevado número de variáveis envolvidas na representação do projeto de estruturas torna a concepção estrutural um processo pouco intuitivo. A definição da combinação que conduz à extração do melhor desempenho de um sistema fica, desse modo, condicionado à experiência e sensibilidade do projetista. Com o intuito de minimizar essa dependência e auxiliar no processo de tomada de decisão, muitos trabalhos buscam testar a eficiência de diversos sistemas em diversas condições. Dito isto, o presente estudo vem a dar suporte à fase de concepção estrutural, por meio de uma análise da eficiência estrutural para treliças de cobertas metálicas executadas com perfis formados a frio. Para isso, utilizou-se como meio de validação e exemplificação, um estudo de caso de cobertura para ônibus na cidade de Fortaleza. Na análise variaram-se dois parâmetros fundamentais de projeto, sendo estes parâmetros velocidade básica do vento atuante e a geometria do perfil estrutural empregado. A variação dos parâmetros é aplicada a uma viga treliçada com banzo inferior reto. Os perfis testados foram o perfil U e perfil cantoneira em sua forma dupla e a combinação destes. Toda a análise e dimensionamento foi realizada utilizando-se do *software* MCalc 3d. Os resultados mostraram que com a variação paramétrica tem-se resultados distintos de comportamento estrutural e que isso impacta diretamente no custo de execução, estimado por meio da massa de aço em cada solução. Comparando-se o consumo de aço com a resposta estrutural dos modelos pode-se compreender que, a treliça composta pela associação do perfil U com o perfil cantoneira na forma dupla, se apresenta como solução mais vantajosa para o tipo de estrutura em estudo. Uma vez que este arranjo apresenta valores intermediários que deformação e consumo de aço.

**Palavras chaves:** Estrutura metálica. Análise paramétrica. Cobertura treliçada. Perfis formados a frio.

## ABSTRACT

The use of steel structures is increasingly present in the Brazilian construction market, especially due to the benefits that industrialized metal parts bring to the conventional method of construction in reinforced concrete. However, for these benefits to be taken advantage of, it is essential to have a well-designed project, aimed at the efficient use of materials and the consequent cost reduction. However, the high number of variables involved in representing the design of structures makes the structural design a little intuitive process. The definition of the combination that leads to the extraction of the best performance of a system is, therefore, conditioned to the experience and sensitivity of the designer. In order to minimize this dependency and assist in the decision-making process, many studies seek to test the efficiency of different systems under different conditions. That said, the present study supports the structural design phase, through an analysis of the structural efficiency for metal roof trusses made with cold formed profiles. For this, a case study of bus decking in the city of Fortaleza was used as a means of validation and exemplification. In the analysis, two fundamental design parameters were varied, these parameters being the basic speed of the acting wind and the geometry of the structural profile employed. The variation of the parameters is applied to a lattice beam with straight lower flange. The tested profiles were the U profile and corner profile in their double form and their combination. All analysis and dimensioning was performed using the MCalc 3d software. The results showed that with the parametric variation there are different results of structural behavior and that this directly impacts the cost of execution, estimated through the mass of steel in each solution. Comparing the steel consumption with the structural response of the models, it is possible to understand that the truss composed by the association of the U profile with the corner profile in the double form, presents itself as the most advantageous solution for the type of structure under study. Since this arrangement presents intermediate values that deform and consume steel.

**Keywords:** Steel structure. Parametric analysis. Truss cover. Cold formed profiles.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gráfico Tensão Deformação .....	23
Figura 2 – Variações de configuração do Perfil Cantoneira .....	25
Figura 3 – Processo de Laminação.....	26
Figura 4 – Perfil I soldado.....	27
Figura 5 – Processo de Dobramento de Chapas .....	28
Figura 6 – Treliça plana com nomenclatura dos elementos componentes.....	29
Figura 7 – Sistemas estruturais: (a) elemento triangular; (b) elemento retangular; (c) elemento poligonal .....	30
Figura 8 – Formação de uma treliça plana simples de ponte Howe .....	31
Figura 9 – Exemplos de treliças planas compostas .....	32
Figura 10 – Exemplos de treliças planas complexas.....	32
Figura 11 – Exemplos de treliças Pratt.....	34
Figura 12 – Exemplos de treliças Howe .....	34
Figura 13 – Exemplos de treliças Warren.....	35
Figura 14 – Análise inicial treliças. ....	36
Figura 15 – Caminho dos esforços em uma estrutura.....	38
Figura 16 – Cargas aplicadas nos nós de treliças gerando cargas axiais .....	39
Figura 17 – Método dos Nós. ....	40
Figura 18 – Método das Seções.....	41
Figura 19 – Fluxograma resumo dos procedimentos metodológicos .....	51
Figura 20 – Anteprojeto: Vista Superior.....	53
Figura 21 – Anteprojeto: Corte A-A .....	54
Figura 22 – Modelo .....	56
Figura 23 – Deformada Combinação 1.....	59
Figura 24 – Deformada Combinação 2.....	59
Figura 25 – Deformada Combinação 3.....	60
Figura 26 – Deformada Combinação 4.....	60
Figura 27 – Deformada Combinação 5.....	61
Figura 28 – Nós da Treliça .....	66
Figura 29 – Interface do Programa Mcalc 3d. ....	76
Figura 30 – Janela Assistente de Geração.....	78
Figura 31 – Abas do menu geometria .....	79

Figura 32 – Janela Propriedades .....	80
Figura 33 – Janela Análise .....	81
Figura 34 – Janela Configuração do Relatório .....	82
Figura 35 – Janela de Processo de Análise .....	83
Figura 36 – Aba Dimensionar/ Módulo Dimensionamento .....	83
Figura 37 – Janela Perfis.....	84
Figura 38 – Perfis Formados a Frio.....	85



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Variação Paramétrica.....	56
Tabela 2- Perfil dupla cantoneira – Vento 40 m/s.....	63
Tabela 3- Índices Solicitação/Resistência carregamento de vento de 30 m/s.....	64
Tabela 4- Índices Solicitação/Resistência carregamento de vento de 35 m/s.....	64
Tabela 5- Índices Solicitação/Resistência carregamento de vento de 40 m/s.....	64
Tabela 6- Resumo consumo de aço.....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBCA	Centro Brasileiro da Construção em Aço
E	Módulo de Elasticidade
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
$f_u$	Tensão de Ruptura
$f_y$	Tensão de Escoamento
G	Módulo de Elasticidade Transversal
K	Coefficiente de Flambagem
L	Comprimento Destravado
NBR	Norma Brasileira
PFF	Perfil Formado a Frio
$r$	Raio de Giração
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\alpha$	Coefficiente de Dilatação Térmica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>12</b>
1.1.1	<i>Objetivo geral.....</i>	12
1.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	13
<b>1.2</b>	<b>Estrutura do trabalho .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Estruturas Metálicas.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Aços Estruturais .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Perfis Metálicos Estruturais.....</b>	<b>24</b>
2.3.1	<i>Perfis Laminados .....</i>	25
2.3.2	<i>Perfis Soldados.....</i>	26
2.3.3	<i>Perfis Formados a Frio .....</i>	27
<b>2.4</b>	<b>Treliças .....</b>	<b>29</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise comparativa de treliças tradicionais .....</b>	<b>35</b>
<b>2.5</b>	<b>Análise de Estruturas Metálicas.....</b>	<b>37</b>
2.5.1	<i>Método dos Nós.....</i>	39
2.5.2	<i>Método das Seções.....</i>	40
<b>2.6</b>	<b>Ações em Estruturas .....</b>	<b>41</b>
2.6.1	<i>Combinações de Ações para os ELU.....</i>	42
2.6.2	<i>Combinações de ações para os ELS.....</i>	44
2.6.3	<i>Vento .....</i>	45
<b>2.7</b>	<b>Dimensionamento de Estruturas Metálicas.....</b>	<b>45</b>
2.7.1	<i>Softwares de Dimensionamento.....</i>	48
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1</b>	<b>Enquadramento metodológico .....</b>	<b>50</b>
<b>3.2</b>	<b>Fluxograma de atividades.....</b>	<b>51</b>
3.2.1	<i>Levantamento bibliográfico.....</i>	51
3.2.2	<i>Escolha do objeto de estudo.....</i>	52
3.2.3	<i>Escolha dos Parâmetros em Análise .....</i>	54
3.2.3.1	<i>Caracterização dos Modelos .....</i>	55
<b>3.3</b>	<b>Análise e Dimensionamento .....</b>	<b>56</b>
3.3.1	<i>Carregamentos.....</i>	57

3.3.1.1	<i>Ações Permanentes</i> .....	57
3.3.1.2	<i>Ações Variáveis</i> .....	57
3.3.1.3	<i>Combinação de Ações</i> .....	58
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>62</b>
<b>4.2</b>	<b>Modelagem e Dimensionamento</b> .....	<b>62</b>
<b>4.3</b>	<b>Consumo de Aço</b> .....	<b>66</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>68</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE A – METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO NO MCALC 3D</b> .....	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE B – ÍNDICE SOLICITAÇÃO/RESISTÊNCIA PARA CARREGAMENTO DE VENTO DE 30 M/S</b> .....	<b>88</b>
	<b>APÊNDICE C – ÍNDICE SOLICITAÇÃO/RESISTÊNCIA PARA CARREGAMENTO DE VENTO DE 35 M/S</b> .....	<b>91</b>
	<b>APÊNDICE D – ÍNDICE SOLICITAÇÃO/RESISTENCIA PARA CARREGAMENTO DE VENTO DE 40 M/S</b> .....	<b>94</b>
	<b>APÊNDICE E – DEFORMAÇÕES NODAIS PARA CARREGAMENTO DE VENTO DE 30 M/S</b>	<b>97</b>
	<b>APÊNDICE F – DEFORMAÇÕES NODAIS PARA CARREGAMENTO DE VENTO DE 35 M/S</b>	<b>98</b>
	<b>APÊNDICE G – DEFORMAÇÕES NODAIS PARA CARREGAMENTO DE VENTO DE 40 M/S</b> .....	<b>99</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, optar por uma estrutura metálica em substituição às estruturas tradicionais de concreto armado tem sido mais frequente, seja para a construção de simples cobertas ou para a execução de pontes com enormes vãos. A escolha dessa solução estrutural advém dos benefícios que podem ser obtidos com as estruturas metálicas, como a capacidade do aço de resistir à esforços maiores e com um menor consumo de material, ou ainda a rápida execução proporcionada pelo processo de montagem das estruturas que chegam ao canteiro de obras previamente fabricadas (SAMARRA; REQUENA; JÚNIOR, 2012).

Diante dessas vantagens, um dos usos atuais mais comuns de estruturas metálicas é voltado para a área industrial, que faz uso de galpões com grandes vãos para desenvolver suas atividades, coberturas de supermercados, quadras poliesportivas, centros de exposição e hangares. São também soluções amplamente utilizadas em estruturas de menor porte, como cobertas de garagens e áreas externas residenciais, marquises e pontos de ônibus; e em construções temporárias. Dentre as formas mais recorrentes de arranjos estruturais para essa finalidade estão as treliças metálicas.

Treliças metálicas são elementos estruturais formados por barras que se ligam em nós e formam triângulos (REBELLO, 2000). No modelo básico de cálculo de treliças considera-se que as cargas são aplicadas unicamente sobre os nós, vínculos considerados móveis, não permitindo a transmissão de momentos, possibilitando que as barras constituintes estejam sujeitas apenas a esforços axiais normais de tração e compressão (ABNT NBR 8800:2008). Dessa forma, as treliças metálicas podem ser consideradas estruturas bastante eficientes em problemas que envolvem grandes vãos, pois utilizam um material leve em uma geometria otimizada, com poucos elementos estruturais.

Apesar do uso de treliças metálicas em galpões e cobertas ser recorrente no mercado brasileiro da construção civil, o projeto deve ser elaborado de acordo com a especificidade de cada caso. Em outras palavras, o processo de projeto deve levar em consideração as variáveis de cada caso, onde soluções ótimas devem ser buscadas de forma a reduzir custos e melhorar a eficiência do sistema. Contudo, o elevado número de variáveis envolvidas na representação de um projeto de estrutura

torna a concepção estrutural um processo pouco intuitivo. A definição da combinação que conduz a extração do melhor desempenho de um sistema fica, desse modo, condicionado a experiência e sensibilidade do projetista (NOGUEIRA, 2009).

A escolha do tipo de perfil, da geometria e o tipo de aço a ser utilizado, depende de vários fatores, que devem ser analisados de acordo com as características de cada projeto. Dentre estes fatores podemos mencionar a disponibilidade e facilidade de aquisição, o sistema treliçado escolhido, a compatibilidade com os esforços envolvidos e o atendimento a requisitos estéticos.

Diante desse grande número de variáveis, e com o intuito de minimizar a dependência do projeto à experiência do projetista e auxiliar no processo de tomada de decisão, muitos trabalhos buscam testar a eficiência de diversos sistemas em diversas condições. A partir desse viés, o presente trabalho se propõe a analisar o comportamento estrutural de cobertas metálicas treliçadas a partir da variação de parâmetros de dimensionamento.

Um parâmetro pode ser descrito como uma característica básica necessária para a concepção de projeto satisfatório a destinação final (PAROLIN, 2017). Desta forma, uma análise paramétrica é aquela que estabelece parâmetros para o desenvolvimento de uma estrutura, averigua a resposta dos elementos a uma dada situação e realiza comparação entre esses resultados.

Nesse viés, a análise realizada no presente trabalho, será exemplificada utilizando estudo de caso de cobertura para ônibus na cidade de Fortaleza. Na análise variaram-se dois parâmetros fundamentais de projeto, sendo estes parâmetros o perfil estrutural e a velocidade característica do vento atuante. Dito isto, o presente estudo se justifica por dar suporte à fase de concepção e orçamentação inicial por meio de uma análise da eficiência estrutural para treliças de cobertas metálicas executadas com perfis formados a frio.

## **1.1 Objetivos**

### *1.1.1 Objetivo geral*

Analisar a eficiência estrutural da treliça de cobertura tipo Howe executada com perfis formados a frio pela variação de parâmetros de projeto.

### 1.1.2 *Objetivos específicos*

A fim de alcançar o que foi estabelecido como objetivo geral, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- i. Modelar e dimensionar treliças tipo Howe, por meio de *software* de análise e dimensionamento, realizando variação de parâmetros fundamentais de projeto;
- ii. Determinar a taxa de consumo de aço de cada estrutura modelada
- iii. Comparar a taxa de consumo de aço e a resposta estrutural dos modelos analisados;

## 1.2 **Estrutura do trabalho**

Para facilitar a compreensão do estudo, o presente trabalho foi estruturado em cinco capítulos.

No capítulo um foi apresentada a temática do trabalho, contextualizando e justificando a sua realização, bem como seus objetivos e metodologia.

No capítulo dois apresenta-se o referencial teórico. Neste foi percorrido de forma sucinta sobre estruturas metálicas, aços estruturais e perfis estruturais metálicos, treliças, análise, ações e combinação de ações e dimensionamento de estruturas metálicas, a fim possibilitar a compreensão geral do trabalho. Por fim, foi realizada uma breve apresentação do *software* MCalc 3d, o qual foi utilizado como ferramenta de auxílio.

No capítulo três foi descrita a metodologia, descrevendo o mecanismo da pesquisa realizada, o objeto de estudo e os parâmetros em análise, além das considerações realizadas sobre estes pontos.

No capítulo quatro foram expostos e discutidos os resultados da análise e dimensionamento das estruturas sujeitas às variações paramétricas em análise.

No capítulo cinco são feitas as considerações finais do trabalho, bem como as recomendações dessa temática em futuras pesquisas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo estão contemplados tópicos que servirão de embasamento teórico para melhor compreensão do estudo proposto. Para isso, buscou-se estudar conceitos teóricos básicos sobre o projeto de estruturas treliçadas em aço, abordando conceitos sobre o processo de fabricação dos perfis, projeto e detalhamento de estruturas metálicas. Após é discorrido sobre treliças metálicas, são apresentadas as considerações acatadas sobre análise e dimensionamento, e, por fim, é feita a apresentação do modelo computacional no qual se baseia o programa Mcalc 3d, ferramenta utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

### 2.1 Estruturas Metálicas

Atualmente, optar por uma estrutura metálica em substituição às estruturas tradicionais de concreto armado, por exemplo, tem sido mais frequente, e a escolha por essa solução estrutural advém dos benefícios proporcionados por este sistema. A construção de edificações estruturadas em aço apresenta diversas vantagens, porém para que o potencial dessas estruturas seja bem explorado é necessário um estudo prévio bem desenvolvido (BORSATO, 2009).

Durante o planejamento de uma obra é necessário avaliar todo o processo de concepção da edificação, desde o projeto até a entrega do produto. A começar pela concepção arquitetônica.

Esta é a primeira fase de projeto de uma edificação, em razão disto, todas as indicações e condições sugeridas nesta etapa influenciam de forma significativa todo o processo de projeto e construção da edificação. Nunes (2008) expõe que o sistema de construção em aço proporciona maior liberdade ao projeto arquitetônico e Souza (2002) sustenta que “por meio da arquitetura têm-se os requisitos necessários para a determinação das características geométricas da estrutura”. Borsato (2009) corrobora dizendo que nesse momento também é possível estimar a viabilidade e o custo da obra.

A fase seguinte a concepção arquitetônica é o dimensionamento estrutural. O projeto estrutural de uma edificação tem como objetivo essencial o dimensionamento adequado dos elementos estruturais, com o objetivo de que estes



apresentem resistência suficiente para suportar as possíveis solicitações que podem incidir sobre eles.

Neste sentido, a ABNT NBR 8800:2008 define que no projeto estrutural sejam realizados os cálculos necessários a execução de uma estrutura capaz de atender aos estados limites últimos (ELU) e estados limites de serviço (ELS) pelo período de vida útil previsto para a edificação, permitindo que a fabricação, o transporte, o manuseio e a montagem da estrutura sejam executados de maneira adequada e segura, tendo em consideração a necessidade de manutenção e desmontagem da edificação, uma vez findada sua vida útil.

Estrutura metálica é um sistema construtivo industrializado. Flores e Brito (2005) comunicam que as peças metálicas são produzidas em fábricas e apenas montadas no canteiro de obras, dessa forma, qualquer modificação deve ser considerada com antecedência, a fim de evitar retrabalho e improvisos quando na montagem da estrutura; a possibilidade de falhas, quando na utilização da mesma e o favorecimento de manifestações patológicas.

Como é comum a sistemas construtivos pré-fabricados, as peças estruturais metálicas são produzidas com rigoroso controle tecnológico, de precisão milimétrica, o que propicia que a estrutura seja facilmente aprumada (NARDIN, 2008). É interessante mencionar que o tempo de execução de uma estrutura pré-fabricada é mais célere que o tempo dos sistemas tradicionais existentes no mercado, como o sistema em concreto (TEIXEIRA, 2007; NUNES, 2008).

Uma vez que as peças chegam ao canteiro com medidas precisas a estrutura é prontamente montada, não necessitando de formas, tempo de cura ou escoramento, por exemplo. Outro ponto positivo importante de ser mencionado é que as construções estruturadas em aço são menos sensíveis a mudanças climáticas, como a ocorrência de chuvas, diferente das estruturadas de concreto (NUNES, 2008).

Esta característica de pré-fabricação propicia a racionalização de materiais e mão de obra, elevando a produtividade e segurança dos colaboradores, reduzindo a produção de sobras e desperdício (BORSATO, 2009), possibilitando a utilização de um canteiro de obras reduzido, uma vez que não há necessidade de grandes estoques, produzindo um ambiente mais sustentável (NANDIN, 2008)

As ligações das peças podem ser realizadas por meio de soldas ou parafusos. As realizadas por meio de parafusos permitem maior rapidez na montagem e economia de energia, empregando menos mão de obra e oferecendo uma melhor

resposta as tensões de fadiga (PFIEL E PFIEL, 2008). Existe um apanhado de normas que auxiliam no planejamento das conexões executadas por parafusos e estas podem ser ligações por contato, na qual a carga de cisalhamento é sustentada pelo corpo do parafuso; ou ligações por atrito, onde a carga de cisalhamento é suportada pelo atrito entre as superfícies de contato, que gera uma força de compressão, determinada pelo aperto do parafuso, que impede o deslizamento das chapas (PFIEL E PFIEL, 2008).

Já as ligações soldadas, necessitam de alto controle tecnológico, desta forma o recomendado é que sejam executadas em fábrica (PFIEL E PFIEL, 2008). Existem diversos tipos de soldas e maneiras de realizar a soldagem, no entanto, é necessário garantir que a união resultante não represente um ponto crítico para a estrutura. As ligações soldadas requerem um projeto específico regido pelas normas ABNT NBR 14842/2015 e a AWS D1.1/D1.1M:2010.

Importante citar que tais peças podem ser reutilizadas, se em boas condições, ou completamente recicladas, sendo, desta forma, reintroduzidas ao ciclo produtivo (PFEIL E PFEIL, 2009). Com isso pode-se afirmar que as estruturas metálicas atendem aos requisitos de construção sustentável (LIUBARTAS; SILVA; SANTOS, et al, 2013; RODRIGUES; 2017).

As conexões estruturais devem ser especificadas em um projeto de detalhamento bem elaborado garantindo que a estrutura seja edificada conforme foi projetada e que a execução tenha uma sequência lógica, permitindo as peças já posicionadas auxiliem na estabilização das demais. Sobre detalhamento Araujo, Paes e Veríssimo (2013) declaram em seu trabalho o seguinte:

Embora as práticas de detalhamento possam representar ganhos no processo de projeto, sua ausência não representa somente ausência de benefícios. Comumente, o detalhamento representa também uma medida de prevenção de manifestações patológicas nas construções.

Subsequente a esta etapa está o transporte e montagem da estrutura. Dentre todas as etapas existentes na edificação de uma construção estruturada em aço, a montagem da estrutura é aquela que requer muita precaução, uma vez que é neste estágio que são originados os principais vícios da estrutura. Pravia, Ficanha e Kripka (2011) exprimem a necessidade de elaboração de um projeto específico de montagem. Os autores defendem ainda que conhecer o canteiro de obras onde a

estrutura será estocada e manipulada é indispensável à elaboração dos procedimentos de montagem.

Já tratando do transporte, atualmente o transporte de estruturas metálicas, assim como boa parte de todo o transporte nacional, é rodoviário (ARAÚJO; CRUZ; BARRETO, et al, 2019), por conseguinte as dimensões das peças transportadas ficam restringidas a capacidade de carga e dimensões do veículo disponível. Conseqüentemente, elementos de maiores comprimentos exigem a utilização de veículos maiores, o que encarece o transporte dos materiais.

Outro ponto interessante para ser discorrido é sobre o processo de prevenção de patologias nas estruturas metálicas. Tudo que é produzido pela humanidade tem um prazo de validade pré-estabelecido e, algumas vezes previsto em norma. No âmbito da construção civil a vida útil do produto gerado é da ordem de décadas, como confirma Teixeira (2007).

Sacchi e Souza (2017) alegam que as falhas em estruturas metálicas são, na maioria dos casos, resultantes de falhas de projetos, erros de fabricação, montagem e manutenção das estruturas ou a inexistência de controle de qualidade durante esses processos. Corroborando esta afirmação, Dal' Bó e Sartorti (2012) declaram que “As falhas ou acidentes estruturais têm sua procedência em qualquer ação ligada ao processo de construção”.

Os principais mecanismos de deterioração de estruturas metálicas constatadas na literatura dizem respeito à corrosão e situação de incêndio. Flores e Brito (2005) asseveram que “Os dois fenômenos podem provocar a perda de estabilidade da estrutura e por isso devem ser prevenidos”.

A corrosão é um mecanismo de deterioração de elementos metálicos, o qual tem início na superfície desses elementos e, caso não seja tratado, pode levar ao colapso da estrutura, reduzindo significativamente a vida útil da construção. A diligência em evitar este tipo de deterioração se justifica devido a corrosão dos materiais metálicos ser iniciada pela simples exposição ao meio ambiente (Palma, 2007).

Dessa forma, torna-se necessário tomar precauções desde a fase de projeto das edificações, a fim de prevenir a ocorrência de situações que possibilitem esse mecanismo de deterioração. Tratando de construções estruturadas em aço, no que diz respeito a problemas com corrosão, Silva (2012) faz as seguintes recomendações:

- Impossibilita a formação de regiões que possibilitem o acúmulo de resíduos ou líquidos, prevendo meios de drenagem na estrutura.
- Prever acessos e espaços que facilitem manutenção dos elementos.
- Preencher com mastiques ou solda de vedação as frestas nas ligações.
- Evitar descontinuidades nas ligações soldadas.
- Evitar sobreposição de materiais diferentes.
- Evitar que elementos fiquem semi-enterrados ou semi-submersos.

Já, referindo-se à situação de incêndio, esta se qualifica como um dos principais mecanismos de deterioração devido a característica do aço de ter suas propriedades físicas modificadas; redução das resistências a escoamento, ruptura e módulo de elasticidade; quando numa circunstância de elevação excessiva da temperatura (PFEIL E PFEIL, 2009), podendo resultar no colapso prematuro de partes da estrutura ou da estrutura por completo, e ocasionar perda de vida humana.

Martins (2000) conceitua o dimensionamento de estruturas em situação de incêndio como sendo a verificação da capacidade resistente dos elementos estruturais e suas ligações aos esforços solicitantes, em temperatura elevada, e a determinação da espessura e características do material de proteção contra incêndio adotado.

Essas medidas de prevenção a ruína das estruturas em situação de incêndio têm como objetivo possibilitar a fuga das pessoas que possam estar no interior da edificação na referida situação, bem como a facilitação dos trabalhos de combate a incêndio e a minimização dos prejuízos consequentes deste.

Apesar da construção metálica ser um sistema muito explorado nos países mais desenvolvidos (MANCINI, 2003), o Brasil ainda preserva o conservadorismo nos processos construtivos, encontrando-se fincado na cultura do concreto, uma vez que este tipo de sistema construtivo já é dominado devido a ampla experiência no seu emprego (TEIXEIRA, 2007). Borsato (2009) testifica este fato mencionando que mesmo em projetos onde uma estrutura metálica seria mais economicamente viável, executa-se uma estrutura em concreto, dificultando a disseminação deste tipo de construção.

Tratando especificamente do custo, o autor explicita em seu trabalho que não é correto comparar os custos globais entre uma solução construtiva e outra. Costa (2012) esclarece que as especificações técnicas e os projetos das edificações têm papel decisivo nos custos. Já Flores e Brito (2005) informam que a elevação do custo,

em estruturas metálicas, é influenciada pela baixa produção, pouca experiência dos profissionais e a já mencionada cultura do concreto. Por fim, Borsato (2009), cita uma diferença estimada de 20%, entre o custo de uma estrutura metálica e uma estrutura em concreto armado.

Entretanto, como o mesmo autor explana, a desvantagem mais relevante é o alto desembolso inicial, porém este custo é facilmente diluído quando observadas as vantagens proporcionadas por este sistema construtivo. Pode-se citar, por exemplo que, como uma edificação estruturada em aço pode ser executada em um intervalo de tempo relativamente curto, a ocupação desta edificação também se dará de maneira antecipada e conseqüentemente o retorno do capital investido (NUNES, 2008).

Entretanto, não se deve pensar que uma estrutura metálica será sempre mais economicamente vantajosa que uma estrutura convencional de concreto armado. Deve-se observar as exigências arquitetônicas do projeto e avaliar qual sistema é mais interessante de ser empregado, principalmente no quesito custo (BORSATO, 2009, REBELLO, 2000).

## **2.2 Aços Estruturais**

O aço é o principal material metálico utilizado nas estruturas metálicas dentre as várias vantagens que este material apresenta podemos citar a homogeneidade, que fornece uma boa margem de segurança entre os resultados encontrados na modelagem teórica e o comportamento real das estruturas; e a isotropia, que embasa a alta resistência deste material nos diversos estados de tensão (tração, compressão, flexão, etc) (REBELLO, 2000; SOUZA, RODRIGUES E MASCIA, 2008).

Esta alta resistência do aço permite que sejam usados elementos estruturais com seções muito inferiores as seções requeridas em estruturas de concreto armado, por exemplo (NUNES, 2008). Dessa forma, apesar da alta massa específica, aproximadamente  $7850 \text{ kg/m}^3$ , as construções estruturadas em aço tendem a ser substancialmente mais leves, em comparação com os demais sistemas, necessitando de fundações menores, propiciando equivalente redução de custo na execução destas (NANDIM, 2008).

O aço pode ser definido como uma liga metálica, constituída basicamente de ferro e carbono, em menor proporção, além de outros elementos secundários. Pfeil e Pfeil (2009) mostram que o ferro tem o papel de garantir a resistência da liga, no entanto, sozinho acaba se tornando muito maleável. Com isso, a adição de carbono à mistura confere às ligas de aço a ductilidade necessária e dureza suficiente para obter um comportamento adequado ao papel estrutural.

Segundo Palma (2007) o teor de carbono admitido nos aços utilizados na construção civil varia de 0,18% a 0,25%, o suficiente para proporcionar ao material metálico propriedades específicas, principalmente nos quesitos resistência e ductilidade. Dessa forma torna-se fácil a compreensão de que a percentagem de carbono existente na liga é o que determina o tipo de aço que produzido (OLIVEIRA, 2007).

É interessante mencionar que o uso de sucata de ferro como matéria prima é corrente, sendo a sucata adicionada aos outros materiais em alto-forno e os rejeitos, ou elementos não aproveitáveis, retirados posteriormente em processo de refino. Este fato é citado por Pfeil e Pfeil (2009), que mostram ainda que o resíduo gerado pela fabricação do aço não se trata de um problema ambiental por ser absorvido por outros ramos da construção civil, especialmente a indústria cimentícia.

A cadeia produtiva de estruturas metálicas é constituída de processos totalmente industrializados. O processo de produção do aço, realizado em siderúrgicas, inicia-se com o beneficiamento das matérias primas principais, o minério de ferro e o carbono, geralmente na forma de carvão mineral (PALMA, 2007). A segunda etapa pode ser denominada como produção de ferro gusa, que nada mais é do que a fundição dos materiais que constituirão o aço (PFEIL E PEIL, 2009).

Na terceira etapa acontece a produção do aço propriamente dita, sendo realizada a redução do carbono existente no ferro gusa, e a transformação do aço, já resfriado, em placas ou tarugos (PFEIL E PEIL, 2009).

Já a última etapa é a de conformação mecânica. Nesta, as placas ou tarugos são transformados em chapas ou perfis laminados, por meio de compressão ou laminação a quente. O produto siderúrgico final é adquirido pelos fabricantes de estruturas metálicas e estes realizam o processo de formação dos perfis utilizados na construção civil (PFEIL E PFEIL, 2009).

Os aços utilizados nas estruturas metálicas, denominados aços estruturais, são classificados conforme a sua composição, como já explanado anteriormente. De

forma geral, este aço pode ser enquadrado em dois grupos; os aços-carbonos e os aços de baixa liga (PALMA,2007), com ou sem tratamento térmico (PFIEL E PFIEL, 2009)

Os aços carbonos são aqueles que não contêm elementos de liga, ou seja, o carbono é o elemento principal e determinante das diversas propriedades mecânicas deste tipo de aço. Essa categoria de aço estrutural é subdivida em aços de baixo, médio ou alto carbono (Silva, 2012).

Pfiel e Pfiel expõem em seu trabalho que os aços de baixo carbono são aqueles que possuem menos de 0,3% de carbono na sua composição, é caracterizado pela baixa tensão de ruptura e elevada ductilidade. Já os aços de médio e alto carbono apresentam de 0,3% a 0,595 e de 0,6% a 2% de carbono, respectivamente. Estes são aços temperáveis, no entanto apresentam alta fragilidade e baixa soldabilidade (OLIVEIRA, 2007).

A literatura consultada por este trabalho traz como indicação para a construção metálica os aços de baixo carbono, afirmando que estes são os mais adequados para tal finalidade, sendo o mais comum o ASTM A36. (PALMA,2007. SILVA, 2012. PFIEL E PFIEL, 2009).

Os aços de baixa liga são aqueles de sofrem adições de elementos de liga como cromo, manganês, cobre e níquel que alteram a microestrutura do material (OLIVEIRA, 2007). Estas adições visam a melhoria das propriedades do material, podendo proporcionar tanto elevação da resistência mecânica, como ocorre no aço ASMT A572, quanto elevação da resistência a corrosão, como no aço ASTM A588 (PALMA, 2007). As limitações pontuais à utilização desse tipo de aço dizem respeito a garantia de homogeneidade e isotropia, levando em consideração a variação de componentes e teores que podem ser adotados.

O aço a ser utilizado numa edificação estruturada em aço deve apresentar algumas características específicas, a começar pelas constantes físicas. Pfiel e Pfiel (2009) indicam que algumas características físicas podem ser adotadas a todos os tipos de aço estrutural, isso sendo considerada a temperatura ambiente normal.

As características citadas pelos autores são: o módulo de elasticidade ( $E = 200.000 \text{ MPa}$ ); o coeficiente de Poisson ( $\nu = 0.3$ ); coeficiente de dilatação térmica ( $\alpha = 12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) e a massa específica ( $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ ). Finalizando, Palma (2007) cita ainda o módulo de elasticidade transversal ( $G = 0,385 \times E$ ). Já as características mecânicas a serem observadas nos aços estruturais são:

- Ductilidade

A ductilidade é a característica que permite que um material tenha a capacidade de deformar sem romper. Essa propriedade é definida pelo patamar de escoamento (IMIANOWSKY E WALENDOWSKY, 2015) e pode ser medida por meio do alongamento ou da estricção das barras de aço. Quanto mais dúctil o aço maior é o alongamento antes da ruptura. (Ver Figura 1)

Palma (2007) pontua que nas estruturas metálicas, a ductilidade permite a redistribuição de tensões locais elevadas, essa redistribuição é caracterizada pela deformação de uma peça mesmo com tensão constante e é denominada como fase de escoamento. Pfiel e Pfiel (2009) e Silva (2012) corroboram dizendo que esta característica propicia que mecanismos de ruptura sejam sinalizados por grandes deformações, servindo desta forma de avisos da atuação de cargas elevadas.

- Fragilidade

A fragilidade é uma característica oposta da ductilidade, ou seja, um aço frágil é aquele que apresenta pouca deformação antes do colapso, rompendo bruscamente sem o aviso prévio proporcionado pela ductilidade. Pfiel e Pfiel (2009) apontam que o aço pode se tornar frágil por diversos agentes como a baixa temperatura ou efeitos térmicos causados por soldas elétricas e que, uma vez iniciada uma fratura, esta se propaga pelo material, mesmo não havendo tensões elevadas.

- Tenacidade e Resiliência

A tenacidade diz respeito a quantidade total de energia mecânica absorvida por unidade de volume de aço tracionado até a sua ruptura (IMIANOWSKY E WALENDOWSKY, 2015), ou seja, é a capacidade do material de absorver energia com deformações plásticas e elásticas. Este potencial pode ser igualado a área total abaixo da curva no gráfico tensãoxdeformação (Pfiel e Pfiel, 2009). Já a resiliência é a capacidade de absorver energia mecânica apenas em regime elástico, ou seja, cessada a carga o material volta ao seu estado físico inicial. Este potencial, por sua vez, pode ser igualado a área do diagrama até o limite de proporcionalidade (Pfiel e Pfiel, 2009). As regiões citadas podem ser identificadas no gráfico da Figura 1.



- Dureza

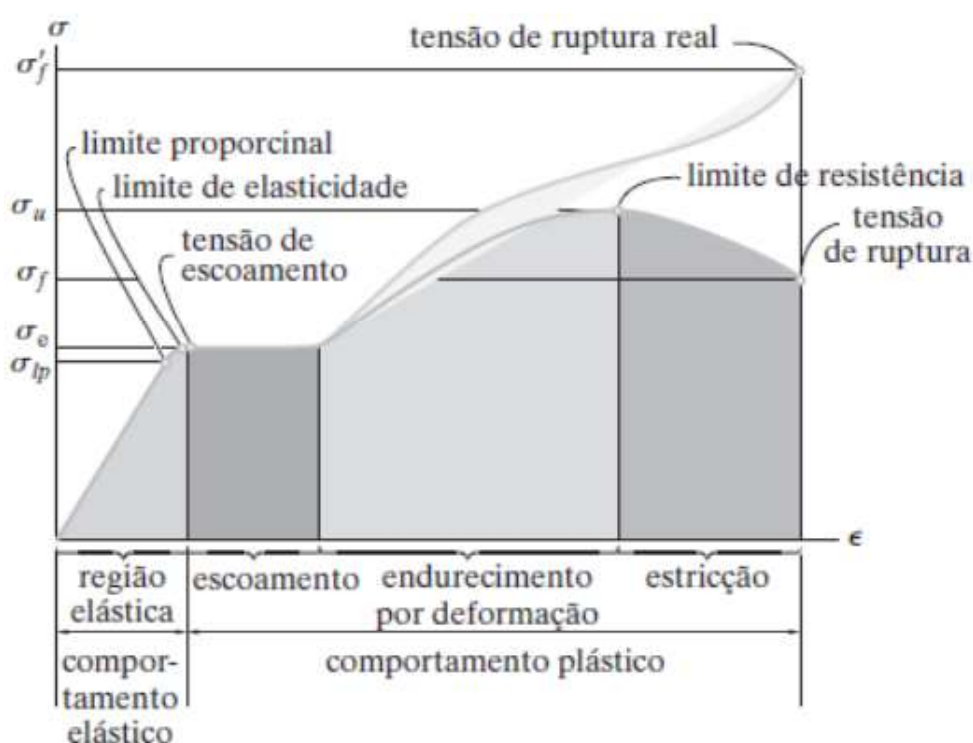
A dureza é a característica que representa a resistência do aço a abrasão, ou seja, a resistência oferecida pelo aço à penetração por outro material. Pfiel e Pfiel (2009) mencionam que o ensaio de dureza é um meio hábil de verificar a resistência do aço.

- Efeito da Temperatura

A importância de verificar a resposta do aço a variação de temperatura, como já esclarecido, reside no fato de a exposição do aço a temperaturas elevadas mitigar suas características tanto químicas quanto físicas, alterando a rigidez e as resistências do material (MARTINS, 2000).

Essas considerações são confirmadas por Pfiel e Pfiel (2009) que agregam dizendo que temperaturas superiores a 100°C eliminam o patamar de escoamento e que temperaturas entre 250 e 300° provocam a fluência do aço.

Figura 1 – Gráfico Tensão Deformação



Fonte:

<http://www.eletrica.ufpr.br/ufpr2/professor/49/TE224/Aula%2010%20Propriedades%20mecanicas.pdf>  
Acesso em 08/05/2020.

- Fadiga

A fadiga está relacionada a ruptura do material, quando este é submetido a esforços repetitivos. A ocorrência de fadiga poder ser identificada pelo aparecimento de fraturas que se propagam com a iteração do carregamento podendo ocasionar o colapso da peça, mesmo que esta não esteja solicitada sua capacidade de resistência máxima (PFIEL E PFIEL, 2009).

- Corrosão

A corrosão, como foi explorado na seção anterior, é um mecanismo de deterioração de elementos metálicos e a necessidade de se avaliar a resistência a este processo se justifica pelo fato de o processo corrosivo promover a perda de seção das peças de aço, podendo levar a estrutura ao colapso.

É de extrema importância lembrar que as características mecânicas dos aços são dadas em função da composição química e da forma de processamento do material, e que estas características interferem diretamente no desempenho em serviço do aço. As características e propriedades dos aços podem ser avaliadas por meio de diferentes ensaios como ensaio de tração, compressão, dureza, impacto, dentre outros. (PFIEL E PFIEL, 2009)

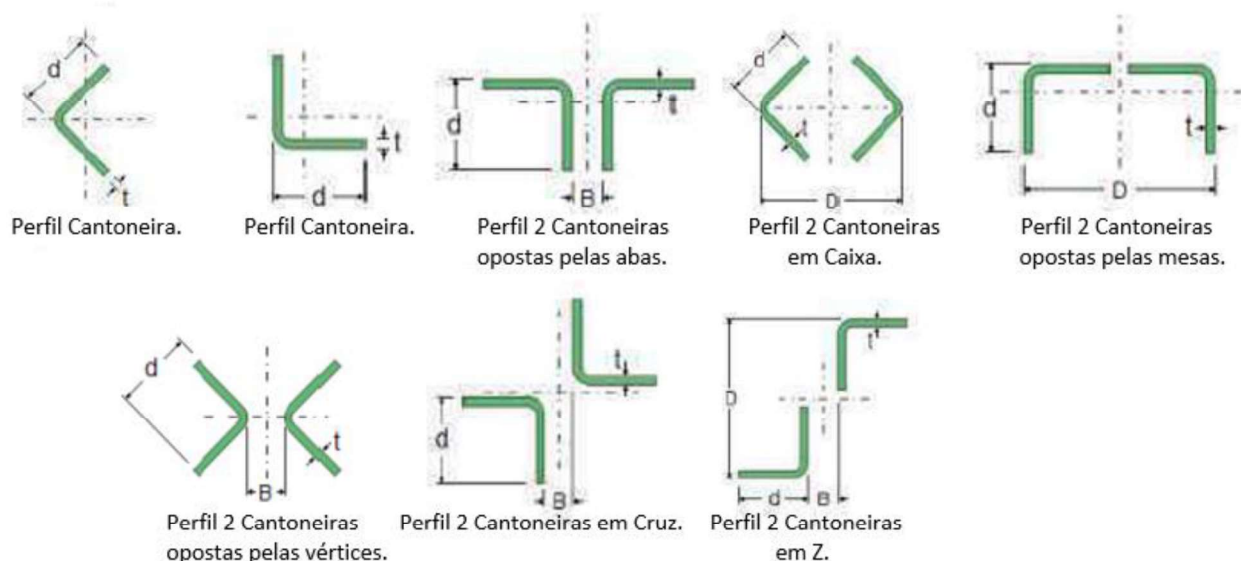
### **2.3 Perfis Metálicos Estruturais**

Como mostrado em item anterior, todo processo de produção de estruturas metálicas é industrializado, desde a fabricação do aço nas siderúrgicas, até a montagem da estrutura no canteiro de obra. A produção dos elementos metálicos conhecidos como perfis estruturais, está incluso neste padrão.

Tratar sobre o perfil de uma peça metálica é fazer menção inicialmente ao formato, ou geometria da peça, e a posição como ela é utilizada. O perfil cantoneira, por exemplo, é uma peça metálica em formato de L e pode ser utilizada numa estrutura metálica com abas simétricas ou não, como uma peça única ou em forma dupla, podendo esta segunda configuração ser realizada com algumas variações.

Na Figura 2 é possível observar as alternativas de variação das configurações do perfil cantoneira formado a frio disponibilizadas no *software* Mcalc 3d, ferramenta de auxilia a execução do presente estudo.

Figura 2 – Variações de configuração do Perfil Cantoneira



Fonte: STABILE ENGENHARIA LTDA, adaptado pela autora (2020).

Segundo Guarnier (2009) os perfis mais utilizados no mercado das construções metálicas são os perfis I, H, L, T, U e Z e suas variações de configuração, como em perfil caixa, por exemplo, obtido a partir da junção de duas peças. A autora mostra que o tipo de configuração do perfil influencia na distribuição do peso da peça e interfere na resistência desta. Além dessas variações de posição dos perfis, uma estrutura metálica pode ser constituída por diferentes tipos de perfis, buscando sempre explorar cada perfil da maneira mais conveniente possível.

Rebello (2000) informa que os perfis de aço podem ser obtidos tanto por meio de laminação do aço, como por dobramento ou soldagem de chapas metálicas. Cada uma dessas formas de obtenção dos perfis metálicos é apresentada a seguir.

### 2.3.1 Perfis Laminados

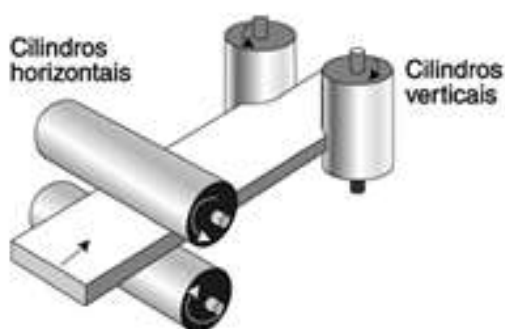
Os perfis Laminados, como a própria denominação sugere, são aqueles obtidos através de laminação. A laminação consiste num processo de modelagem mecânica que é realizada por meio da passagem do metal entre dois cilindros conformadores, de aço ou ferro fundido, com eixos paralelos que giram em torno de si mesmos (PFIEL E PFIEL, 2009).

Este tipo de perfil apresenta como vantagem sair siderúrgica com sua seção transversal definida, necessitando apenas ser cortado e furado nas fábricas de

estruturas de aço. No entanto, essa mesma característica pode tornar-se uma desvantagem, haja vista a geometria dos perfis serem limitadas aquelas originadas no processo produtivo do aço, deixando os projetistas restritos a trabalhar unicamente com essas dimensões (SILVA, 2012).

A designação dos perfis laminados é feita da seguinte maneira: nome da série seguida da altura e massa por unidade de comprimento. Por exemplo: W 310 x 44,5 ou HP 250 x 62 (SILVA, 2012). A Figura 3 ilustra o processo de laminação de um perfil metálico por meio dos cilindros.

Figura 3 – Processo de Laminação.



Fonte: <http://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/laminacao/#accordion1> Acesso em: 08/05/2020.

### 2.3.2 Perfis Soldados

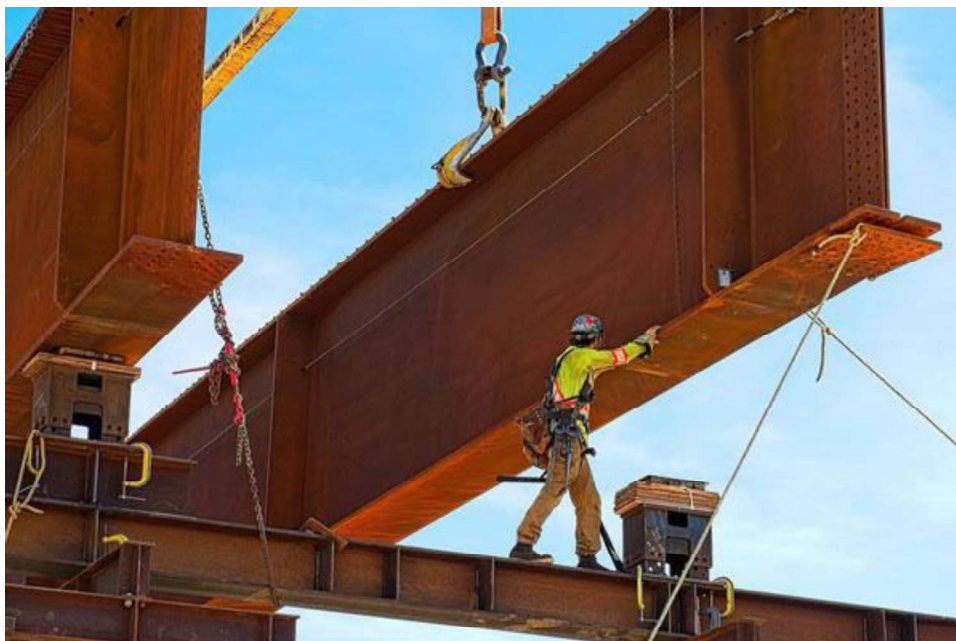
Os perfis soldados são obtidos a partir da associação de chapas, ligadas através do processo de soldagem a arco elétrico. O manual de Ligações em estruturas metálicas do Centro Brasileiro da Construção em Aço- CBCA (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2017) conceitua o processo de soldagem com sendo a união de componentes metálicos realizada meio da fusão de eletrodos metálicos que, devido à alta temperatura empregada, efetua também a fusão parcial dos componentes a serem ligados, de forma que, após o resfriamento, o metal base e o metal do eletrodo passam a constituir um corpo único.

A designação dos perfis formados a frio é feita da seguinte maneira: série, altura e massa aproximada. Por exemplo: CS 150x25 ou VS 350x26 (ABNT NBR 8800, 2005).

A principal particularidade deste perfil, em detrimento dos já citados, é que, uma vez que o perfil soldado é produzido a partir de outros perfis ou chapas não há grandes restrições quanto as geometrias e dimensões possíveis de serem adotadas. No entanto, assim como nos perfis laminados, a vantagem também pode se apresentar como desvantagem. Devido ao processo de produção estes perfis tendem a ter suas dimensões mais robustas e o seu peso superior aos demais perfis e o próprio processo de fabricação é mais caro e requer mais cuidado.

Devido a essas características os perfis soldados possuem o custo mais elevado e usualmente são produzidos sob demanda, tendo seu emprego destinado a obras de grande porte. A Figura 4 mostra um exemplo de perfil I soldado.

Figura 4 – Perfil I soldado



Fonte: <https://compraco.com.br/collections/perfil-soldado-e-viga-soldada>. Acesso em: 29/02/2020

### 2.3.3 Perfis Formados a Frio

Os perfis formados a frio (PFF), também conhecidos como perfis dobrados, são aqueles obtidos por meio do dobramento ou perfilamento a frio de chapas metálicas. Segundo Pfeil e Pfeil (2009) isso é possível devido a ductilidade das chapas e é realizado em prensas, seguindo gabaritos específicos que limitam os raios internos de dobragem com o objetivo de evitar a fissuração do aço no ato da dobra, o que reduziria sua resistência mecânica.

Silva (2012) e Nogueira (2009) cita que os perfis formados a frio são amplamente utilizados em elementos estruturais leves como terças, montantes e diagonais de treliças, elemento estrutural explorado no presente estudo. Os autores citam ainda que a grande vantagem desse tipo de perfil é a diversidade de dimensões nas quais o perfil pode ser modelado, de acordo com as necessidades do projeto.

Nandin (2008) complementa dizendo que, como este tipo de perfil é produzido a partir da conformação de chapas finas, há uma tendência para que sejam concebidos com dimensões cada vez mais esbeltas o que acarretaria uma diminuição no custo da construção metálica. Devido as vantagens apresentadas, em detrimento dos demais tipos de perfis, o perfil considerado neste estudo é o PFF.

A designação dos PFF é feita da seguinte maneira: tipo de perfil, altura, aba, dobra, espessura. Por exemplo: L 40x40x3 ou C 100x60x20x2 (PALMA, 2007). A Figura 5 ilustra o processo de dobramento de chapa metálica fina.

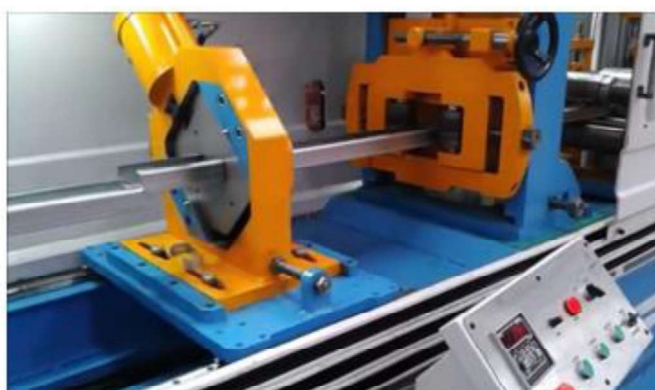
Figura 5 – Processo de Dobramento de Chapas



(a)



(b)



(c)

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=ay6q4KPhzIM> Acesso em: 08/05/2020.

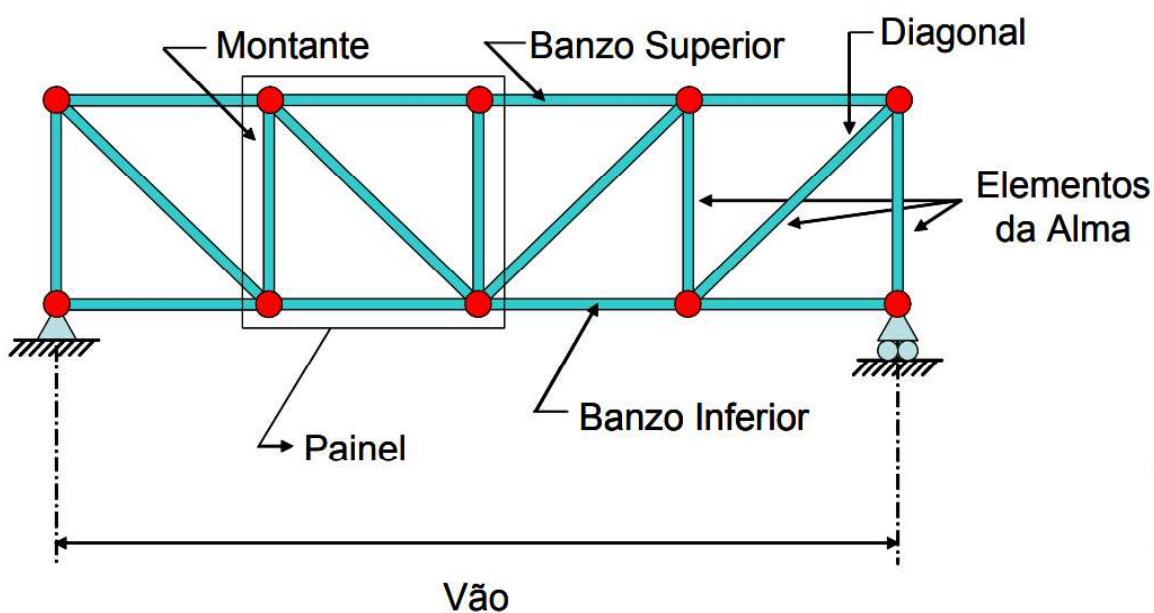
## 2.4 Treliças

Estruturas metálicas treliçadas são bastante utilizadas na construção de edifícios industriais, especialmente em cobertas. Isso se deve ao fato de serem estruturas leves e resistentes, apropriadas para vencer grandes vãos, além de apresentar facilidade de transporte, montagem, desmontagem e reutilização (PFEIL E PFEIL, 2009).

Pfeil e Pfeil (2009) especificam que uma treliça é formada por banzo, ou corda, superior e inferior, elementos que representam as barras horizontais presentes na estrutura; montantes, que são as barras no sentido vertical; e diagonais, que são as barras inclinadas. Os elementos de diagonal e montante têm a função de unir o banzo superior ao banzo superior.

Souza, Rodrigues e Mascia (2008) complementam citando o painel, que o autor conceitua como sendo o trecho compreendido entre dois alinhamentos consecutivos de montantes; e os nós, que são os pontos de encontro e junção das extremidades das barras. A Figura 6 representa uma treliça plana com esses elementos indicados.

Figura 6 – Treliça plana com nomenclatura dos elementos componentes



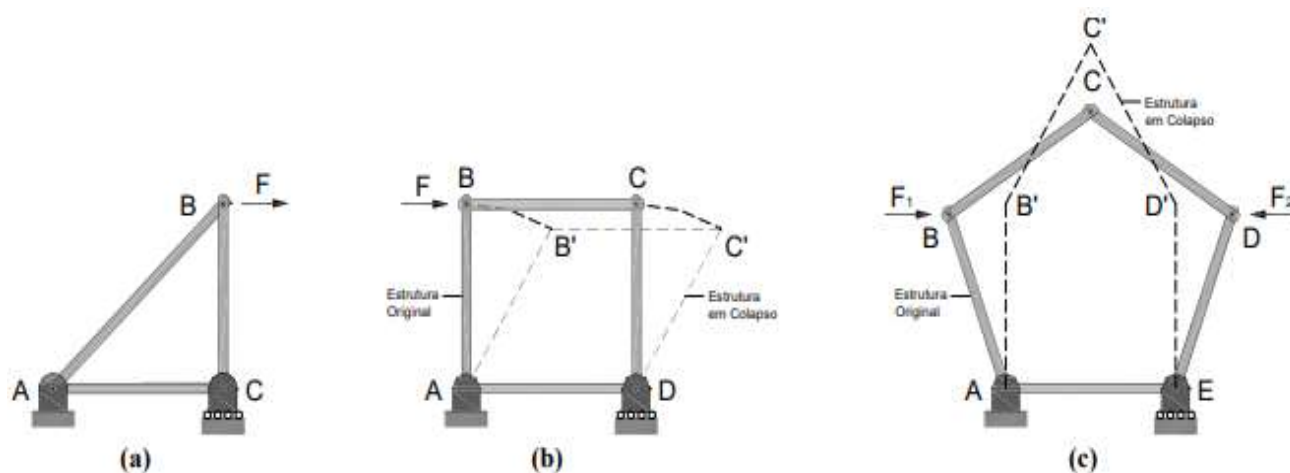
Fonte: Xavier Romão (2003)



Treliças são estruturas formadas basicamente pela ligação de barras retas, através de rótulas (pinos sem atrito), dispostas de modo a formar painéis triangulares (SOUZA; RODRIGUES E MASCIA, 2008). Uma treliça considerada ideal é aquela na qual as cargas são aplicadas unicamente sobre os nós atuando sobre as barras apenas esforços normais de tração e compressão, formando um sistema reticular indeformável (HIBBELER, 2011).

O grande diferencial das treliças diz respeito exatamente à topologia geométrica que assume e à forma de distribuição dos esforços. Primeiro, a base triangular que os painéis treliçados planos assumem possibilita a estabilização do sistema, pois o triângulo é uma figura estável. Esse raciocínio é confirmado por Gomes (2016) que afirma que quando é aplicada uma força numa treliça simples, esta não apresenta deslocamento, ou seja, não sofre alteração da sua forma. No entanto, qualquer sistema de quatro ou mais barras ligadas por nós entraria em colapso sob qualquer combinação de cargas. Na Figura 7 a referida situação é ilustrada.

Figura 7 – Sistemas estruturais: (a) elemento triangular; (b) elemento retangular; (c) elemento poligonal



Fonte: Gomes (2016)

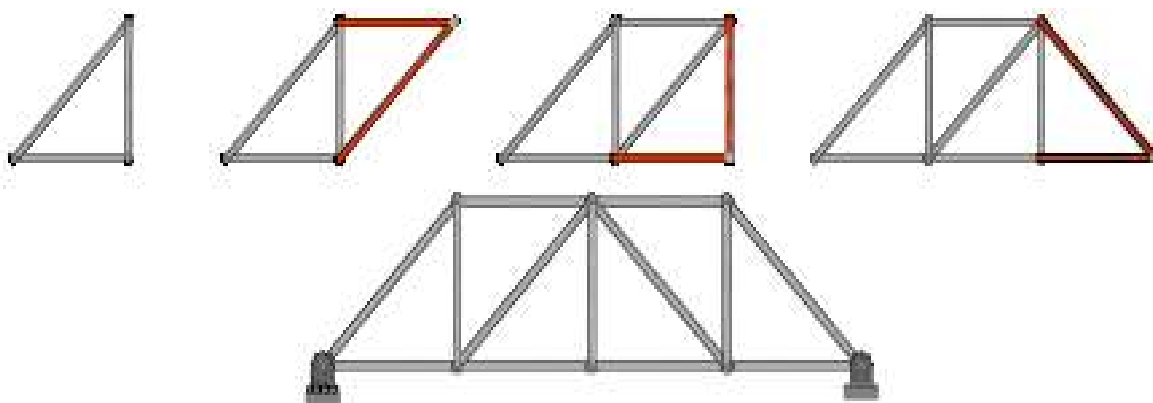
As treliças podem ser classificadas como planas ou espaciais, de acordo com o plano de distribuição dos elementos que a compõe. Segundo Hibbeler (2011), treliças planas ou bidimensionais são aquelas cujos elementos distribuem-se em um único plano. Já as treliças espaciais ou tridimensionais, o autor define como elementos dispostos tridimensionalmente de forma estável, cuja disposição mais simples das barras é em forma um tetraedro.



As treliças espaciais, como é característico das treliças em geral, apresentam uma grande variedade de arranjos geométricos, porém possuem algumas limitações, uma vez que suas peças podem estar sujeitas a deslocamento elevados originando momentos fletores e momentos de torção (SOUZA, 2002). Devido a estas características das treliças espaciais e ao fato de as treliças planas serem mais comumente empregadas em cobertas, no presente trabalho foram admitas as treliças planas.

Como mencionado anteriormente, uma treliça é formada a partir de um triângulo formado por três barras ligadas pelas extremidades. Esse é o conceito de treliça simples. Conforme vão se acrescentando pares de barras e formando novos painéis a treliça obtém a extensão necessária para vencer um vão maior, mantendo sua estabilidade inicial e permanece sendo classificada como treliça simples (HIBBELER, 2011). Essa especificação é feita com base na lei de formação das treliças (GOMES, 2016). A Figura 8 ilustra o processo de formação de uma treliça plana simples.

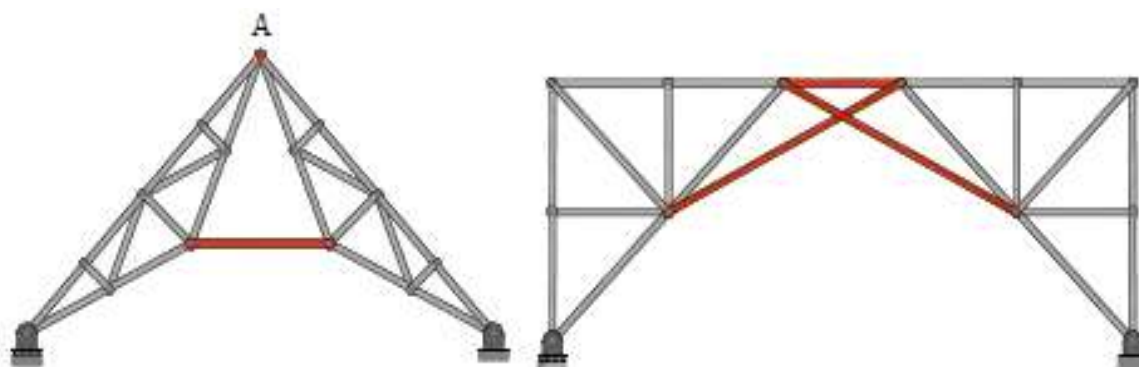
Figura 8 – Formação de uma treliça plana simples de ponte Howe



Fonte: Gomes, 2016

Seguindo na classificação quanto a lei de formação, temos as treliças compostas, aquelas formadas a partir da junção de duas treliças simples através de um nó e uma barra comum as duas treliças ou ligadas por três barras não paralelas e não concorrentes num mesmo ponto (GOMES, 2016), como pode ser observado na Figura 9.

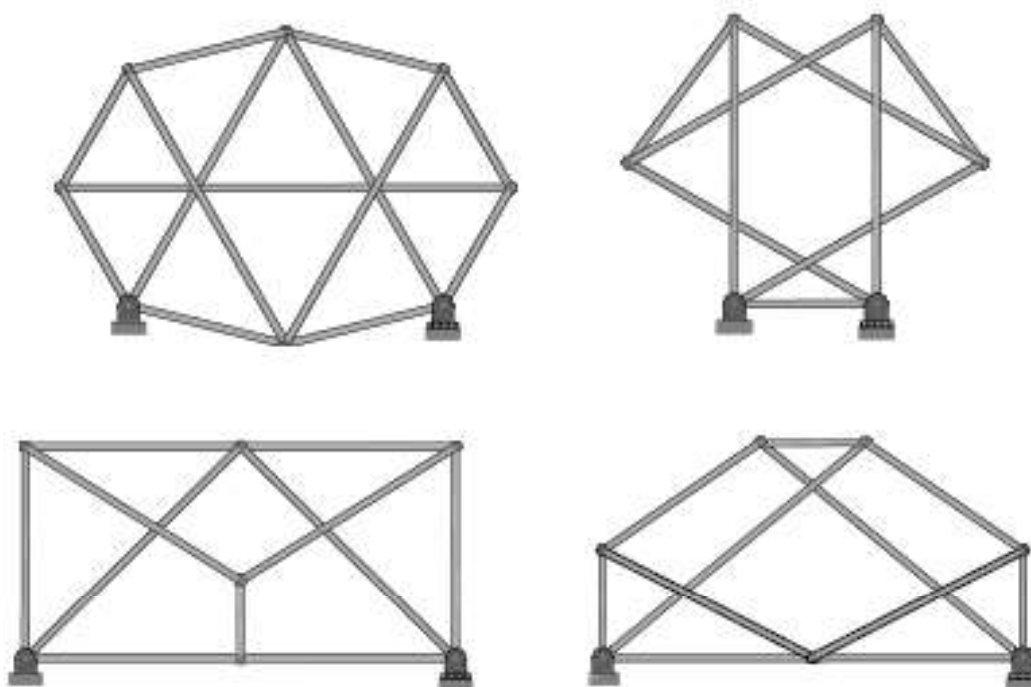
Figura 9 – Exemplos de treliças planas compostas



Fonte: Gomes (2016)

O terceiro, e último, grupo nessa classificação é o grupo das treliças complexas. Este grupo é formado por exclusão, ou seja, as treliças assim denominadas são aquelas que não se enquadram nos dois grupos anteriores. Uma treliça complexa é formada por qualquer combinação de elementos, sejam triangulares, quadriláteros ou mesmo poligonais (GOMES, 2016). A Figura 10 apresenta alguns modelos de treliças complexas.

Figura 10 – Exemplos de treliças planas complexas



Fonte: GOMES (2016)

Como pode ser entendido, a utilização de estruturas metálicas treliçadas permite que possam ser utilizados diversos tipos de arranjos e perfis diferentes, em disposições diferentes para cada configuração. Oliveira (2008) afirma que a disposição dos elementos em uma estrutura influencia significativamente na distribuição dos esforços entre estes e, conseqüentemente, no equilíbrio da estrutura. Desta forma, buscar pelo melhor arranjo, ou topologia estrutural, que forneça a resistência necessária com economia de material e redução de custos, é primordial.

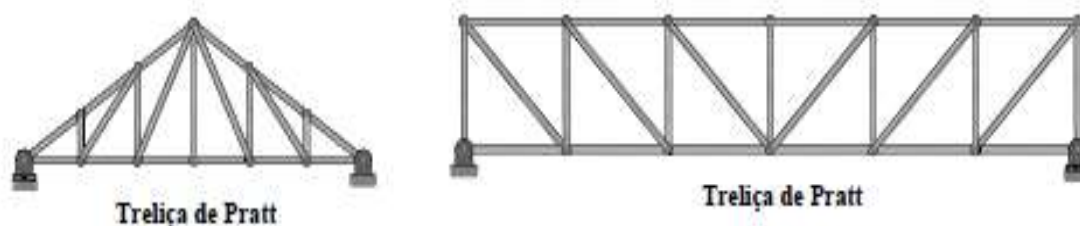
Um exemplo de como a disposição dos elementos influencia a resistência é pelo ângulo de inclinação das diagonais que compõem uma treliça. Rebello (2000) informa que ângulos muito pequenos resultam em maiores solicitações dos elementos e recomenda que sejam adotadas inclinações entre 30° e 60°. Neste mesmo sentido, Mancini (2003) propõe um intervalo ainda menor, entre 45° e 60°.

São encontrados na literatura os mais variados tipos de treliças. Estas são diferenciadas pelo arranjo das peças e correntemente recebem o nome do indivíduo que as aperfeiçoou. A disposição dos elementos pode originar treliças visualmente parecidas e com eficiência similares, porém com comportamento estrutural diferente (SOUZA E RODRIGUES, 2008). E é exatamente as peculiaridades do comportamento estrutural que indicam se um ou outro modelo de treliça é mais ou menos adequada para cada aplicação.

Dentre os modelos de treliças comumente citadas, destacam-se, em número de citações, o tipo Pratt, Howe e Warren (PFIEL E PFIEL, 2009; ALVINO E NETO, 2011; SOUZA, 2017; GOMES, 2016; MANCINI, 2003; TISOT, MEDEIROS E KRIPKA, 2010).

Gomes (2016) explica que o modelo Pratt caracteriza-se por ter todas as diagonais apontando para o centro inferior da treliça. Com isso, todos os elementos inclinados ficam sujeitos a esforços de tração e os montantes, com exceção do central, sujeitos a esforços de compressão. A Figura 11 mostra dois exemplos de treliças Pratt, sendo uma tesoura (com banzo inferior reto) e uma treliça com banzos paralelos.

Figura 11 – Exemplos de treliças Pratt



Fonte: Gomes (2016)

Já o modelo Howe, a autora esclarece que tem configuração exatamente oposta ao modelo Pratt, ou seja, caracteriza-se por ter todas as diagonais apontando para o centro inferior da treliça. Com isso, todos os elementos inclinados ficam sujeitos a esforços de compressão e os montantes, com exceção do central, sujeitos a esforços de tração. A Figura 12 mostra dois exemplos de treliças Howe.

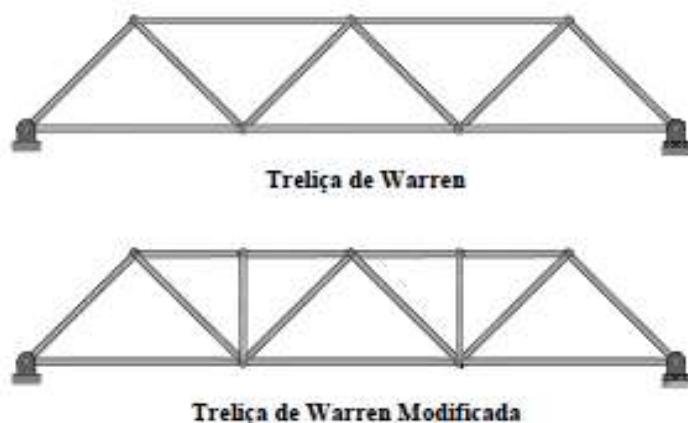
Figura 12 – Exemplos de treliças Howe



Fonte: Gomes (2016)

Por fim, sobre o modelo Warren, a autora caracteriza como sendo uma estrutura simples e contínua que traz como particularidade as diagonais apontando para o centro inferior e superior consecutivamente e a ausência de montantes. Dessa forma as diagonais ficam sujeitas a esforços de tração ou compressão, a depender da sua disposição, apontando para o centro inferior ou superior. A Figura 13 mostra dois exemplos de treliças Warren, sendo uma delas modificada pela inclusão de diagonais retas.

Figura 13 – Exemplos de treliças Warren



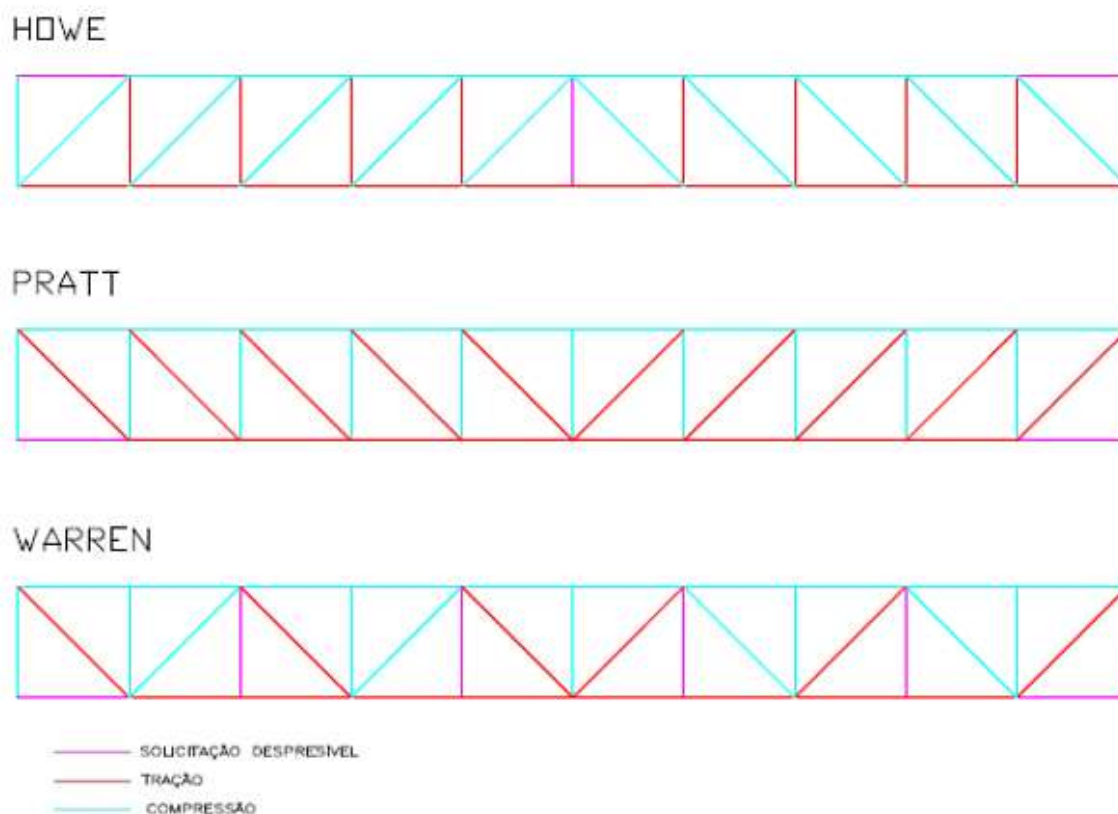
Fonte: Gomes (2016)

No presente trabalho é estudada a treliça tipo Howe, haja vista ser bastante empregada em estruturas de cobertas para uso geral, nas classes planas e simples. Na bibliografia consultada foram apontados dois métodos básicos, práticos e de fácil execução para se obter os esforços internos nos elementos das treliças, dando início à análise destes. São conhecidos como método dos nós e método das seções. Ambos são apresentados no próximo tópico.

#### 4.1 Análise comparativa de treliças tradicionais

A partir da revisão bibliográfica realizada neste estudo têm-se que as tipologias de treliças mais comumente utilizadas em cobertas estruturadas em aço são as dos tipos Howe, Pratt e Warren. É interessante observar a Figura 14 para acompanhar o texto que segue.

Figura 14 – Análise inicial treliças.



Fonte: A Autora (2020).

Inicialmente é importante lembrar que a treliça Warren adotada nesta análise é treliça denominada Warren modificada. Analisando de forma inicial as treliças em estudo pode-se perceber que visualmente estas possuem arranjos geométricos similares. A treliça tipo Pratt é geometricamente inversa à treliça tipo Howe. Dessa forma é esperado que as respostas estruturais variem proporcionalmente às variações geométricas. E assim acontece.

Comparando os três modelos de treliça, considerando o mesmo tipo de material, perfil, vão, inclinação, e carregamento distribuído, pode ser observada uma certa analogia na distribuição dos esforços. Inicialmente observa-se que é comum a as treliças que o banzo superior se encontra sob esforços de compressão e o banzo inferior encontra-se solicitado à tração. É possível verificar também que a treliça tipo Pratt, assim como na geometria, apresenta comportamento oposto ao da treliça tipo Howe.

Comparando o encaminhamento dos esforços nas tipologias em análise, podem ser verificados aspectos semelhantes que caracterizam um padrão: as

diagonais que partem do banzo inferior e apontam para o centro do vão no banzo superior ficam submetidas a esforços de compressão e as diagonais que partem do banzo superior e apontam para o centro do vão no banzo inferior ficam submetidas a esforços de compressão. Com isso, confirmam-se as informações encontradas na literatura.

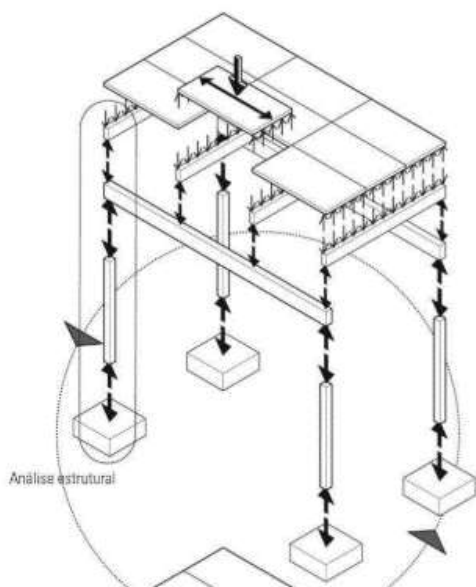
Outro aspecto interessante de mencionar é que os montantes têm comportamento contrário às diagonais, nas treliças tipo Pratt e Howe. No entanto, na treliça tipo Warren modificada, é possível observar que alguns montantes se encontram submetidos a esforços desprezíveis, atuando dessa forma como elementos de força zero, como citado por Hibbeler (2011). Ou seja, estes elementos são utilizados apenas com a finalidade de aumentar a estabilidade da treliça e fornecer um apoio adicional a construção.

## **2.5 Análise de Estruturas Metálicas**

A estrutura de uma edificação é a parte mais resistente da construção, pois, é a parte responsável por absorver os esforços e transmiti-los. Como redigido na ABNT NBR 14762:2010, a análise estrutural objetiva determinar os efeitos das cargas que incidem sobre a estrutura. Desta forma, a análise de uma estrutura tem início buscando-se conhecer os esforços básicos aos quais a estrutura está sendo submetida.

De acordo com Rebello (2000), a estrutura das edificações é o caminho pelo qual as forças atuantes transitam até chegar ao seu destino. A transmissão de esforços acontece usualmente da seguinte forma: as lajes recebem os carregamentos normais de utilização, além do seu peso próprio, e os distribui às vigas existentes. As vigas, por sua vez, transmitem essa carga aos pilares e estes levam o carregamento para as fundações, que os dissipam no solo. A Figura 15 ilustra o caminho dos esforços em uma estrutura usual.

Figura 15 – Caminho dos esforços em uma estrutura



Fonte: Ching (2012).

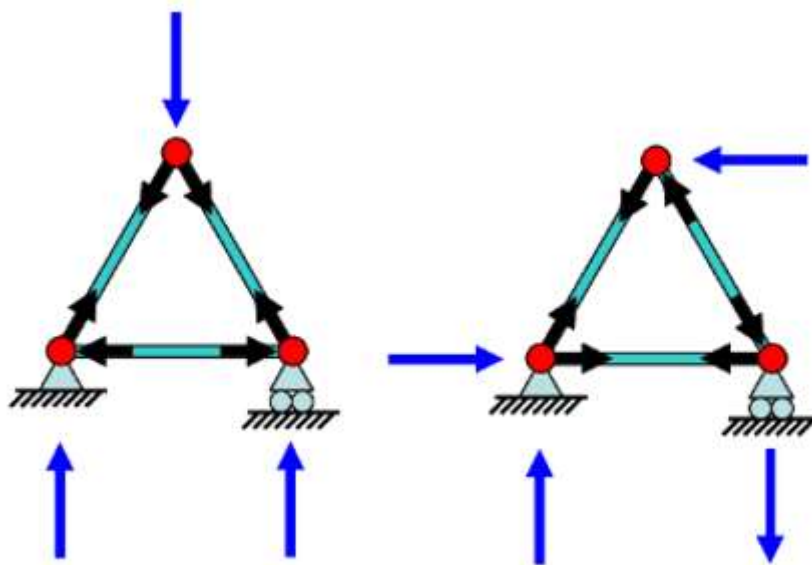
Particularizando estruturas treliçadas para cobertas metálicas, foco do presente estudo, estas são compostas por telhas apoiadas sobre terças que por sua vez se apoiam nas treliças, além de elementos enrijecedores utilizados para auxiliar na estabilização da estrutura, como esticadores, contraventos e mãos francesas.

Além das cargas relacionadas apenas ao peso próprio dos elementos, outras cargas devem ser consideradas para o dimensionamento estrutural, consideradas como cargas variáveis. O principal exemplo de carga variável atuante em cobertas é a carga relativa ao vento.

Nas treliças os carregamentos são aplicados diretamente sobre os nós e distribuídos pelas barras até chegarem aos apoios. Como já discutido neste trabalho, os nós das treliças são considerados articulados. Mesmo que na execução as ligações sejam soldadas, tornando o vínculo rígido, em projeto esses ainda são considerados flexíveis. Vínculos móveis impedem a transmissão de momentos e permite que sejam transmitidos às barras apenas os esforços axiais normais. A Figura 15 ilustra as cargas aplicadas nos nós das treliças de forma a gerar somente esforços internos axiais, isto é, esforços de tração e compressão.



Figura 16 – Cargas aplicadas nos nós de treliças gerando cargas axiais



Fonte: Xavier Romão (2003)

Neste caso, a análise deve ser iniciada conhecendo-se o carregamento atuante em cada nó. Após deve ser verificada as solicitações atuantes em cada barra afim de se identificar quais as barras mais solicitadas do arranjo, o tipo de solicitação, se tração ou compressão, e o valor das cargas solicitantes. Essas verificações iniciais, realizadas nó a nó e barra a barra, podem ser executadas com os métodos analíticos apresentados a seguir.

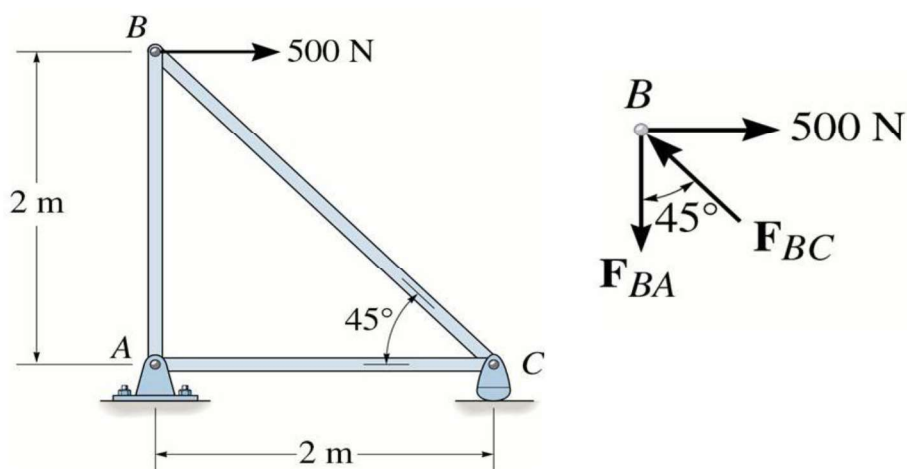
### 2.5.1 Método dos Nós

Neste método é realizada a verificação nó a nó, de forma a analisar o equilíbrio da estrutura treliçada. Partindo da hipótese de que a estrutura como um todo se encontra em equilíbrio, é necessário averiguar se cada nó está equilibrado.

De maneira simplificada este método pode ser resumido a quatro passos: traçado do diagrama de corpo livre do nó, que nada mais é do que um esboço da peça no qual se identificam as forças atuantes; determinação das reações de apoio, identificação do tipo e valor da solicitação em cada ligação e verificação do equilíbrio do nó (HIBBELER, 2011). A Figura 17 ilustra a execução do método.

Neste método são empregadas as equações de equilíbrio das forças para determinar as solicitações atuantes em cada elemento. A desvantagem deste método está na necessidade de analisar vários nós para verificar um nó específico.

Figura 17 – Método dos Nós.



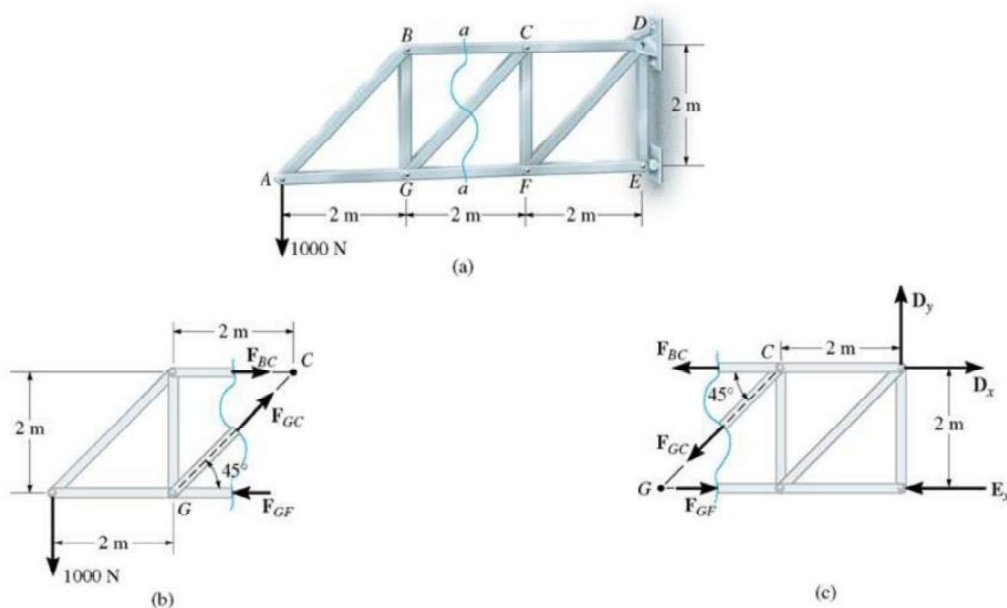
Fonte: Hibbeler (2011)

### 2.5.2 Método das Seções

Neste método é realizada a análise de cada barra individualmente, de forma a verificar o equilíbrio da estrutura treliçada. Também partindo da hipótese de que toda a estrutura está em equilíbrio, considera-se que qualquer seguimento também esteja equilibrado.

A aplicação do método deve ser executada da seguinte maneira. Inicialmente faz-se um corte imaginário da treliça de forma que sejam geradas no máximo três incógnitas, a fim de se encontrar a solução através da aplicação das equações de equilíbrio. É necessário escolher uma das partes para verificação do equilíbrio. É realizada a verificação do equilíbrio das forças apenas das barras que foram interceptadas. Deve-se repetir o procedimento até que todas as barras que constituem a treliça tenham sido analisadas (HIBBELER, 2011). A Figura 18 ilustra a execução do método.

Figura 18 – Método das Seções.



Fonte: Hibbeler (2011)

## 2.6 Ações em Estruturas

As ações são carregamentos externos que suscitam esforços ou deformações na estrutura de uma edificação. A determinação das ações é importante para a determinação dos esforços atuantes, dimensionamento, estabilidade e segurança estrutural da estrutura. Souza, Rodrigues e Mascia (2008) explicam que se uma ação decorre de uma força aplicada, esta é dita ação permanente, já se derivar de uma deformação imposta à estrutura, está ação é denominada indireta.

De maneira simplificada, as ações consideradas permanentes são aquelas que apresentam constância em toda a vida útil da construção, como é o caso do peso próprio da estrutura e partes fixas não estruturais presentes no edifício, por exemplo. No entanto, na fase de projeto, ainda estão por serem determinados muitos aspectos sobre a construção, principalmente sobre os materiais que devem ser empregados, conseqüentemente a estimativa deste tipo de carga não é exata. Guarnier (2009) expõe que a percentagem de erro em aproximação entre a carga considerada e a carga que efetivamente atuará na estrutura é da ordem de 20% e evidencia a importância de experiência do projetista na redução desta margem de erro.

Já as ações variáveis são aquelas intermitentes, ou seja, não atuam de forma contínua sob a estrutura. Estas podem variar em função do tempo e da

localização (GUARNIER, 2009) como é o caso de cargas acidentais decorrentes da ocupação do edifício e das cargas de vento. Existem ainda as ações intituladas excepcionais, isto é, esforços com baixa probabilidade de suceder, toda via, necessitam ser consideradas visando o equilíbrio e segurança da estrutura (SOUZA, RODRIGUES E MASCIA, 2008), como é o caso de situação de incêndio.

Tendo em vista a multifuncionalidade das edificações na atualidade e a consequente dificuldade de conjectura destes carregamentos, nas normas correntes foram definidos valores específicos de cargas e fatores de segurança. Para a verificação da segurança torna-se necessário realizar a combinação das ações atuantes. Essas combinações devem ser consideradas de forma a simular as situações mais desfavoráveis para a estrutura, com o objetivo de aferir a segurança da edificação (PALMA, 2007).

A análise das solicitações em cada combinação permite que seja conhecida a envoltória de esforços da estrutura. A envoltória de esforços é um diagrama de apresenta os esforços máximos e mínimos que atuam sobre a estrutura (HOLTZ, 2005). De posse deste diagrama o projetista pode dimensionar a edificação de forma que ela suporte qualquer estado de cargas que possa incidir sobre ela.

A verificação da segurança em relação aos E.L.U é realizada através das combinações últimas de ações, já a verificação da segurança em relação aos E.L.S é feita em função das combinações de serviço (ABNT NBR8681:2003).

### *2.6.1 Combinações de Ações para os ELU*

Em consonância com a ABNT NBR 8681:2003, um tipo de carregamento é definido pelo conjunto das ações que têm probabilidade não desprezível de atuarem em conjunto sobre uma estrutura. De acordo com a referida norma, os carregamentos que podem atuar durante o período de vida útil de uma construção são:

- Combinação Normal

Um carregamento é denominado normal quando inclui apenas ações decorrentes do uso previsto para a construção. Corresponde à classe de carregamento de longa duração, podendo ter duração igual a vida útil da estrutura. Segundo Souza, Rodrigues e Mascia (2008), no carregamento normal, as eventuais ações de curta ou média duração terão seus valores atuantes reduzidos a fim de que

a resistência do material possa ser considerada como correspondente apenas às ações de longa duração.

- Combinação Especial

Um carregamento é denominado especial quando inclui a atuação de ações variáveis de natureza especial, cujos efeitos superam em intensidade os efeitos produzidos pelas ações consideradas no carregamento normal. Segundo a ABNT NBR 8681:2003 estes são carregamentos momentâneos de curta duração.

- Combinação Excepcional

Um carregamento é denominado excepcional quando inclui ações excepcionais que podem provocar efeitos catastróficos. Para este tipo de combinação a ABNT NBR 8681:2003 orienta que devem ser considerados apenas em projetos para os quais a ocorrência de ações excepcionais não possa ser desprezada.

- Combinação de Construção

Um carregamento é denominado de construção quando há risco de ocorrência de E.L.U ainda durante a fase construção. Essas cargas, como o próprio nome já sugere, decorrem do processo construtivo e variam com o processo de montagem empregado, estocagem dos materiais, manuseio de equipamento, dentre outros. (GUARNIER, 2009)

A ABNT NBR 8681:2003 instrui que na elaboração das combinações sejam levados em consideração alguns critérios específicos, a saber:

- 1- Em todas as combinações devem ser consideradas ações permanentes;
- 2- Em cada combinação de ações variáveis apenas uma deve ser considerada em seu valor absoluto e as demais ações devem ser consideradas com o respectivo coeficiente de ponderação.
- 3- Em combinações especiais e excepcionais, quando existirem, assim como nas ações variáveis, apenas uma das ações deve ser considerada com seu valor absoluto. Em combinações especiais, as demais ações devem ser consideradas com valores correspondentes a uma probabilidade não desprezível de acontecer simultaneamente; já nas combinações

excepcionais, as demais ações devem ser consideradas com valores correspondentes a uma grande probabilidade de acontecer simultaneamente.

Os valores dos coeficientes de ponderação das ações levam em consideração as incertezas das solicitações, são utilizados para majorar os valores das ações que provocam efeitos desfavoráveis a segurança da estrutura e minorar os valores que provocam efeitos favoráveis a edificação

### 2.6.2 Combinações de ações para os ELS

A ABNT NBR 8681 esclarece que nas combinações de serviço devem ser consideradas todas as ações permanentes, as deformações impostas permanentes, e as ações variáveis consideradas nas combinações já expostas anteriormente. Estas combinações, por sua vez são classificadas de acordo com o tempo de atuação na estrutura:

- Combinações Quase Permanentes

São aquelas que podem atuar durante grande parte da vida da estrutura, DA ORDEM de metade deste período (GUARNIER, 2009) e são utilizadas para a aparência da construção e efeitos de longa duração.

- Combinações Frequentes

São aquelas que se repetem muitas vezes durante a vida da estrutura, da ordem de 5% deste período, e são utilizadas para carregamentos não causam danos permanentes a estrutura ou outros componentes da construção, carregamentos comprometa o conforto dos usuários, tais como vibrações excessivas e aberturas de fissuras (BELLEI E BELLEI, 2011).

- Combinações Raras

São aquelas que podem atuar no máximo por algumas horas durante a vida da estrutura e são utilizadas para os carregamentos que podem gerar danos permanentes na estrutura ou outros componentes da construção, carregamentos que comprometam, por sua vez o funcionamento adequado da edificação, formação de fissuras e danos aos fechamentos (BELLEI E BELLEI, 2011).

### 2.6.3 Vento

A ação do vento em uma construção é dinâmica e influenciada por fatores como: o relevo e a rugosidade do terreno, as construções adjacentes, a forma, a esbeltes e eventuais aberturas do edifício. Edificações de concreto armado de baixa ou média altura são pouco influenciadas pela incidência de vento. No entanto quando se trata de uma edificação estruturada em aço a ação do vento têm demasiada influência nos deslocamentos impostos a estrutura, uma vez que estas construções apresentam baixo peso, alturas consideráveis e grades vãos (GUARNIER, 2009).

A análise de uma carga de vento é realizada considerando-se a velocidade característica do vento que pode ocorrer na região onde a estrutura será edificada, além dos fatores já mencionados. Considera-se ainda que esta velocidade, em geral, sofre acréscimo com a variação da altura da construção em relação ao solo. (GUARNIER, 2009). A norma que traz orientações sobre o carregamento de vento é a ABNT NBR 6120:1988 – Forças devidas ao vento em edificações.

## 2.7 Dimensionamento de Estruturas Metálicas

A norma que regulamenta o projeto e execução de estruturas em aço e estende-se também a estruturas mistas de aço e concreto, é a ABNT NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Esta baseia-se no método dos estados limites e define como projeto “o conjunto de cálculos, desenhos, especificações de fabricação e de montagem da estrutura”.

No caso de edificações, dimensionar significa determinar as medidas dos elementos, bem como especificar o material que será empregado na sua produção, de forma que a estrutura tenha capacidade portante equivalente as solicitações as quais pode vir a ser submetida (REBELLO, 2000). Neste sentido, Mancini (2003) sintetiza o processo de dimensionamento como sendo a identificação dos mecanismos que podem ocasionar que a estrutura deixe de cumprir com a finalidade a qual foi projetada; determinação dos níveis de segurança aceitáveis para tais mecanismos e, por fim, a consideração dos estados limites mais significantes.

Como já definido, o presente estudo limitou-se a realizar testes para análise de desempenho estrutural apenas com PFF, mais especificamente os perfis U e

cantoneira, este último em composição dupla, devido a estes tipos de perfis serem amplamente utilizados em elementos estruturais como terças e treliças, elemento estrutural explorado no presente estudo (SILVA, 2012).

Como já citando antecipadamente, o PFF é aquele obtido mediante o dobramento de chapas metálicas. Com isso, a seguir serão apresentadas informações sobre o comportamento estrutural deste tipo de perfil, necessárias para o correto dimensionamento dos elementos estruturais.

O dimensionamento de PFF é norteado pela norma ABNT NBR 14762:2010 que se fundamenta no método da largura efetiva. Este, por sua vez, verifica isoladamente cada elemento que constitui a seção transversal do perfil, assumindo que a distribuição de tensões é uniforme ao longo da largura efetiva deste. Trata-se de um procedimento iterativo que deve ser repetido até que se obtenha a seção efetiva necessária para resistir aos esforços solicitantes em cada elemento (GRIGOLETTI, 2015).

A referida norma prescreve que sejam verificados os ELU e os ELS. Silva (2012) conceitua que os estados-limite de uma estrutura são aqueles nos quais a estrutura apresenta performance insatisfatória para a destinação a que foi concebida. Nesta mesma linha de raciocínio, Pfiel e Pfiel (2009) delinea que os ELS estão associados as cargas de serviço e os ELU estão associados a ocorrência de cargas excessivas. Em síntese, o primeiro diz respeito ao conforto dos usuários, exigências funcionais e de durabilidade e o último a segurança e estabilidade, ou seja, ao esgotamento da capacidade portante da estrutura.

Como especificado anteriormente, em treliças, considera-se que as barras constituintes estão sujeitas a esforços normais de tração e compressão. Assim sendo, conforme Silva (2012), os mecanismos de colapso aos quais as peças tracionadas estão submetidas são: ruptura da seção; escoamento generalizado da barra e cisalhamento de bloco. Já as peças comprimidas, de acordo com Pfiel e Pfiel (2009), estão submetidas aos seguintes mecanismos de ruptura: escoamento da seção e instabilidade local e global os elementos.

Discutindo sobre os mecanismos de ruptura quando do dimensionamento a tração, o manual de dimensionamento de PFF do CBCA (SILVA E SILVA, 2008) discorre que, na análise do escoamento da barra, é verificado se a seção, neste caso a área bruta existente, resiste a carga de tração aplicada sem sofrer deformação que reduza de forma significativa sua resistência. Já na verificação da ruptura da seção é



verificado se a área líquida efetiva existente, ou seja, descontando a área dos furos necessários para a fixação e apoio das peças, suporta a carga solicitante e, caso não suporte, qual a área mínima necessária.

E por fim, na aferição do cisalhamento de bloco, que mais uma vez leva em consideração a interferência dos furos nas peças, é examinado se a seção tem capacidade para resistir aos esforços cisalhantes existentes, sem sofrer rasgamento. Após todas essas verificações, referentes ao ELU, realiza-se a verificação da esbeltez da barra, este exame diz respeito ao ELS e é limitado pela ABNT NBR 14762:2010 que estabelece que “[...] o índice de esbeltez das barras tracionadas, tomado como a maior relação entre o comprimento destravado ( $L$ ) e o raio de giração ( $r$ ) correspondente ( $L/r$ ) não exceda 300.

De igual modo, o referido manual também explana sobre os mecanismos de ruptura nas barras comprimidas. Na averiguação da resistência da peça aos esforços de compressão são estimados os índices de resistência ao escoamento da seção e a instabilidade local e global.

O escoamento da seção é calculado da mesma maneira que no esforço a tração. A instabilidade local diz respeito as imperfeições geométricas nas peças. Pfiel e Pfiel (2009) esclarece que a instabilidade local caracterizada pelo aparecimento de deslocamentos transversais à chapa, na forma de ondulações e que sua ocorrência depende da esbeltez da chapa. Já a instabilidade global é calculada levando em consideração raio de giração da seção, em relação ao eixo de flambagem da peça.

Tomando como referência a ABNT NBR 8800:2008, esta orienta que o índice de esbeltez das barras comprimidas, seja tomado como a maior relação entre o produto do coeficiente de flambagem ( $K$ ) e o comprimento destravado dividido pelo raio de giração ( $KL/r$ ) correspondente a menor inércia da peça em análise, não deve ser superior a 200.

Importante citar que a ocorrência de instabilidade local não inviabiliza a utilização da peça. Este acontecimento apenas sinaliza a redução da rigidez global a deformação (SILVA E SILVA, 2008; MANCINI,2003). Neste cálculo é utilizada a tensão de escoamento do aço, dessa forma, uma peça submetida a carregamento de compressão, têm como limite de sua capacidade resistente quando suas fibras mais comprimidas atingirem o mesmo valor da resistência ao escoamento do aço.

Em resumo, nas peças tracionadas, é necessário avaliar a resistência ao alongamento e a seguridade das ligações executadas, e nas peças comprimidas é

necessário verificar a resistência a flambagem das peças. Atualmente, esse procedimento é realizado prioritariamente por meio de *softwares* e tabelas, de forma a otimizar o processo de dimensionamento.

### 2.7.1 *Softwares de Dimensionamento*

Graças ao desenvolvimento do setor de tecnologia da informação, tornou-se possível simular o comportamento de diversos arranjos estruturais a fim obter o mais adequado para um empreendimento. Com isso, existem disponíveis no mercado diversos softwares direcionados para a análise e dimensionamento de estruturas, para os diversos tipos de materiais estruturais (GUANIER, 2009). Nogueira (2009) cita que existem desde programas baseados no método dos elementos finitos a programas que se limitam a aplicação do método dos deslocamentos.

Dentre os programas disponíveis no mercado podem-se citar, para auxiliar nos processos de análise e dimensionamento de estruturas metálicas, SAP 2000, STRAP, FToll, SPCAD. Já tratando especificamente de dimensionamento de perfis formados a frio, pode-se mencionar o DimPerfil e o MCalcPerfis2008.

O presente estudo traz como ferramenta de auxílio para realização das análises estruturais e dimensionamento o MCalc 3d, por ser bastante utilizado atualmente e por disponibilizar uma interface simples e intuitiva, além da possibilidade de integração com outros programas (STABILE ENGENHARIA LTDA, 2012).

MCalc 3d é um *software* integrado de geração, análise e dimensionamento de estruturas de aço desenvolvido pela empresa Stabile Engenharia Ltda., situada em Porto Alegre-RS. Trata-se de um programa cujo sistema apresenta um conjunto de rotinas para a geração, análise e dimensionamento de estruturas espaciais, tratando a estrutura metálica como estruturas de barras (STABILE ENGENHARIA LTDA, 2012). O sistema é constituído em módulos, com funções diferentes dentro do processo de dimensionamento.

O primeiro módulo diz respeito entrada de dados, ou seja, trata de informações referentes à geometria e propriedades das peças e ações que incidem sobre a mesma. O segundo módulo é remetido à análise da estrutura, esta realizada pelo método da rigidez direta. Segundo o manual STABILE ENGENHARIA LTDA (2012), o programa realiza combinações de ações, ponderadas conforme o estado limite adotado, com o objetivo de determinar as solicitações de cálculo para o

dimensionamento. O processo de análise é realizado automaticamente, sem a interação do usuário e permite a obtenção da envoltória de esforços da estrutura.

Já o terceiro módulo é dedicado ao dimensionamento estrutural. O *software* embasa-se nas recomendações realizadas pelas Normas Brasileiras de dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio (ABNT NBR 14762:2010) e de projeto de estruturas de aço de edifícios (ABNT NBR 8800:2008).

O programa permite que os perfis sejam escolhidos no momento do dimensionamento, facilitando a inclusão, remoção e variação de peças e, posteriormente, apresentando a relação esforço solicitante/resistência do perfil, favorecendo, desta forma, especificações mais acertadas para a estrutura. Por fim, no quarto módulo são expostos os resultados, apresentados por intermédio de relatórios gerados no decorrer da manipulação da estrutura no *software*.

A ferramenta propicia que sejam realizados tantos testes quantos forem necessários a fim de obter o melhor perfil, no melhor arranjo para atender aos esforços incidentes com o menor consumo de aço possível.

### 3 METODOLOGIA

No presente capítulo são apresentadas as etapas bem como os procedimentos metodológicos para a modelagem, análise e dimensionamento de uma viga treliçada.

#### 3.1 Enquadramento metodológico

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise paramétrica do uso de perfis metálicos com diferentes geometrias de seção transversal. Esta pesquisa trata-se de um estudo de caso, uma vez que avalia uma estrutura específica, caso real de cobertura executada na cidade de Fortaleza, e a influência da mudança na escolha do perfil no desempenho estrutural e econômico de estrutura treliçada. Segundo Yin (2005), que classifica o estudo de caso como um estudo profundo de um ou poucos objetos, o caso em estudo é crítico para se testar uma hipótese ou teoria explicitada.

Metodologicamente, a pesquisa constitui-se como pesquisa aplicada e exploratória. Pelo levantamento de dados específicos do tipo de estrutura em estudo, busca-se gerar conhecimentos de aplicação prática para melhorar a eficiência das soluções em dimensionamento, auxiliando também no processo de uso de *softwares* para essa finalidade. Em outras palavras, supondo a influência da escolha do perfil nos resultados de resistência e custo em construções metálicas, buscou-se a análise da eficiência estrutural e econômica da estrutura, de forma a permitir a expansão da análise para outras estruturas similares.

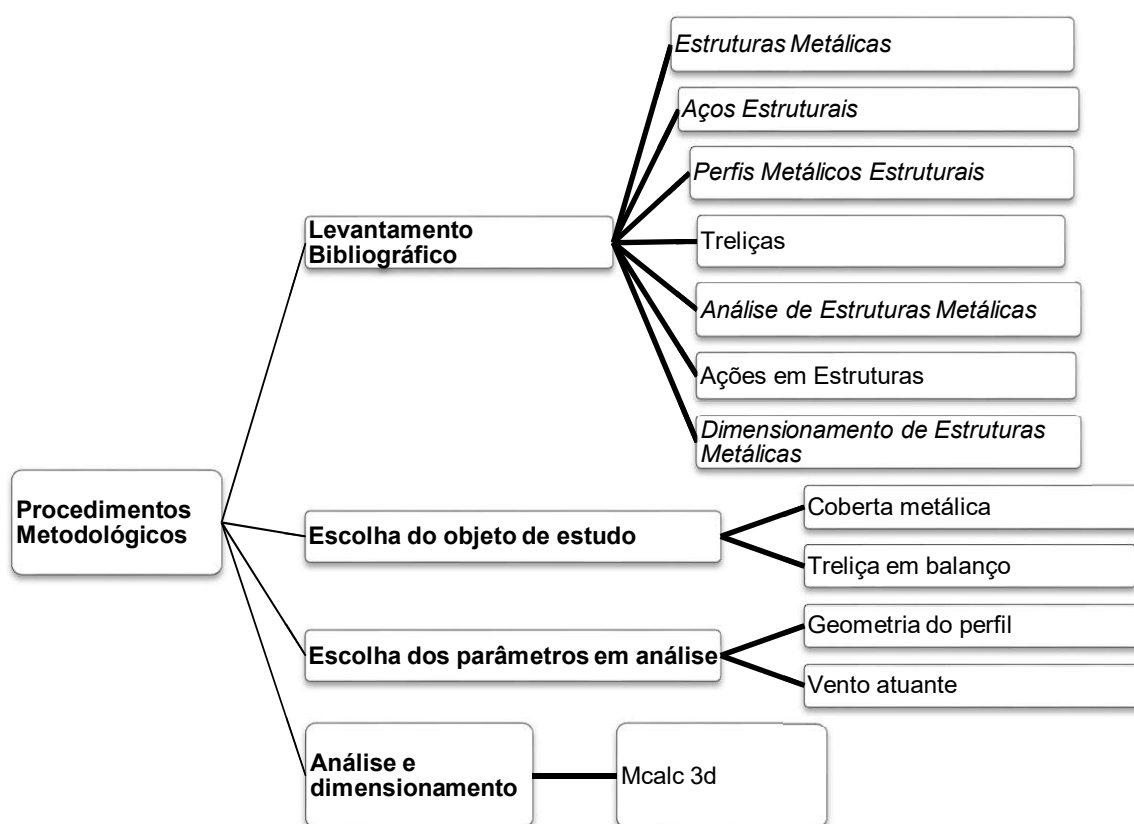
Para realizar uma descrição confiável do caso em estudo, de forma que este tenha uma representatividade para estruturas treliçadas em geral, utilizou-se como estratégia principal da pesquisa um estudo bibliográfico de treliças e métodos de dimensionamento. Com isso, o presente trabalho trata-se de uma pesquisa descritiva, que segundo Gil (2008) é aquela que descreve um fenômeno ou objeto de estudo e estabelece relações entre as suas variáveis.

Conseqüentemente, a abordagem pode ser classificada como quantitativa, que consiste na quantificação dos dados coletados, uma vez que a coleta de dados será realizada a partir do uso do *software* Mcalc 3d para realizar os dimensionamentos, obtendo dados com valores quantificáveis.

## 3.2 Fluxograma de atividades

De acordo com as definições estabelecidas no item anterior, os procedimentos metodológicos previstos para a pesquisa em questão foram elaborados e estão apresentados na Figura 19.

Figura 19 – Fluxograma resumo dos procedimentos metodológicos



Fonte: A autora, 2020

### 3.2.1 Levantamento bibliográfico

Nesta etapa, fundamental em qualquer pesquisa, considerou-se importante a explanação de conceitos que embasasse e facilitasse o entendimento do restante do trabalho. O levantamento bibliográfico dividiu-se esse capítulo em 7 tópicos, seguindo uma sequência de assuntos adequada ao desenvolvimento da pesquisa.

Assim, no primeiro tópico discorreu-se sobre estruturas metálicas de uma forma geral, tratando sobre suas vantagens e desvantagens, o processo de concepção da edificação desde a fase de projeto até os cuidados pós entrega da obra.

Após, no segundo tópico, foram abordados os aços estruturais, o processo de produção e a classificação. No terceiro tópico foram apresentados os perfis estruturais, tratando sobre o processo de produção, características e a forma como estes perfis são designados.

No quarto tópico foi discutido sobre as treliças. Foi apresentado o conceito deste tipo de estrutura, os tipos existentes e suas características individuais, bem como as classificações usuais. No quinto tópico foi discorreu-se sobre o processo de análise de estruturas treliçadas. Foram apresentados os tipos de esforços que podem vir a solicitar os elementos que compõem as treliças.

Já no sexto tópico foram apresentados os tipos de carregamento, bem como os tipos de combinações definidos em norma.

E por fim, no quinto tópico foi conversado sobre o projeto e dimensionamento de estruturas metálicas. Foram identificados os mecanismos que podem levar uma estrutura metálica ao colapso e discutido sobre os níveis de segurança aceitáveis para tais mecanismos. Ainda neste tópico foi apresentado o Mcalc 3d, programa utilizado como ferramenta auxiliar deste estudo.

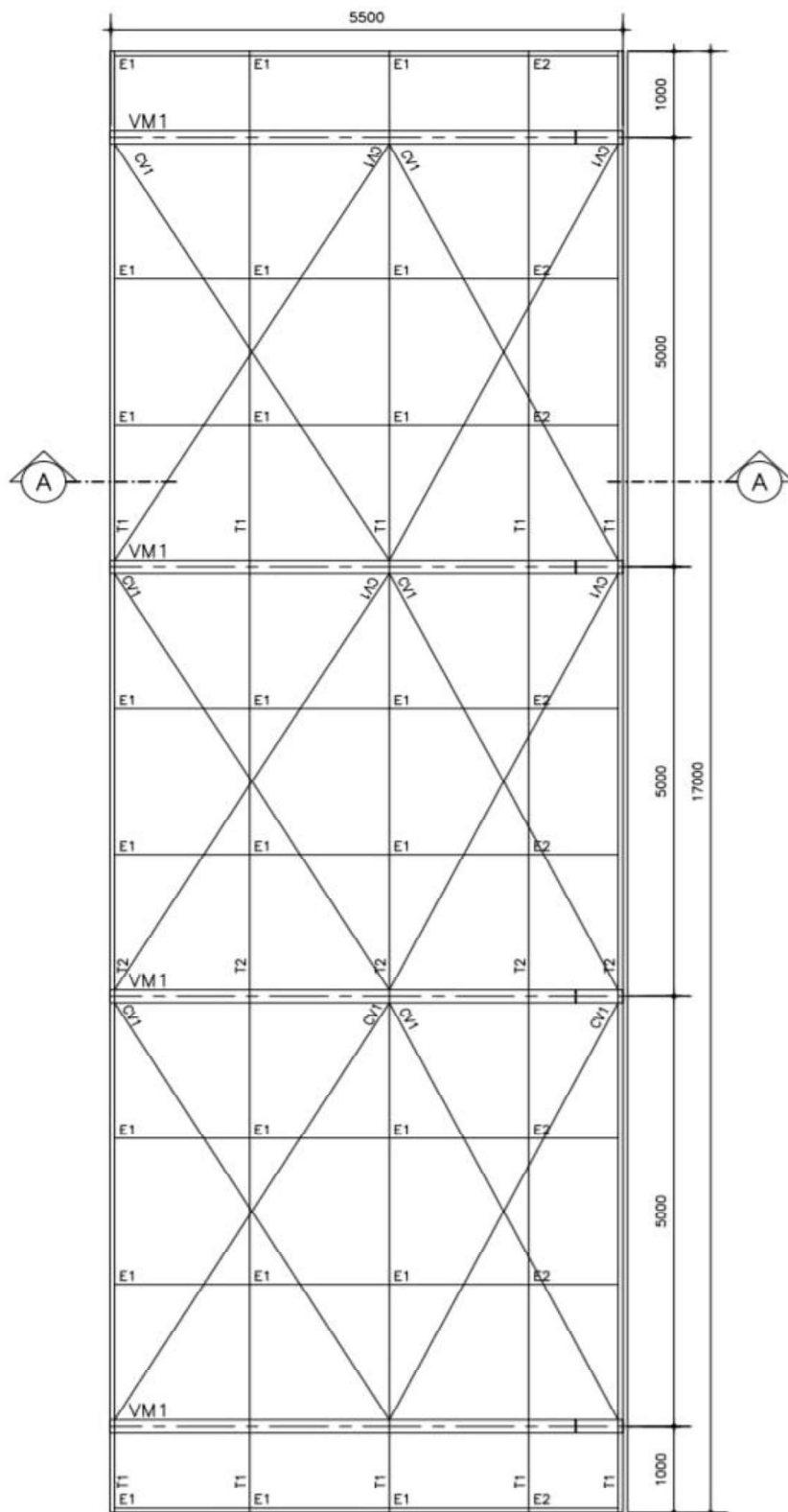
### 3.2.2 *Escolha do objeto de estudo*

A estrutura em estudo tratou-se de uma cobertura utilizada como ponto de embarque e desembarque de passageiros de transporte rodoviário. Esta estrutura era composta por uma cobertura de uma água, ou meia tesoura, e originalmente possuía um balaço de 5 m, a altura era de 5,2 m e a distância entre apoios de 5 m. A estrutura apresentava 4 apoios, totalizando um comprimento de 17 metros. A Figura 20 e Figura 21 mostram o anteprojeto da cobertura a ser analisada.

Os pilares também são estruturados em aço, no entanto as suas medidas serão consideradas padrão para todos os modelos propostos. O perfil utilizado na concepção dos pilares foi o PFF U. Já os apoios destes pilares foram modelados de forma a gerar uma estrutura isostática, ou seja, um de primeiro gênero e outro de segundo gênero. Assim como os pilares, o tipo de aço considerado no

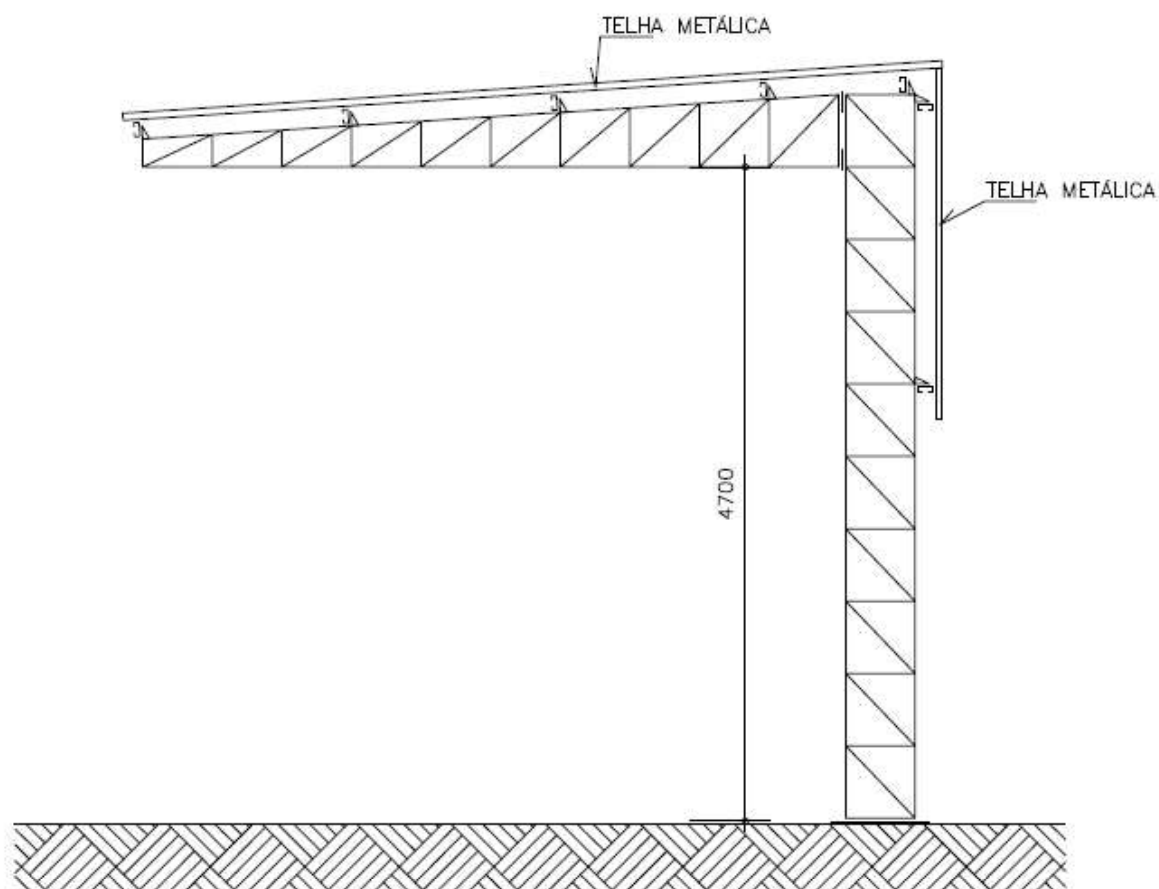
dimensionamento da estrutura será fixo, o ASTM A36. Este aço possui  $f_y = 250$  MPa e  $f_u = 400$  MPa.

Figura 20 – Anteprojeto: Vista Superior



(a) Vista Superior. (VC) Contravento; (E) Esticador; (VM) Viga Metálica – Trelença; (T) Terça  
Fonte: A Autora (2020).

Figura 21 – Anteprojeto: Corte A-A



Fonte: A Autora (2020).

### 3.2.3 Escolha dos Parâmetros em Análise

Como já esclarecido, o presente estudo apresenta uma análise paramétrica, e esta consiste em comparar os resultados do dimensionamento variando-se características essenciais para a realização deste.

Diversas são as características que influenciam o comportamento estrutural de uma cobertura metálica treliçada estruturada em aço, por exemplo, a topologia da treliça, o vão livre, o comprimento dos elementos, a inclinação, a variação do vento atuante, o tipo de perfil e a disposição na qual foi empregado, a forma de vinculação, entre outros.

No entanto, para a realização de um estudo que abrangesse todos estes fatores, seria necessário analisar um número exorbitante de modelos. Com isso, no



presente estudo optou-se por averiguar os parâmetros apresentados a seguir e avaliar a sua influência no comportamento estrutural e no consumo de aço, e a partir disso, mensurar e comparar os custos para cada solução.

Para selecionar os parâmetros que possibilitem avaliar as soluções, foram consideradas as características que possuem maior variabilidade entre os projetos de cobertas metálicas, assim como os fatores que podem assumir uma gama maior de variações. Os parâmetros escolhidos para o presente estudo são:

- Geometria do PFF;
- Velocidade básica do vento atuante.

A começar pelo tipo de treliça, a treliça escolhida para fazer parte das verificações propostas é a tipo Howe. Como já aludido, esta é uma das mais mencionadas na literatura e de uso comum em cobertas metálicas. Ainda sobre as treliças, serão verificadas as treliças para a topologia de banzo inferior reto (tesoura metálica), onde o banzo superior foi fixado a uma inclinação de 5%, respeitando as limitações impostas pelo tipo de telha comumente utilizada nessa solução.

O próximo parâmetro a diversificado neste trabalho é a geometria do perfil utilizado. Considerou-se como fixo que o perfil a testado seria o PFF, por ter como características a leveza, a disponibilidade e o já costumeiro uso neste tipo de estrutura. Os perfis utilizados serão o de seção U e cantoneira, este último na sua forma dupla, além de uma combinação destes dois perfis.

A combinação dos perfis foi estabelecida da seguinte forma, o perfil U será utilizado nos elementos de fechamento das treliças, banzos superior e inferior das treliças e montantes externos. Já o perfil cantoneira será posicionado no interior das treliças, nas diagonais e montantes.

Por fim, foi variada a velocidade do vento. O vento foi analisado a partir da variação entre três valores básicos, 30 m/s, 35 m/s e 40 m/s, escolhidos por cobrirem boa parte da extensão do território brasileiro.

### 3.2.3.1 *Caracterização dos Modelos*

Como já esclarecido, a variação dos parâmetros de projeto gerou nove modelos para análise e dimensionamento. Antes da caracterização propriamente dita

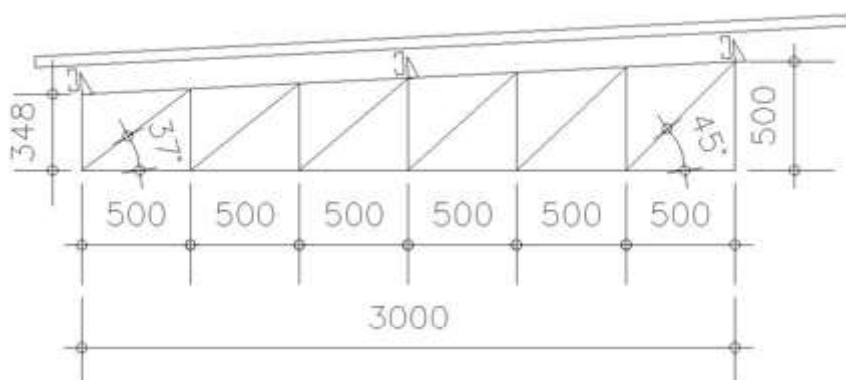
é primordial o esclarecimento quanto a geração dos modelos. Na Tabela 1 é apresentado um esquema que reúne todos os parâmetros a serem variados no processo de construção deste trabalho. Já na Figura 22 é apresentado o modelo em estudo.

Tabela 1- Variação Paramétrica

PARÂMETROS DE ANÁLISE	
PERFIL	VENTO
U	30 m/s
2L	35 m/s
U + 2L	40 m/s

Fonte: A Autora (2020).

Figura 22 – Modelo



Fonte: A Autora (2020).

### 3.3 Análise e Dimensionamento

Após modelada a estrutura para todos os protótipos propostos, foi realizada a análise, como orientado nas normas ABNT NBR 8800:2008 e ABNT NBR 14762:2010, como já discutido anteriormente neste trabalho. Após a análise, será efetuado o dimensionamento dos perfis, tomando como base a verificação dos mecanismos de ruptura já detalhados, sendo eles, a situação de esforço solicitante de compressão: escoamento da seção bruta, ruptura da seção líquida, cisalhamento de

bloco e esbeltez. Já se o esforço solicitante for de tração: escoamento da seção bruta, instabilidade global, instabilidade local e esbeltez.

Finalizadas as etapas de análise e dimensionamento, como pretendido, tem-se como passo posterior a verificação dos resultados. Buscou-se comparar as diversidades entre as respostas internas das estruturas analisadas, e gerar acertadamente gráficos que servirão de ferramenta de auxílio nas fases de pré-dimensionamento e orçamentação inicial.

### 3.3.1 *Carregamentos*

Como já demonstrado no capítulo três, com as variações paramétricas adotadas foram gerados modelos para análise. A presente seção tem como objetivo apresentar os principais aspectos considerados na análise e dimensionamento dos modelos propostos.

As ações estabelecidas aos modelos foram determinadas de acordo com as recomendações da ABNT NBR 8800:2008, como já declarado anteriormente, mais precisamente o Anexo B, da referida norma.

#### 3.3.1.1 *Ações Permanentes*

Como já delineando, em estruturas metálicas, principalmente em cobertas, as ações permanentes correspondem ao peso próprio dos elementos constituintes da estrutura e dos materiais a ela ligados. A determinação da magnitude desta ação é realizada diretamente pelo MCalc 3d, enquanto as demais ações são informadas separadamente. Para todos os modelos considerou-se uma carga permanente de 10 kg/m<sup>2</sup>, pressupondo cargas de instalações elétricas, pequenas peças eventualmente fixadas na cobertura, dentre outros.

#### 3.3.1.2 *Ações Variáveis*

Como já discutido, as ações variáveis são aquelas que ocorrem com variações significativas durante a vida útil da construção. No caso de coberta metálicas, as ações variáveis a serem consideradas são a sobrecarga de cobertura, já definida e a ação do vento.

Como recomendado pela ABNT NBR 8800:2008, para todos os modelos considerou-se uma ação de sobrecarga permanente de  $25\text{kg/m}^2$ , pressupondo cargas extras que possam danificar a cobertura ou ainda atividades de manutenção.

Já para a determinação da magnitude da ação do vento, foram tomadas como base as recomendações da ABNT NBR 6123:1988. Como definido no capítulo anterior, no presente trabalho é considerado que o vento assumirá três velocidades básicas,  $30\text{m/s}$ ,  $35\text{m/s}$  e  $40\text{m/s}$ , de forma a simular grande parte do território brasileiro.

Além da velocidade básica do vento, considerou-se que os galpões de uso geral estão localizados em terrenos planos ou fracamente acidentados, abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas (a cota média do topo dos obstáculos foi considerada inferior ou igual a  $1\text{m}$ ).

### 3.3.1.3 Combinação de Ações

Tomando outra vez como base as recomendações da ABNT NBR 8800:2008, os critérios para combinação das ações foram considerados da seguinte maneira:

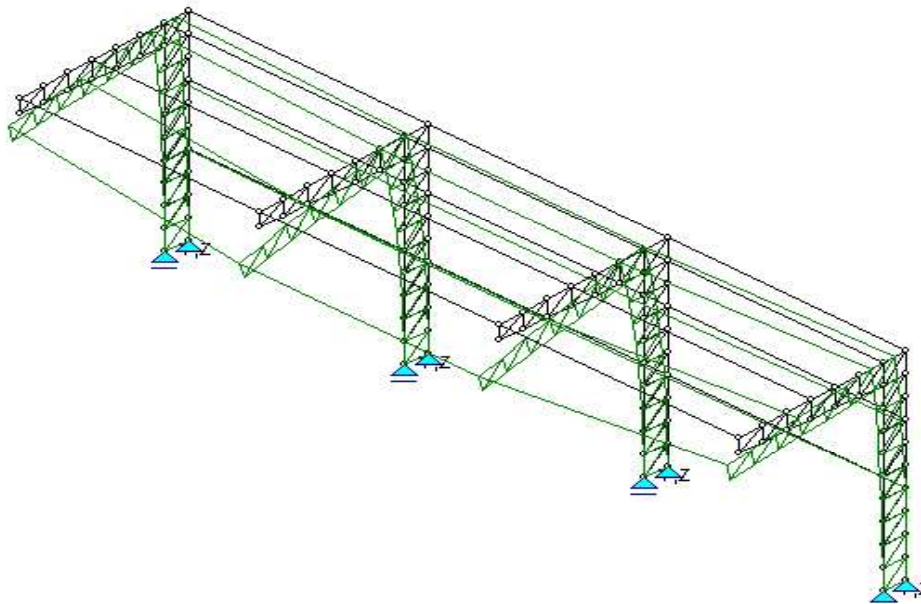
- Combinação 01 -  $1,4 \times \text{PP} + 1,25 \times \text{Sob}$ ;
  - Combinação 02 -  $1,0 \times \text{PP} + 1,0 \times \text{Sob} + 1,4 \times \text{Vento } 0^\circ + 1,0 \times \text{PI } 0^\circ$
  - Combinação 03 -  $1,0 \times \text{PP} + 1,0 \times \text{Sob} + 1,4 \times \text{Vento } 90^\circ + 1,0 \times \text{PI } 0^\circ$
  - Combinação 04 -  $1,0 \times \text{PP} + 1,0 \times \text{Sob} + 1,4 \times \text{Vento } 270^\circ + 1,0 \times \text{PI } 0^\circ$
  - Combinação 05 -  $1,0 \times \text{PP} + 1,0 \times \text{Sob} + 1,4 \times \text{Vento } 180^\circ + 1,0 \times \text{PI } 0^\circ$
- (PP- Peso Próprio; Sob- Sobrecarga; PI- Pressão Interna)

## 3.4 Modelagem

De forma inicial realizou-se uma comparação da deformada de todos os modelos com o objetivo de verificar que todas tinham deformações parecidas, de forma a testificar a consistência das estruturas. Na Figura 23, Figura 25, Figura 26, Figura 27 e Figura 28 é possível observar a deformada da estrutura para todas as combinações de ações. Interessante relembrar que a ação preponderante nas

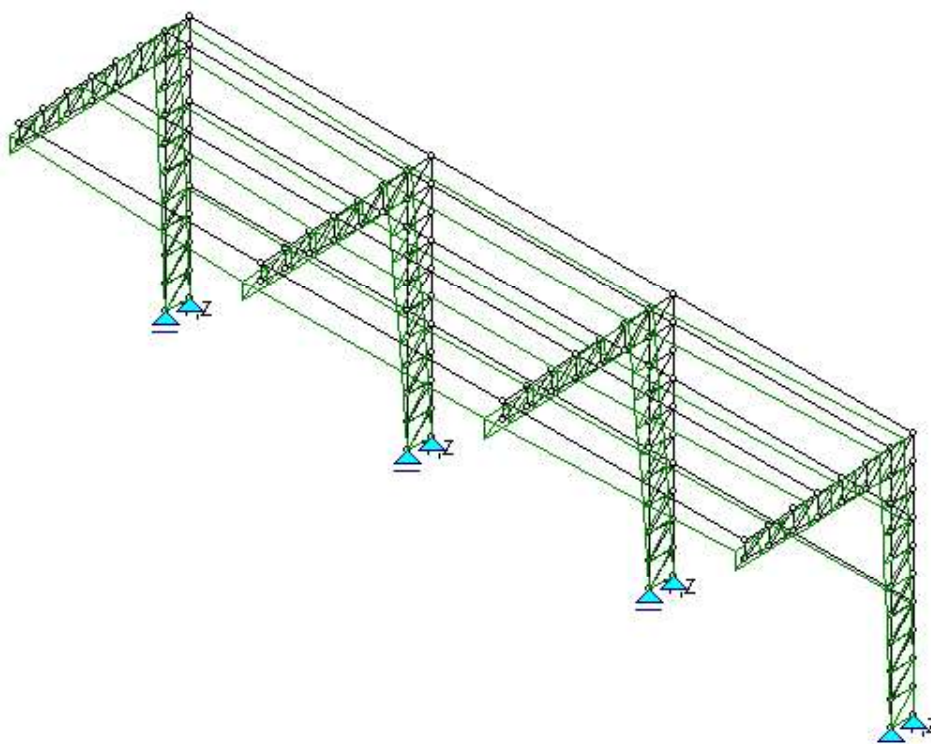
combinações, partindo da combinação 1 são o peso próprio, o carregamento de vento a  $0^\circ$ , o carregamento de vento a  $90^\circ$ , o carregamento de vento a  $270^\circ$ , o carregamento de vento a  $180^\circ$ .

Figura 23 – Deformada Combinação 1



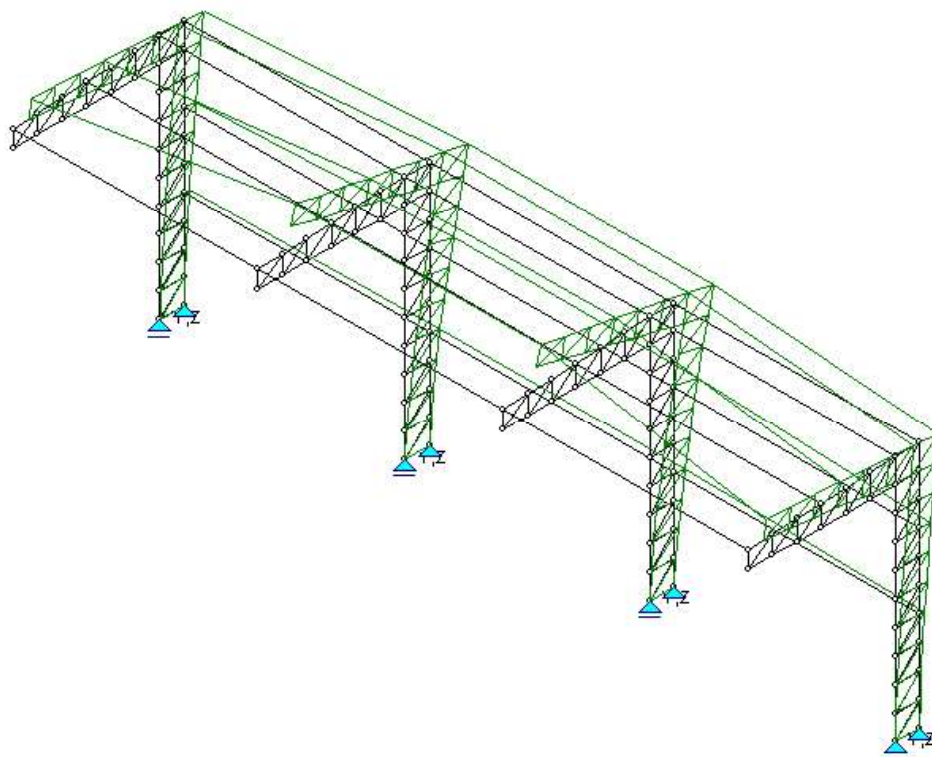
Fonte: A Autora (2020).

Figura 24 – Deformada Combinação 2



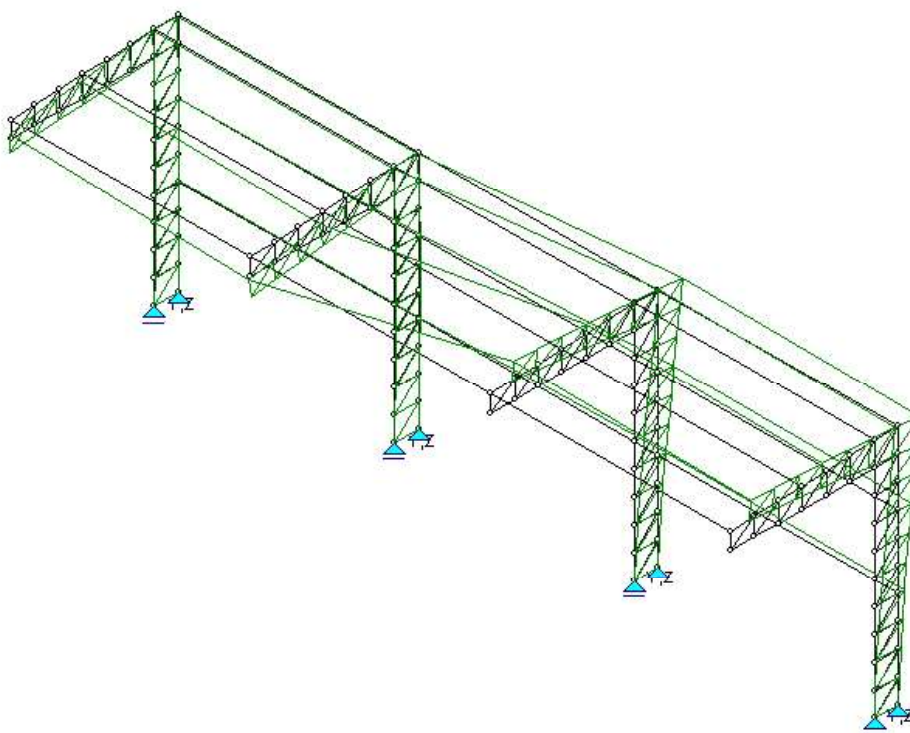
Fonte: A Autora (2020).

Figura 25 – Deformada Combinação 3



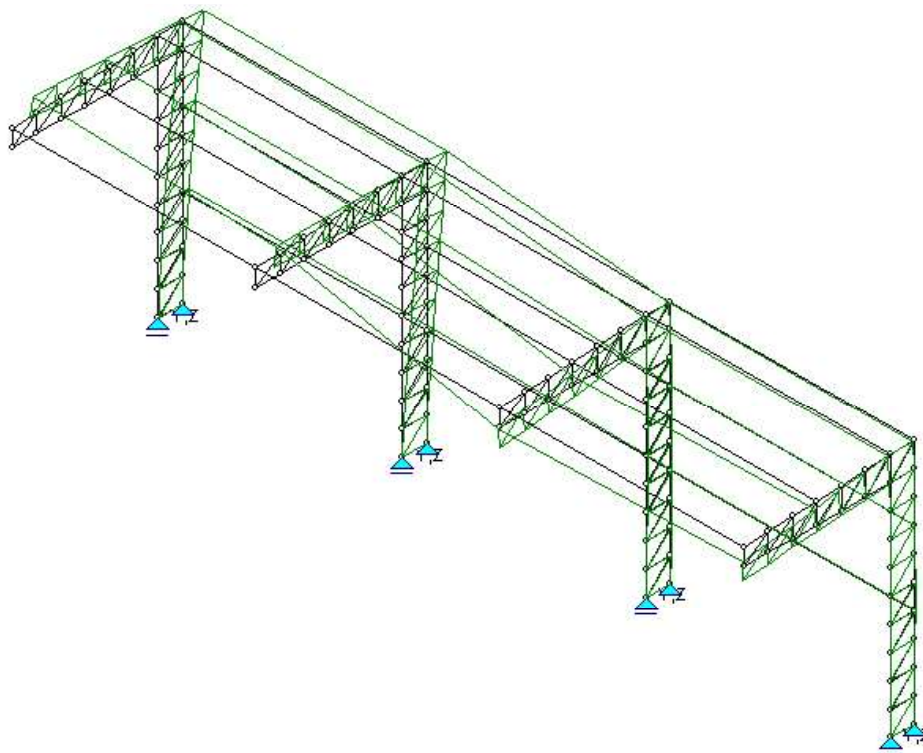
Fonte: A Autora (2020).

Figura 26 – Deformada Combinação 4



Fonte: A Autora (2020).

Figura 27 – Deformada Combinação 5



Fonte: A Autora (2020).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com objetivos propostos e a metodologia explanada anteriormente, neste capítulo são apresentados os resultados da modelagem e dimensionamento estrutural de uma cobertura metálica treliçada executada com perfis formados a frio pela variação de parâmetros de projeto.

### 4.1 Análise Paramétrica

Após a modelagem da estrutura foi realizada a análise da mesma, aplicando os parâmetros já explanado anteriormente. Todas as estruturas foram modeladas e configuradas a partir de uma estrutura base, a fim de que todas as barras e nós assumissem as mesmas posições em todos os desenhos.

Partindo da análise das solicitações, realizou-se a verificação da eficiência da estrutura efetuando comparações entre as respostas estruturais de cada modelo. O *software* utilizado para auxiliar na execução deste trabalho gera um numeroso número de dados e estes são apresentados em tabelas. Partindo dos dados disponibilizados realizou-se uma filtragem para extração daqueles mais significativos para o objetivo proposto.

Dessa forma foram elaboradas tabelas contendo o número das barras que compõem unicamente as vigas treliças da estrutura, a solicitação que incide sobre estas barras e a relação entre a solicitação e a resistência oferecida pelo perfil. A Tabela 2 é um exemplo dessas tabelas e nesta, é possível observar os resultados apresentados para a treliça composta por perfil dupla cantoneira, para um vento de 40 m/s. Foram produzidas tabelas com as mesmas informações para todos os arranjos e carregamentos em estudo, e estas podem ser observadas nos Apêndices A, B e C.

Nesta tabela em particular aconteceu de algumas barras terem suas solicitações alteradas, de acordo com o perfil empregado. As barras 133 a 136 e 204 a 207, elementos de diagonal, e as barras 129 e 130, elemento de banzo superior, encontravam-se comprimidas quando utilizada a combinação apenas de perfil U, no entanto, quando utilizados perfis dupla cantoneira, esses elementos passaram a sofrer esforços de tração.



Tabela 2- Perfil dupla cantoneira – Vento 40 m/s

BANZO INFERIOR			BANZO SUPERIOR			MONTANTE			DIAGONAIS		
Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/Resistência
42	1474,94	0,45	54	-2,7	0	48	55,24	0,01	60	-99,21	0,01
43	1099,28	0,34	55	-79,61	0	49	368,85	0,07	61	-200,62	0,03
44	756,67	0,23	56	-236,76	0,01	50	318,04	0,06	62	-289,32	0,04
45	457,37	0,14	57	-457,95	0,02	51	262,1	0,05	63	-402,28	0,05
46	236,49	0,07	58	-757,58	0,04	52	180,26	0,03	64	-472,08	0,06
47	79,52	0,02	59	1100,71	0,06	53	118,44	0,02	65	-531,28	0,07
118	2709,01	0,83	125	-5,43	0	110	679,98	0,12	131	-186,58	0,03
119	2022,21	0,62	126	-149,73	0,01	111	588,71	0,11	132	-369,72	0,05
120	1394,09	0,43	127	-439,36	0,02	112	487,99	0,09	133	360,46	0,07
121	843,25	0,26	128	-844,39	0,04	113	335,55	0,06	134	-740,36	0,1
122	438,8	0,13	129	748,3	0,07	114	223,76	0,04	135	566,28	0,12
123	149,54	0,05	130	1149,31	0,11	124	107,5	0,02	136	674,83	0,14
189	2709,01	0,83	196	-5,43	0	181	679,98	0,12	202	-186,58	0,03
190	2022,21	0,62	197	-149,73	0,01	182	588,71	0,11	203	-369,72	0,05
191	1394,09	0,43	198	-439,36	0,02	183	487,99	0,09	204	360,46	0,07
192	843,25	0,26	199	-844,39	0,04	184	335,55	0,06	205	-740,36	0,1
193	438,8	0,13	200	748,3	0,07	185	223,76	0,04	206	566,28	0,12
194	149,54	0,05	201	1149,31	0,11	195	107,5	0,02	207	674,83	0,14
260	1474,94	0,45	267	-2,7	0	252	368,85	0,07	273	-99,21	0,01
261	1099,28	0,34	268	-79,61	0	253	318,04	0,06	274	-200,62	0,03
262	756,67	0,23	269	-236,76	0,01	254	262,1	0,05	275	-289,32	0,04
263	457,37	0,14	270	-457,95	0,02	255	180,26	0,03	276	-402,28	0,05
264	236,49	0,07	271	-757,57	0,04	256	118,44	0,02	277	-472,08	0,06
265	79,52	0,02	272	1100,71	0,06	266	55,24	0,01	278	-531,28	0,07

Fonte: A Autora (2020).

Com base na análise destas tabelas gerais, como a exemplificada pela tabela 2, foram desenvolvidas as Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5 com os índices Solicitação/Resistência para todos os modelos. A tabela foi montada fazendo uso apenas dos índices máximos, mínimos e a médios, para os elementos que compõem as treliças (banzos superior e inferior, montantes e diagonais). Dessa forma, observando esta tabela é possível identificar quais arranjos de perfis apresentaram os melhores índices para cada combinação de vento.

Tabela 3- Índices Solicitação/Resistência carregamento de vento de 30 m/s.

VENTO 30 m/s								
	BANZO INFERIOR		BANZO SUPERIOR		MONTANTE		DIAGONAIS	
PERFIL U	Máx.	0,16	Máx.	0,09	Máx.	0,01	Máximo	0,08
	Mín.	0	Mín.	0	Mín.	0,07	Mínimo	0,01
	Média	0,058	Média	0,028	Média	0,032	Média	0,042
PERFIL 2L	Máx.	0,83	Máx.	0,1	Máx.	0,12	Máximo	0,13
	Mín.	0,02	Mín.	0	Mín.	0,01	Mínimo	0,01
	Média	0,298	Média	0,031	Média	0,057	Média	0,063
PERFIL U + 2L	Máx.	0,15	Máx.	0,08	Máx.	0,13	Máximo	0,13
	Mín.	0	Mín.	0	Mín.	0,01	Mínimo	0,01
	Média	0,053	Média	0,026	Média	0,058	Média	0,065

Fonte: A Autora (2020).

Tabela 4- Índices Solicitação/Resistência carregamento de vento de 35 m/s.

VENTO 35 m/s								
	BANZO INFERIOR		BANZO SUPERIOR		MONTANTE		DIAGONAIS	
PERFIL U	Máx.	0,16	Máx.	0,09	Máx.	0,07	Máximo	0,08
	Mín.	0	Mín.	0	Mín.	0,01	Mínimo	0,01
	Média	0,058	Média	0,028	Média	0,032	Média	0,042
PERFIL 2L	Máx.	0,89	Máx.	0,11	Máx.	0,13	Máximo	0,14
	Mín.	0,03	Mín.	0	Mín.	0,01	Mínimo	0,02
	Média	0,321	Média	0,035	Média	0,058	Média	0,069
PERFIL U + 2L	Máx.	0,16	Máx.	0,09	Máx.	0,13	Máximo	0,14
	Mín.	0,01	Mín.	0	Mín.	0,01	Mínimo	0,02
	Média	0,061	Média	0,028	Média	0,060	Média	0,071

Fonte: A Autora (2020).

Tabela 5- Índices Solicitação/Resistência carregamento de vento de 40 m/s.

VENTO 40 m/s								
	BANZO INFERIOR		BANZO SUPERIOR		MONTANTE		DIAGONAIS	
PERFIL U	Máx.	0,15	Máx.	0,08	Máx.	0,07	Máx.	0,08
	Mín.	0	Mín.	0	Mín.	0,01	Mín.	0,01
	Média	0,05	Média	0,027	Média	0,032	Média	0,038
PERFIL 2L	Máx.	0,83	Máx.	0,11	Máx.	0,12	Máx.	0,14
	Mín.	0,2	Mín.	0	Mín.	0	Mín.	0
	Média	0,298	Média	0,032	Média	0,057	Média	0,064
PERFIL U + 2L	Máx.	0,15	Máx.	0,08	Máx.	0,13	Máx.	0,14
	Mín.	0	Mín.	0	Mín.	0,01	Mín.	0,01
	Média	0,053	Média	0,026	Média	0,058	Média	0,066

Fonte: A Autora (2020).

Nesta primeira análise as barras que compõem as treliças de forma individual. Para o carregamento de vento com velocidade característica de 30 m/s, quando observados os valores médios, a combinação de perfis que apresentou os maiores índices foi a composta por perfis dupla cantoneira, mais precisamente nos

elementos de banzo superior. Para os demais elementos os índices se mantiveram numa mesma faixa de percentagem.

Para o carregamento de vento com velocidade característica de 35 m/s, mais uma vez observando os valores médios, mais uma vez, a combinação de perfis que apresentou os maiores índices foi a composta por perfis dupla cantoneira. Desta feita, além de apresentar índices mais elevados nos elementos de banzo superior, isto se repetiu em todos os demais elementos.

Entre tanto, para os elementos de montante e diagonais, os índices foram similares aos índices do arranjo que associa os perfis U e dupla cantoneira. Toda via, isso se justifica pelo fato do mesmo tipo de perfil estar disposto nas mesmas posições, ou seja, em ambos os arranjos os elementos de diagonais e montantes são concebidos por perfis cantoneiras.

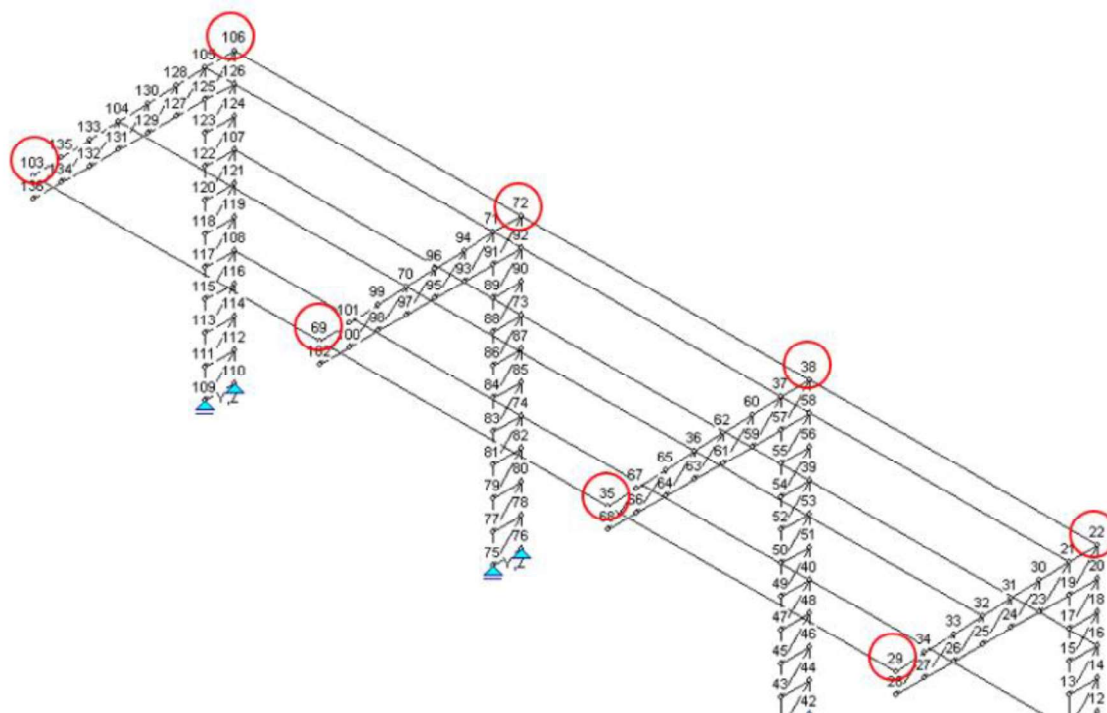
Já para o carregamento de vento com velocidade característica de 40 m/s, outra vez observando os valores médios, a relação solicitação/resistência teve índices distribuídos de maneira análoga ao carregamento de vento com velocidade característica de 35 m/s. A combinação de perfis que apresentou os maiores índices foi a composta por perfis dupla cantoneira, nos elementos de banzo superior, e nos demais elementos os índices se mantiveram numa mesma faixa de percentagem.

Importante evidenciar que, para todos os carregamentos de vento, o arranjo composto por perfil dupla cantoneira apresentou, para os elementos de banzo superior, índices acima de 0,8%. Ou seja, esse arranjo exigiu mais dos perfis que o compunham, requerendo maiores resistências.

Considerou-se que este perfil, mesmo na forma dupla, apresenta menor resistência quando utilizado na posição horizontal, o que afetaria a distribuição dos esforços. Em confirmação, as demais combinações a apresentaram índices parecidos. Esses resultados foram então associados a utilização de perfil U nos banzos superior e inferior.

Seguindo para a análise das deformações, estas foram analisadas medindo-se as alterações apresentadas nos nós da estrutura, de acordo com cada combinação de cargas. Foram escolhidos oito nós específicos na estrutura nos quais foram medidas as deformações, os nós 22, 29, 35, 38, 69, 72, 103 e 107. Na Figura 28 é possível identificar os nós na estrutura. As tabelas com as deformações apresentadas pelos nós para todas as combinações de perfis e carregamento de vento em estudo podem ser observadas nos Apêndices D, E e F.

Figura 28 – Nós da Treliça



Fonte: A Autora (2020).

A partir das deformações medidas nos nós, que podem ser verificadas nas tabelas relacionadas nos apêndices, realizando uma comparação de todos os valores em cada nó, para cada combinação de carregamento, pode-se observar que para todos os carregamentos de vento, a combinação formada apenas pelo perfil U apresentaram as maiores deformações. Um exemplo são as células de deslocamentos do nó 22 para a primeira combinação. Caso contrário acontece com a combinação de perfil dupla cantoneira, que também pode ser exemplificada pelas células de deslocamentos do nó 22 para a primeira combinação ficando, dessa forma, a combinação formada pelos dois perfis com valores medianos. Interessante mencionar que esta análise de deformação considera a estrutura como um todo.

## 4.2 Consumo de Aço

A partir do dimensionamento da estrutura foi possível extrair dados referentes ao consumo do aço por metro quadrado da construção. Os perfis utilizados, bem como a quantidade de aço em cada arranjo pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6- Resumo consumo de aço.

ARRANJO			COMPRIMENTO TOTAL (m)	AÇO (kg)	AÇO TOTAL (kg)	CONSUMO DE AÇO (kg/m <sup>2</sup> )
PERFIL U	Banzos Superior e Inferior	U 150 50 4.75	24,02	206,87	321,18	18,89
	Montantes e Diagonais	U 100 50 3	25,82	114,31		
PERFIL 2L	Banzos Superior e Inferior	2L 50 4.75 150	2,4	162,09	207,49	12,21
	Montantes e Diagonais	2L 30 3 110	25,82	45,4		
PERFIL U + 2L	Banzos Superior e Inferior	U 150 50 4.75	24,02	206,87	252,27	14,84
	Montantes e Diagonais	2L 30 3 110	25,82	45,4		

Fonte: A Autora (2020).

Uma vez que, para todos os carregamentos de vento em estudo foram empregados os mesmos arranjos de perfis, para verificar o consumo de aço versus a relação solicitação/resistência, buscou-se utilizar formatos geométricos parecidos. Dessa forma, as estruturas dimensionadas obtiveram o mesmo consumo de aço, independente da velocidade característica de vento adotado.

Conforme pode ser observado nesta tabela, no banzo superior e inferior da treliça foram utilizados perfis com 4,75 mm de espessura e nos elementos de montantes e diagonais foram empregados perfis com 3 mm de espessura. Desta forma, de acordo com o consumo total de aço por arranjo, a composição formada apenas por perfil cantoneira apresenta um consumo de aço inferior aos demais arranjos, 12,21 kg/m<sup>2</sup>, gerando desta forma uma estrutura extremamente leve. Já a composição formada apenas por perfil U ostenta o maior consumo de aço, 18,89 kg/m<sup>2</sup>, ficando dessa forma, o arranjo formado pela soma desses dois perfis com um valor intermediário, 14,84 kg/m<sup>2</sup>.

## 5 CONCLUSÕES

Tendo como objetivo analisar a eficiência estrutural de cobertas metálicas treliçadas executadas com perfis formados a frio pela variação de parâmetros de projeto, o presente trabalho teve início numa consulta bibliográfica, a fim de identificar quais as tipologias tradicionais de treliças utilizadas na concepção de cobertas metálicas de uso geral.

Nesta pesquisa inicial, percebeu-se que as tipologias mais citadas na literatura são a tipo Howe, Pratt e Warren. Buscou-se então analisar as características peculiares destas tipologias e verificou-se que as mais adequadas a cobertas metálicas são a Howe e Pratt. Dente estas duas escolheu-se a treliça Howe para compor este trabalho.

Realizou-se a modelagem e o dimensionamento de treliças metálicas do tipo Howe, aplicando a essas, variações que permitissem verificar sua eficiência. Foram variados dois parâmetros durante o dimensionamento da estrutura, a velocidade característica do vento, sendo adotada 30 m/s, 35m/s e 40 m/s; e o arranjo de perfis empregados, sendo utilizados o perfil U, perfil dupla cantoneira e uma associação destes.

Após o dimensionamento e análise dos resultados, foram determinados os consumos de aço para cada arranjo de perfis. Dividindo o consumo total de cada arranjo pela área da construção, calculou-se o consumo de aço por metro quadrado, ficando o arranjo formado por perfis cantoneira com 12,21 kg/m<sup>2</sup>, o arranjo de perfis U com 18,89 Kg/m<sup>2</sup> e o arranjo formado pela associação destes dois perfis com 14,84 kg/m<sup>2</sup>.

Comparando-se o consumo de aço com a resposta estrutural dos modelos pode-se compreender que, a treliça composta pela associação do perfil U com o perfil cantoneira na forma dupla, se apresenta como solução mais vantajosa para o tipo de estrutura em estudo. Uma vez que, mesmo apresentando os mesmos índices de solicitação/resistência que o arranjo de perfis U, este arranjo apresenta valores intermediários que deformação e consumo de aço. O arranjo composto por perfil dupla cantoneira se apresenta menos adequada, apesar de apresentar menor consumo de aço, este arranjo ostenta os maiores índices de solicitação/resistência dos perfis.

Com o desenvolvimento desta pesquisa, foi possível constatar que o uso de uma ferramenta computacional para auxílio aos processos de análise e

dimensionamento de estruturas é extremamente vantajoso, haja vista a quantidade de variáveis envolvidas. A utilização de um *software* possibilita que as análises sejam realizadas de maneira mais rápida e detalhada, propiciando simular de forma mais fiel a estrutura a ser desenvolvida, aspecto indispensável a estudos de viabilidade.

Uma vez que este trabalho limitou-se a analisar unicamente uma treliça tipo Howe para o comprimento de 3 m, sugere-se, para futuros estudos, a realização de uma nova pesquisa mais abrangente na qual sejam variados mais parâmetros como empregar outras tipologias de treliças, avaliar as alterações motivadas pela variação de ângulos nas diagonais e o vão livre da treliça.

## REFERÊNCIAS

ALVINO, C. G.; NETO, J. P. L. **Estudo de treliças coplanares para coberturas de construções rurais**. In: IX CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE. 2011. Campina Grande, Paraíba, 2011.

ARAUJO, A.; PAES, J.; VERÍSSIMO, G. Sistemas de vedação em alvenaria para edifícios de estrutura metálica: detalhamento com base na prevenção de manifestações patológicas. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 8, n. 2, p. 27-45, 31 dez. 2013.

ARAÚJO, A. S.; CRUZ, C. M. S.; BARRETO, J. M.; CRUZ, K. A.; GERIBELLO, R. S.; AMARANTE, M. S. A. MODAIS DE TRANSPORTE NO BRASIL. **Revista Pesquisa e Ação**, São Paulo, v. 5, n. 2, p.1-27, 2019. Semestral.

BELLEI, I. H.; BELLEI, H. N. Edifícios de pequeno porte estruturados em aço: Instituto Aço Brasil. 4. ed. Rio de Janeiro: **IABr/CBCA**, 2011. 108 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

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

BORSATO, K. T. **Arquitetura em aço e o processo de projeto**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas- SP, 2009.

COSTA, F. G. **Manutenção das estruturas metálicas com utilização dos ensaios não destrutivos**. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, 2012, São Paulo. São Paulo, 2012.



CHING, F. D. K. **Técnicas de construção ilustradas**. 5.ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2017.

DAL'BÓ, T. C. M.; SARTORTI, A. L. **Falhas e patologias nas estruturas metálicas**. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, 2012, São Paulo. São Paulo, 2012.

FLORES, I.; BRITO, J. **Patologia e reabilitação de construção em estruturas metálicas**. 22 set. 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/282008351\\_Patologia\\_e\\_Reabilitacao\\_de\\_Construcao\\_em\\_Estrutura\\_Metalica](https://www.researchgate.net/publication/282008351_Patologia_e_Reabilitacao_de_Construcao_em_Estrutura_Metalica). Acessado em 27 mai. 2020.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOMES, M. I. **Estudo e análise de treliças**, 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/301298120\\_Estudo\\_e\\_Analise\\_de\\_Trelicas](https://www.researchgate.net/publication/301298120_Estudo_e_Analise_de_Trelicas). Acesso em: 27 mai. 2020.

GRIGOLET, G. C. **Dimensionamento de perfis de aço formados a frio: método da resistência direta versus método da largura efetiva**. In: XI SEMANA DE EXTENSÃO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO- SEPesq Centro universitário Ritter dos Reis. 2015. Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

GUARNIER, C. R. F. **Metodologias de detalhamento de estruturas metálicas**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

HIBBELER, R. C. **Estática: Mecânica para engenharia**. 12. ed. SÃO Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. 265 p.

HOUTZ, G. C. C. **Traçado automático de envoltórias de esforços em estruturas planas utilizando um algoritmo evolucionário**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2005.

IMIANOWSKY, G. W.; WALENDOWSKY, M. A. **Os principais aços carbonos utilizados na construção civil**. 2015. Disponível em: <http://www.crea-sc.org.br/portal/arquivosSGC/a%C3%A7os%20carbono%20constru%C3%A7%C3%A3o%20civil.pdf>. Acessado em: 27 mai. 2020.

Ligações em estruturas metálicas. / Instituto Aço Brasil, Alexandre Luiz Vasconcellos (rev.). - Rio de Janeiro: **Instituto Aço Brasil /CBCA**, 2017.

LUIBARTAS, D.; SILVA, E. A. S. B.; SANTOS, E. A. M. A sustentabilidade do aço e das estruturas metálica. **INOVAE – Journal of Engineering and Technology Innovation**, São Paulo, p.92-110, jan. /abr. 2015. Semestral.

MANCINI, L. C. **Pré-dimensionamento de estruturas metálicas em fase de concepção arquitetônica**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

MARTINS, M. M. **Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio**. 2000. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000. Cap. 2000.

NARDIN, F. Â. **A importância da estrutura metálica na construção civil**. 2008. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco, Itatiba, 2008.

NOGUEIRA, G. S. **Avaliação de soluções estruturais para galpões compostos por perfis de aço formados a frio**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

NUNES, P. E. V. **Acção do vento em coberturas metálicas modelação do tipo “sombreador”**. 2008. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

OLIVEIRA, M. S. **Modelo estrutural qualitativo para pré-avaliação do comportamento de estruturas metálicas**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

OLIVEIRA, N. **Propriedades mecânicas de um aço de baixo carbono com estrutura ferrita acicular**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Guaratingueta, Universidade Estadual Paulista, Guaratingueta, 2007.

PALMA, G. **Apostila Estruturas Metálicas**. Cascavel, 2007. 38 p. Disponível em: <https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2014/02/estruturas-metc3a1licas.pdf>. Acessado em: 27 maio. 2020.

PAROLIN, B. **Projeto estrutural de madeira maciça de acordo com diferentes sistemas construtivos**. 2017. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2017.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 382 p.

PRAVIA, Z. M. C.; FICANHA, R.; KRIPKA, M. Galpões com treliças metálicas para usos gerais. **Téchne**, Rio de Janeiro, v. 171, p.92-96, jul. 2011.

REBELLO, Y. C. P. **A concepção estrutural e a arquitetura**. São Paulo: Zigurate Editora, 2000. 272 p.

RODRIGUES, R. A. **O uso das estruturas metálicas na construção civil**. 2017. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade Finom de Pato de Minas, Minas Gerais, 2017.

SACCHI, C. C.; SOUZA, A. S. C. Manifestações patológicas e controle de qualidade na montagem e fabricação de estruturas metálicas. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 3, n. 1, p.20-34, 2017. Semestral.

SAMARRA, F. A.; REQUENA, J. A. V.; JÚNIOR, N. O. P. Análise numérica-experimental de treliças tubulares planas para coberturas padronizadas para grandes vãos. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, p.459-466, out-dez/2012. Trimestral.

SILVA, V. P. **Dimensionamento de estruturas de aço**. São Paulo, 2012. 150 p. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/110863/mod\\_resource/content/0/apostila2012.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/110863/mod_resource/content/0/apostila2012.pdf). Acessado em 27 mai. 2020.

SILVA, E.; SILVA, V. P. Dimensionamento de perfis formados a frio conforme NBR 14762 e NBR 6355- Dados eletrônicos. Rio de Janeiro: **IBS/CBCA**, 2008.

SOUZA, A. N. **Análise do projeto de estruturas metálicas espaciais: ênfase em coberturas**. 2002. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SOUZA, F. R. V. **Implementação Computacional do Método da Rigidez Direta para Análise de Sistemas Estruturais Planos**. 2017. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SOUZA, M. F. S. M.; RODRIGUES, R. B.; MASCIA, N. T. **Sistemas estruturais de edificações e exemplos**. Campinas, 2008. 93 p. Disponível em: [http://www.fec.unicamp.br/~nilson/apostilas/sistemas\\_estruturais\\_grad.pdf](http://www.fec.unicamp.br/~nilson/apostilas/sistemas_estruturais_grad.pdf). Acessado em: 27 mai. 2020.

STABILE ENGENHARIA LTDA. **MCALC3D 3.0**. Brasil, 2012. 234 p.

TEIXEIRA, R. B. **Análise da gestão do processo de projeto estrutural de construções metálicas**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

ROMÃO, X. **Sistemas articulados planos: mecânica I**. 2002-2003. 19 p. Notas de Aula. Disponível em: <http://clubes.obmep.org.br/blog/wp-content/uploads/2019/05/Sistemas-articulados-planos.pdf>. Acessado em: 27 mai. 2020.

TISOT, G. D.; MEDEIROS, G. F.; KRIPKA, M. **Estudo de treliças metálicas para coberturas em duas águas através de otimização topológica**. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, 4., 2010, São Paulo. São Paulo, 2010.

YIN. R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

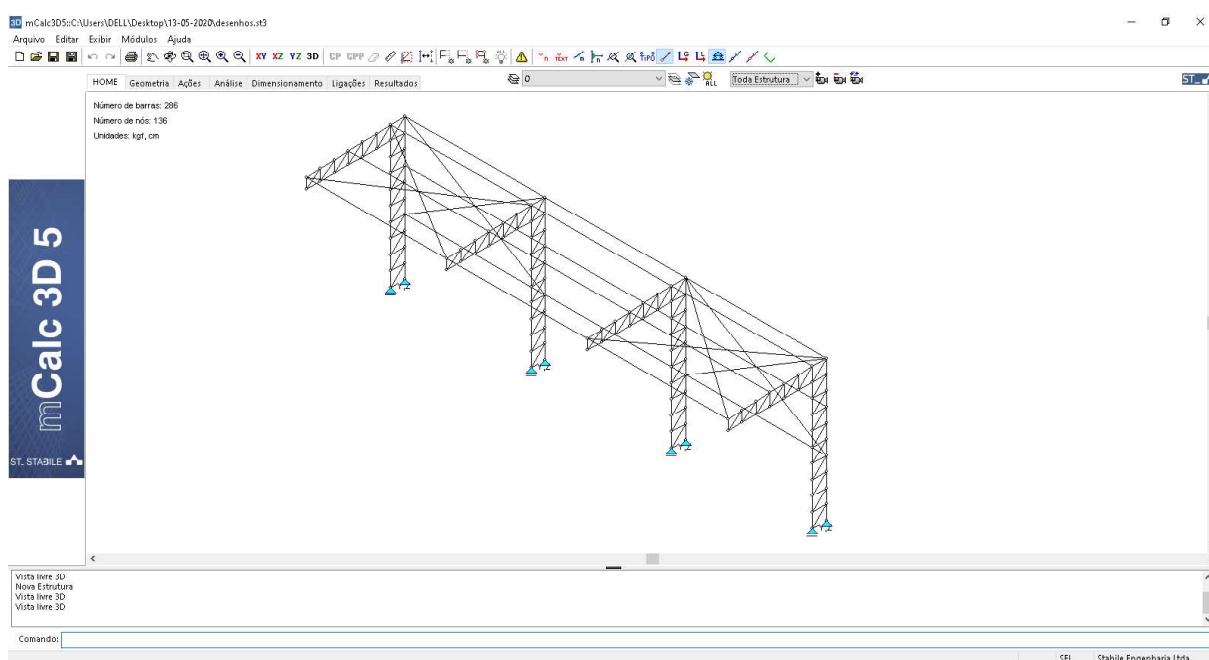
## APÊNDICE A – Metodologia de dimensionamento no Mcalc 3d

O processo de dimensionamento será iniciado com um desenho preliminar da estrutura no *software* AutoCAD. Este desenho será denominado desenho unifilar e deverá ser desenvolvido com o uso de polylines, onde cada linha representará uma barra.

É interessante mencionar que cada trecho da estrutura deverá ser desenhado com uma linha diferente, a fim de que os encontros destas possam ser interpretados como nós no programa Mcalc 3d. Isso facilitará o trabalho de análise da estrutura ponto a ponto e permitirá que os resultados obtidos nas simulações sejam o mais próximo possível da realidade. O passo seguinte, na concepção da estrutura é importar o desenho para o sistema Mcalc 3d.

Uma das vantagens desse programa é a possibilidade de integração e comunicação com outros *softwares*, como citado na seção anterior. Assim, a importação do arquivo do caso em estudo será realizada utilizando-se a extensão DXF, extensão compatível entre os programas Mcalc 3d e AutoCad. Com o desenho dentro do programa inicia-se a manipulação da estrutura. Na Figura 29 é apresentada a interface do programa.

Figura 29 – Interface do Programa Mcalc 3d.



Fonte: A Autora (2019).

Como explanado no capítulo anterior, o processo de concepção estrutural com o *software* Mcalc 3d pode ser sintetizado em quatro módulos. No primeiro módulo é realizada a modelagem da edificação, são definidas as informações referentes a geometria da estrutura, propriedades das peças e ações solicitantes de projeto.

No segundo módulo é realizada a análise da estrutura, neste módulo são solicitadas as condições de contorno determinadas na seção anterior e aplicadas a estrutura. O módulo três destina-se a execução do dimensionamento das peças, neste módulo são realizados os testes para definir o perfil mais adequado para cada posição dentro da estrutura. O quarto e último módulo é responsável pela exposição dos relatórios gerados durante o manuseio da estrutura dentro do programa. A seguir os módulos são especificados individualmente.

## **MÓDULO 1**

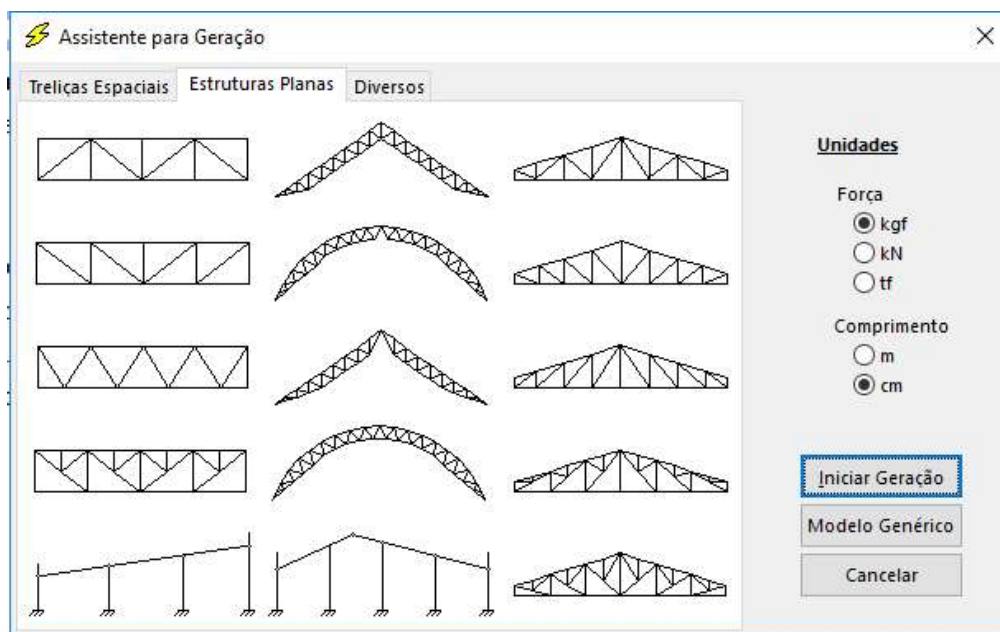
Dentro do primeiro módulo serão definidas as características geométricas da estrutura, as propriedades das peças e as ações que incidem sobre estas. Este módulo é operado a partir de três menus. O primeiro menu, intitulado como Home, é onde dá-se início a modelagem da estrutura.

Iniciando um novo trabalho no Mcalc 3d, é aberto um arquivo em branco no qual deverá ser inserido o desenho inicial da estrutura. Este desenho pode ser gerado de três maneiras diferentes. A primeira é utilizando-se das ferramentas disponíveis no menu geometria. A segunda forma é através da janela designada assistente de geração, que pode ser visualizada na Figura 30.

Nesta janela é escolhido o tipo de estrutura com a qual se deseja trabalhar e as unidades de força e comprimento e, após essas definições, o projetista opta por iniciar a geração de um novo modelo estrutural ou trabalhar com um modelo genérico.

A terceira forma de inserção do desenho é realizando a importação do arquivo com o desenho unifilar da estrutura. Esta, como definido anteriormente, será a técnica de geração adotada no presente trabalho. Logo após segue-se com o manuseio da estrutura dentro do *software*.

Figura 30 – Janela Assistente de Geração



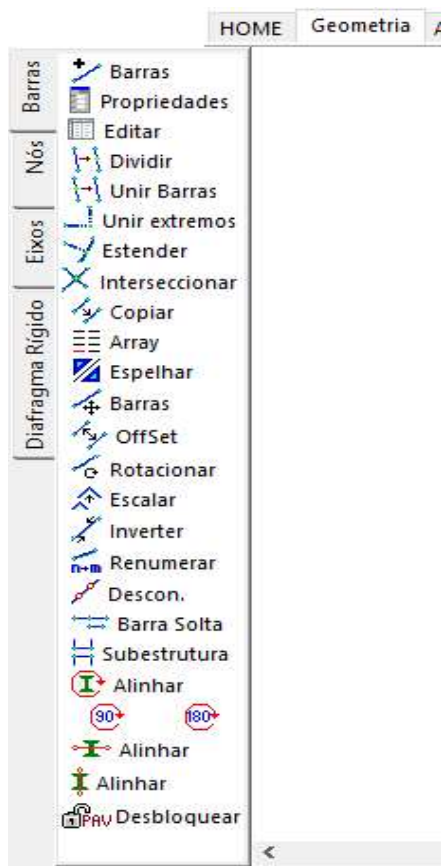
Fonte: A Autora (2019).

Dentro do menu Home, no canto superior esquerdo da tela, é possível identificar os principais dados da estrutura, número de barras, nós e as unidades escolhidas para serem trabalhadas. Seguindo no dimensionamento, parte-se para o menu Geometria.

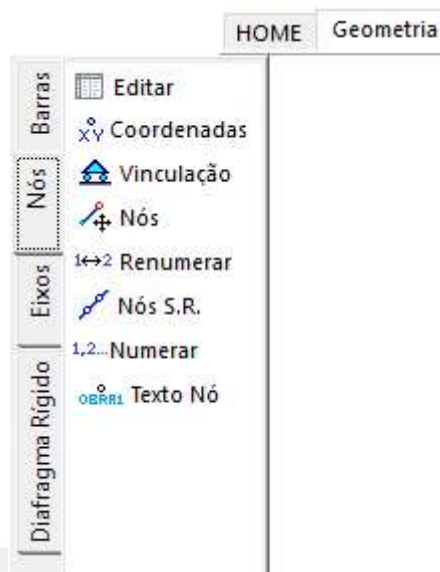
Neste menu são disponibilizadas quatro abas, através das quais serão determinadas as características geométricas da estrutura, nós, eixos e diagrama rígido. Na Figura 31 podem ser visualizadas as abas do menu geometria. Ainda dentro do menu Geometria são determinadas as propriedades das barras. A janela na qual essa prescrição é realizada pode ser visualizada na Figura 32.



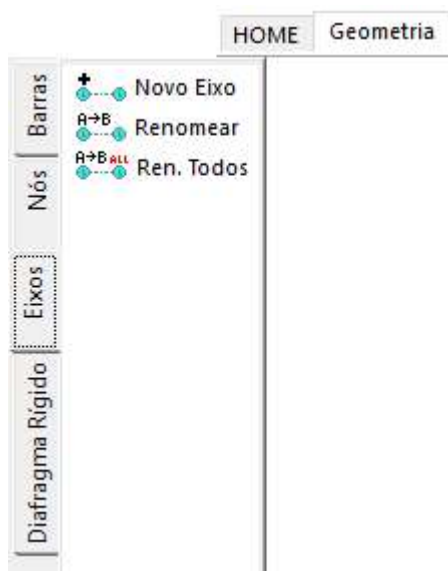
Figura 31 – Abas do menu geometria



(a) Aba barras



(b) Aba nós



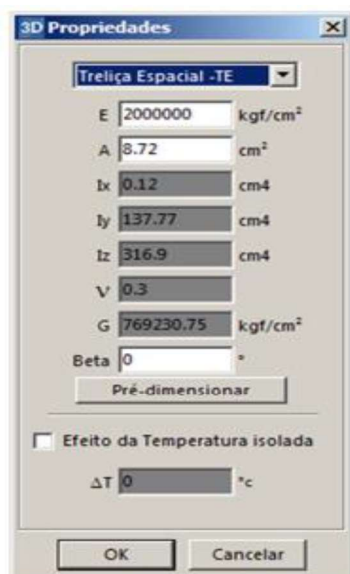
(c) Aba eixos



(d) Aba diagramas rígidos

Fonte: A Autora (2019).

Figura 32 – Janela Propriedades



Fonte: STABILE ENGENHARIA LTDA, adaptado pela autora, 2019

Passada esta fase, avança-se para o último menu deste módulo, o menu Ações. Neste menu são determinadas as combinações de ações de projeto que incidirão sobre a estrutura. É interessante mencionar que, tratando de treliças, o programa não permite que sejam geradas ações distribuídas sobre as barras, deste modo, as cargas sempre estarão concentradas nos nós, característica de funcionamento de uma treliça ideal (STABILE ENGENHARIA LTDA, 2012).

De acordo com o manual STABILE ENGENHARIA LTDA (2012), são gerados até seis tipos de combinações de cargas e estas são posicionadas sobre o banzo superior da treliça, sempre como carga distribuída. Os possíveis estados de carga podem ser identificados como:

- Estado 1: Ação Permanente (peso próprio + telhas + ...);
- Estado 2: Sobrecarga;
- Estado 3: Vento Transversal;
- Estado 4: Vento Longitudinal;
- Estado 5: Pressão Interna para Vento Transversal;
- Estado 6: Pressão Interna para Vento Longitudinal.

Após definidas essas condições, prossegue-se para o módulo seguinte.

## MÓDULO 2

O módulo dois é o ambiente de análise de estruturas do sistema Mcalc 3d. Este módulo busca as condições de contorno estabelecidas no menu Ações, e as aplica sobre a estrutura. Ao clicar na aba deste módulo é aberta a janela de Análise na qual é realizada a ponderação das combinações adotadas. A janela em questão pode ser visualizada na Figura 33.

Segundo o manual STABILE ENGENHARIA LTDA (2012), o programa executa uma análise elástica-linear embasada no método da rigidez direta. Conforme Souza (2017) “O Método da Rigidez Direta é formulado em torno do equilíbrio de cada nó de um modelo em função de seus deslocamentos”.

Figura 33 – Janela Análise

The screenshot shows the 'Análise' window in mCalc3D. On the left, there is a list of 'Combinações de Ações' with four items: 'Combinação 1', 'Combinação 2', 'Combinação 3', and 'Combinação 4', all of which are checked. Below this list are buttons for 'Adicionar', 'Excluir', 'Atualizar', and 'Favoritos'. The main area contains a table with columns for 'Estados de Ações', 'E.L.U.', 'Fator de Combinação', and 'E.L.S.'. The table lists several action states with their corresponding factors. Below the table are buttons for 'Adicionar', 'Excluir', 'Atualizar', and 'Favoritos'. At the bottom, there are sections for 'Opções para análise de 2º ordem' (including checkboxes for 'Habilitar execução da análise de 2º ordem' and 'Avaliar apenas efeitos dos elementos de tipo Cabo'), 'Número máximo de ciclos para convergência', 'Critério de convergência', 'Efeito da temperatura' (with a dropdown for 'Vincular Efeito da Temperatura ao estado'), and 'Outras opções' (with a checked checkbox for 'Salvar Reordenamento da estrutura'). At the very bottom are 'Envoltória' and 'Cancelar' buttons.

Estados de Ações	E.L.U.	Fator de Combinação	E.L.S.
<input checked="" type="checkbox"/> A.P.	$\gamma$ 1.4	$\psi_0$ 1.0	$\psi_{1,2}$ 1.0
<input checked="" type="checkbox"/> Sobrecarga	$\gamma$ 1.25	$\psi_0$ 1.0	$\psi_{1,2}$ 1.0
<input type="checkbox"/> V. Trans.	$\gamma$ 1.0	$\psi_0$ 1.0	$\psi_{1,2}$ 1.0
<input type="checkbox"/> V. Trans. D.	$\gamma$ 1.0	$\psi_0$ 1.0	$\psi_{1,2}$ 1.0
<input type="checkbox"/> V. Long.	$\gamma$ 1.0	$\psi_0$ 1.0	$\psi_{1,2}$ 1.0
<input type="checkbox"/> PI / VT	$\gamma$ 1.0	$\psi_0$ 1.0	$\psi_{1,2}$ 1.0
<input type="checkbox"/> PI / VL	$\gamma$ 1.0	$\psi_0$ 1.0	$\psi_{1,2}$ 1.0

Fonte: A Autora (2019).

Conforme o manual STABILE ENGENHARIA LTDA (2012) a execução do método da rigidez direta, dentro do módulo Análise, ocorre de acordo com etapas descritas abaixo, consecutivamente.

- Etapa 1: Cálculo da matriz de rigidez do elemento e do vetor das ações nodais equivalentes.
- Etapa 2: Montagem da matriz de rigidez da estrutura e do vetor de ações da estrutura (matriz global e vetor de ações global).
- Etapa 3: Introdução das condições de contorno (vinculação).
- Etapa 4: Solução do sistema de equações.
- Etapa 5: Cálculo das solicitações nos extremos das barras e das reações nodais.

O passo seguinte é a configuração do relatório, que é realizada numa segunda janela aberta de modo automático, após realizadas as considerações na janela anterior. A janela de configuração do relatório pode ser observada na Figura 34.

Figura 34 – Janela Configuração do Relatório

**3D Configurar Relatório**

Exibir no relatório

Características Principais

Coordenada dos nós

Conectividades das barras

Propriedades das barras

Condições Especiais

Efeito da Temperatura

Ações

Ações Nodais

Ações nas barras

Vinculação

Vinculação

Resultados

Deslocamentos Nodais

Esforços nos extremos das barras

Reações Nodais

Envoltória de máximos e mínimos

Deslocamentos Nodais

Solicitações nos extremos das barras

Vigas Mistas

Análise e composição das Vigas Mistas

Adicionar ao relatório

Apenas itens visíveis

Dados gerais

Cliente

Obra

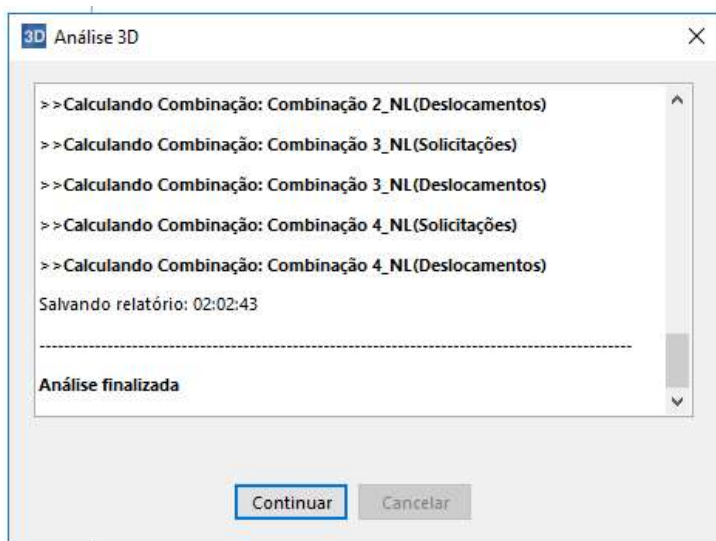
Trabalho

Responsável

Fonte: A Autora (2019).

Posteriormente o programa realiza a análise da estrutura. Esta é feita automaticamente, sem a necessidade de intervenção de um operador do sistema. Encerrada a análise segue-se para o módulo seguinte. Na Figura 35 é apresentada a janela na qual é exibido o processo de análise.

Figura 35 – Janela de Processo de Análise

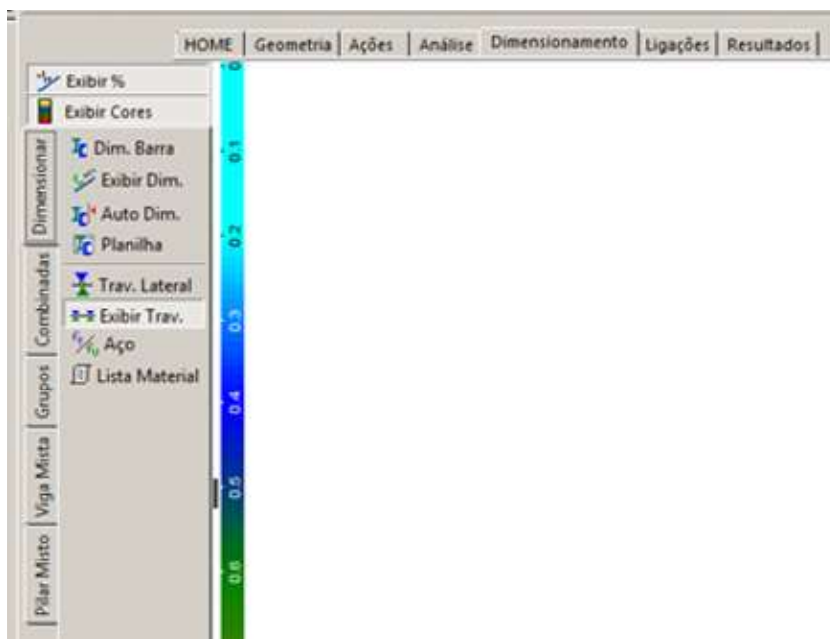


Fonte: A Autora (2019).

### MÓDULO 3

O módulo três por sua vez é composto por cinco abas. Devido a estrutura em estudo ser uma treliça simples de cobertura, a aba mais utilizada será a aba dimensionar, e esta pode ser visualizada na Figura 36.

Figura 36 – Aba Dimensionar/ Módulo Dimensionamento

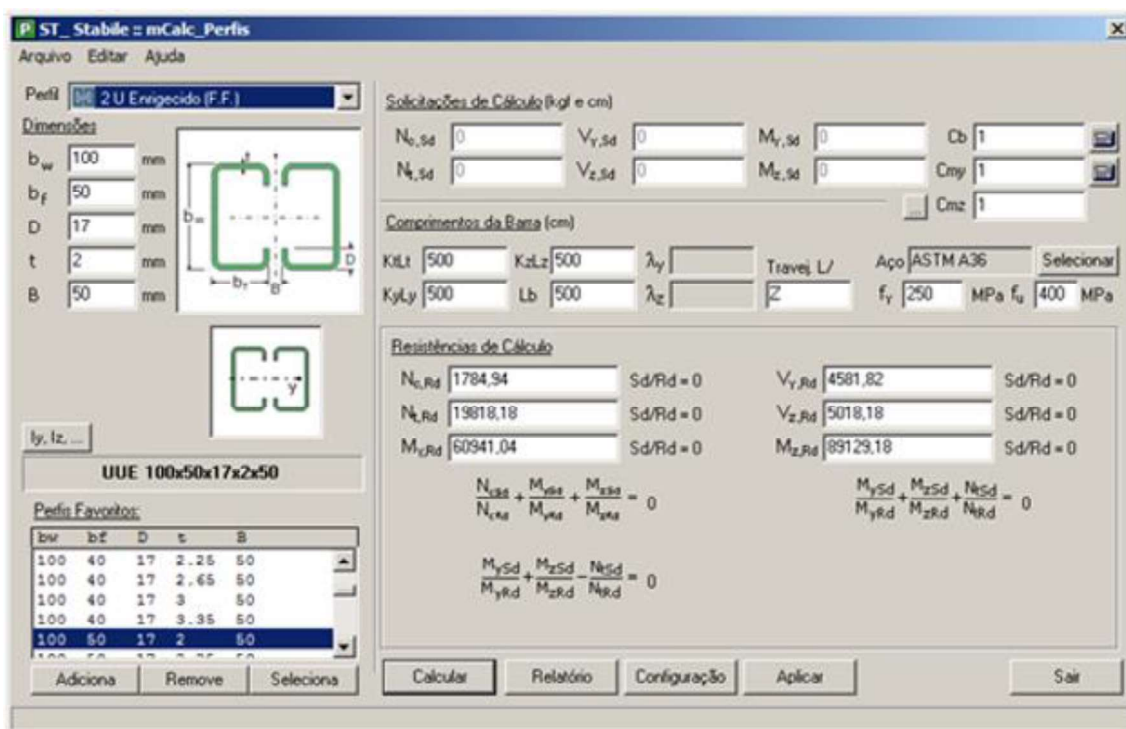


Fonte: A Autora (2019).

Neste módulo são apresentadas as solicitações que atuam sobre cada barra individualmente e realizada a escolha do perfil a ser empregado. É interessante mencionar que o módulo dimensionamento tem seu acesso liberado apenas após executada a análise da estrutura.

Este é o ponto principal abordado no presente trabalho, é neste módulo que serão realizados os testes dos perfis a fim de analisar qual será o mais estruturalmente e economicamente adequado para cada posição dentro da estrutura de cobertura. Acionando a aba Dimensionamento, tendo escolhido a barra a dimensionar, é aberta a janela Perfis, que pode ser vista na Figura 37.

Figura 37 – Janela Perfis



Fonte: A Autora (2019).

Dentro desta janela é escolhido o tipo de perfil e dimensões bem como o tipo de aço a serem utilizados. Ainda dentro da janela é possível saber se o perfil escolhido pode ser utilizado na posição em questão pois o programa gera mensagens que notificam se algum limite foi ultrapassado.

Fechando janela perfis, é possível verificar o quanto barra está solicitada, tanto numericamente, pois do lado da barra é apresentado o esforço percentual, quanto visualmente, uma vez que o programa apresenta uma escala de cores na qual

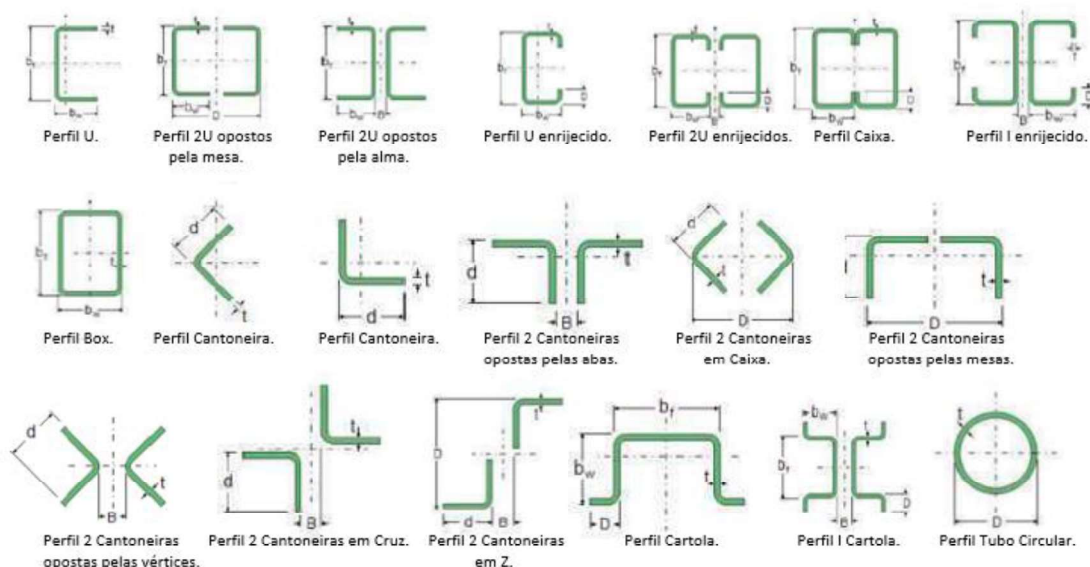
é facilmente identificável o nível de solicitação, partindo de um azul-claro para as barras menos solicitadas, até o vermelho que indica que a barra está solicitada próximo ao seu limite ou super solicitada, no caso de a solicitação estar acima de 100% da sua capacidade.

O manual STABILE ENGENHARIA LTDA (2012) informa que o dimensionamento realizado no *software* é embasado nas recomendações da NBR 14762/2010 e da NBR 8800/2008. Como já citado anteriormente, a escolha do perfil é realizada no momento do dimensionamento, o que favorece a otimização da estrutura, uma vez que se pode facilmente incluir, remover ou variar a seção do mesmo.

Em síntese, o processo de dimensionamento é um mecanismo de verificação, no qual são arbitrados os perfis, seções, dimensões e posicionamento, e o programa aferi se estes possuem resistência suficiente para suportar as solicitações previstas.

O *software* dispõe de 19 tipos de perfis formados a frio, 17 tipos de perfis laminados e seis perfis soldados. Estes podem ser facilmente identificados e diferenciados visualmente, uma vez que o programa adota uma cor diferente para cada tipo de perfil. Na Figura 38, podem ser observados os perfis formados a frio disponibilizados pelo programa.

Figura 38 – Perfis Formados a Frio



Fonte: A Autora (2019).



O presente estudo se limitou a realizar testes para análise de desempenho estrutural apenas com perfis formados a frio. Devido a este tipo de perfil ser amplamente utilizados em elementos estruturais leves como terças, montantes e diagonais de treliças, elemento estrutural explorado no presente estudo (SILVA, 2012).

Após findado o processo de dimensionamento da estrutura o passo seguinte é a verificação dos relatórios gerados durante a manipulação da estrutura dentro do programa.

## **MÓDULO 4**

O quarto e último módulo a ser explorado dentro do programa Mcalc 3d é o módulo Relatório. Segundo o manual STABILE ENGENHARIA LTDA (2012), neste módulo são exibidos os relatórios gerados no decorrer da análise e dimensionamento da estrutura em estudo, além de possibilitar a visualização do desenho da deformada da estrutura sob as diversas combinações de ações determinadas pelo operador.

Em consonância com o manual do programa, nos relatórios disponibilizados podem ser encontradas as seguintes informações:

- **Dados Geométricos:** informações gerais referentes a estrutura trabalhada, como o tipo de estrutura e características constitutivas, como comprimento, altura, inclinação do telhado, etc.; perfil utilizado; o sistema construtivo adotado, entre outras indicações.
- **Carregamento:** forma de aplicação; valores de sobrecarga; pressão dinâmica; lista de estados gerados e coeficientes aerodinâmicos.
- **Ação do vento na edificação.**
- **Análise:** são exibidas as combinações de ações consideradas para cada estado.
- **Resultado da Análise:** são mostrados os diagramas de momento fletor e esforço cortante atuantes na estrutura; diagramas da deformada para cada combinação e as reações de apoio para cada uma destas.
- **Dimensionamento** – são listados os perfis utilizados em toda a estrutura e exibida a relação solicitação/resistência para cada perfil.



- Lista de Perfis – são apresentadas informações referentes aos perfis adotados nome, quantidade, comprimentos etc.
- Relação de Materiais – são relacionados o tipo de aço e a quantidade empregada em cada perfil, bem como peso total (em kg) e o peso unitário (em kgf/m<sup>2</sup>) global da estrutura.
- Memória de cálculo - neste item é exibido o memorial de cálculo para cada perfil que constitui a estrutura.

Os relatórios produzidos devem ser analisados de forma crítica afim de se conduzir uma concepção estrutural bem dimensionada e adequada para o tipo de utilização final, prezando sempre pela segurança e durabilidade da edificação.

### APÊNDICE B – Índice Solicitação/Resistência para carregamento de vento de 30 m/s

PERFIL U														
BANZO INFERIOR				BANZO SUPERIOR				MONTANTE				DIAGONAIS		
Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência
42	1717,18	0,09	54	-1,52	0,00	48	62,09	0,01	60	-118,00	0,01	60	-118,00	0,01
43	1280,31	0,07	55	-94,71	0,00	49	424,27	0,04	61	-233,82	0,04	61	-233,82	0,02
44	881,98	0,05	56	-277,87	0,01	50	365,24	0,03	62	-335,68	0,03	62	-335,68	0,03
45	533,78	0,03	57	-534,50	0,02	51	300,52	0,03	63	-467,97	0,03	63	-467,97	0,04
46	277,53	0,01	58	-883,06	0,04	52	204,90	0,02	64	-548,87	0,02	64	-548,87	0,04
47	94,59	0,00	59	-1281,99	0,05	53	134,01	0,01	65	-617,86	0,01	65	-617,86	0,05
118	2996,08	0,16	125	-3,04	0,00	110	743,51	0,07	131	-213,59	0,07	131	-213,59	0,02
119	2239,95	0,12	126	-171,44	0,01	111	644,51	0,06	132	-410,30	0,06	132	-410,30	0,03
120	1546,99	0,08	127	-492,84	0,02	112	535,44	0,05	133	-582,82	0,05	133	-582,82	0,05
121	937,16	0,05	128	-938,45	0,04	113	364,51	0,03	134	-819,63	0,03	134	-819,63	0,06
122	492,22	0,03	129	-1548,93	0,06	114	243,95	0,02	135	-954,83	0,02	135	-954,83	0,07
123	171,19	0,01	130	-2242,94	0,09	124	119,31	0,01	136	-1069,33	0,01	136	-1069,33	0,08
189	2996,08	0,16	196	-3,04	0,00	181	743,51	0,07	202	-213,59	0,07	202	-213,59	0,02
190	2239,95	0,12	197	-171,44	0,01	182	644,51	0,06	203	-410,30	0,06	203	-410,30	0,03
191	1546,99	0,08	198	-492,84	0,02	183	535,44	0,05	204	-582,82	0,05	204	-582,82	0,05
192	937,16	0,05	199	-938,45	0,04	184	364,51	0,03	205	-819,63	0,03	205	-819,63	0,06
193	492,22	0,03	200	-1548,93	0,06	185	243,95	0,02	206	-954,83	0,02	206	-954,83	0,07
194	171,19	0,01	201	-2242,94	0,09	195	119,31	0,01	207	-1069,33	0,01	207	-1069,33	0,08
260	1717,18	0,09	267	-1,52	0,00	252	424,27	0,04	273	-118,00	0,04	273	-118,00	0,01
261	1280,31	0,07	268	-94,71	0,00	253	365,24	0,03	274	-233,82	0,03	274	-233,82	0,02
262	881,98	0,05	269	-277,87	0,01	254	300,52	0,03	275	-335,68	0,03	275	-335,68	0,03
263	533,78	0,03	270	-534,50	0,02	255	204,90	0,02	276	-467,97	0,02	276	-467,97	0,04
264	277,53	0,01	271	-883,06	0,04	256	134,01	0,01	277	-548,87	0,01	277	-548,87	0,04
265	94,59	0,00	272	-1281,99	0,05	266	62,09	0,01	278	-617,86	0,01	278	-617,86	0,05
<b>Máximo</b>	<b>0,16</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,09</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,01</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,08</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,08</b>	
<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,07</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>	
<b>Média</b>	<b>0,06</b>		<b>Média</b>	<b>0,03</b>		<b>Média</b>	<b>0,03</b>		<b>Média</b>	<b>0,04</b>		<b>Média</b>	<b>0,04</b>	

Fonte: A Autora (2020).

PERFIL 2L												
BANZO INFERIOR			BANZO SUPERIOR			MONTANTE			DIAGONAIS			
Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	
42	1474,94	0,45	54	-1,52	0,00	48	55,24	0,01	60	-99,21	0,01	
43	1099,28	0,34	55	-79,61	0,00	49	368,85	0,07	61	-200,62	0,03	
44	756,67	0,23	56	-236,76	0,01	50	318,04	0,06	62	-289,32	0,04	
45	457,37	0,14	57	-457,95	0,02	51	262,10	0,05	63	-402,28	0,05	
46	236,49	0,07	58	-757,58	0,04	52	180,26	0,03	64	-472,08	0,06	
47	79,52	0,02	59	-1100,71	0,06	53	118,44	0,02	65	-531,28	0,07	
118	2709,01	0,83	125	-3,04	0,00	110	679,98	0,12	131	-186,58	0,03	
119	2022,21	0,62	126	-149,73	0,01	111	588,71	0,11	132	-369,72	0,05	
120	1394,09	0,43	127	-439,36	0,02	112	487,99	0,09	133	-529,75	0,07	
121	843,25	0,26	128	-844,39	0,04	113	335,55	0,06	134	-740,36	0,10	
122	438,80	0,13	129	-1395,84	0,07	114	223,76	0,04	135	-865,51	0,12	
123	149,54	0,05	130	-2024,96	0,10	124	107,50	0,02	136	-971,28	0,13	
189	2709,01	0,83	196	-3,04	0,00	181	679,98	0,12	202	-186,58	0,03	
190	2022,21	0,62	197	-149,73	0,01	182	588,71	0,11	203	-369,72	0,05	
191	1394,09	0,43	198	-439,36	0,02	183	487,99	0,09	204	-529,75	0,07	
192	843,25	0,26	199	-844,39	0,04	184	335,55	0,06	205	-740,36	0,10	
193	438,80	0,13	200	-1395,84	0,07	185	223,76	0,04	206	-865,51	0,12	
194	149,54	0,05	201	-2024,96	0,10	195	107,50	0,02	207	-971,28	0,13	
260	1474,94	0,45	267	-1,52	0,00	252	368,85	0,07	273	-99,21	0,01	
261	1099,28	0,34	268	-79,61	0,00	253	318,04	0,06	274	-200,62	0,03	
262	756,67	0,23	269	-236,76	0,01	254	262,10	0,05	275	-289,32	0,04	
263	457,37	0,14	270	-457,95	0,02	255	180,26	0,03	276	-402,28	0,05	
264	236,49	0,07	271	-757,58	0,04	256	118,44	0,02	277	-472,08	0,06	
265	79,52	0,02	272	-1100,71	0,06	266	55,24	0,01	278	-531,28	0,07	
<b>Máximo</b>	<b>0,83</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,10</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,12</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,13</b>		
<b>Mínimo</b>	<b>0,02</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>		
<b>Média</b>	<b>0,30</b>		<b>Média</b>	<b>0,03</b>		<b>Média</b>	<b>0,06</b>		<b>Média</b>	<b>0,06</b>		

Fonte: A Autora (2020).

## PERFIL U + 2L

BANZO INFERIOR				BANZO SUPERIOR				MONTANTE				DIAGONAIS			
Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	
42	1522,04	0,08	54	-1,52	0,00	48	55,89	0,01	60	-101,36	0,01	60	-101,36	0,01	
43	1133,79	0,06	55	-81,35	0,00	49	380,13	0,07	61	-206,78	0,03	61	-206,78	0,03	
44	779,98	0,04	56	-243,31	0,01	50	327,34	0,06	62	-298,95	0,04	62	-298,95	0,04	
45	471,27	0,03	57	-471,87	0,02	51	269,23	0,05	63	-414,90	0,06	63	-414,90	0,06	
46	243,04	0,01	58	-780,88	0,03	52	185,17	0,03	64	-487,50	0,07	64	-487,50	0,07	
47	81,25	0,00	59	-1135,23	0,05	53	120,96	0,02	65	-549,09	0,07	65	-549,09	0,07	
118	2756,25	0,15	125	-3,04	0,00	110	691,28	0,13	131	-188,74	0,03	131	-188,74	0,03	
119	2056,88	0,11	126	-151,48	0,01	111	598,04	0,11	132	-375,92	0,05	132	-375,92	0,05	
120	1417,55	0,08	127	-445,91	0,02	112	495,15	0,09	133	-539,43	0,07	133	-539,43	0,07	
121	857,28	0,05	128	-858,30	0,03	113	340,49	0,06	134	-753,03	0,10	134	-753,03	0,10	
122	445,43	0,02	129	-1419,18	0,06	114	226,30	0,04	135	-880,95	0,12	135	-880,95	0,12	
123	151,30	0,01	130	-2059,50	0,08	124	108,13	0,02	136	-989,12	0,13	136	-989,12	0,13	
189	2756,25	0,15	196	-3,04	0,00	181	691,28	0,13	202	-188,74	0,03	202	-188,74	0,03	
190	2056,88	0,11	197	-151,48	0,01	182	598,04	0,11	203	-375,92	0,05	203	-375,92	0,05	
191	1417,55	0,08	198	-445,91	0,02	183	495,15	0,09	204	-539,43	0,07	204	-539,43	0,07	
192	857,28	0,05	199	-858,30	0,03	184	340,49	0,06	205	-753,03	0,10	205	-753,03	0,10	
193	445,43	0,02	200	-1419,18	0,06	185	226,30	0,04	206	-880,95	0,12	206	-880,95	0,12	
194	151,30	0,01	201	-2059,50	0,08	195	108,13	0,02	207	-989,12	0,13	207	-989,12	0,13	
260	1522,04	0,08	267	-1,52	0,00	252	380,13	0,07	273	-101,36	0,01	273	-101,36	0,01	
261	1133,79	0,06	268	-81,35	0,00	253	327,34	0,06	274	-206,78	0,03	274	-206,78	0,03	
262	779,98	0,04	269	-243,31	0,01	254	269,23	0,05	275	-298,95	0,04	275	-298,95	0,04	
263	471,27	0,03	270	-471,87	0,02	255	185,17	0,03	276	-414,90	0,06	276	-414,90	0,06	
264	243,04	0,01	271	-780,88	0,03	256	120,96	0,02	277	-487,50	0,07	277	-487,50	0,07	
265	81,25	0,00	272	-1135,23	0,05	266	55,89	0,01	278	-549,09	0,07	278	-549,09	0,07	
<b>Máximo</b>	<b>0,15</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,08</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,13</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,13</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,13</b>		
<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>		
<b>Média</b>	<b>0,05</b>		<b>Média</b>	<b>0,03</b>		<b>Média</b>	<b>0,06</b>		<b>Média</b>	<b>0,06</b>		<b>Média</b>	<b>0,07</b>		

Fonte: A Autora (2020).

**APÊNDICE C – Índice Solicitação/Resistência para carregamento de vento de 35 m/s**

PERFIL U																			
BANZO INFERIOR					BANZO SUPERIOR					MONTANTE					DIAGONAIS				
Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/Resistência		
42	1717,18	0,09	54	-2,06	0,00	48	62,09	0,01	60	-118,00	0,01								
43	1280,31	0,07	55	-94,72	0,00	49	424,27	0,04	61	-233,83	0,02								
44	881,98	0,05	125	-4,13	0,00	50	365,24	0,03	62	-335,67	0,03								
45	533,78	0,03	196	-4,13	0,00	51	300,52	0,03	63	-467,97	0,04								
46	277,52	0,01	267	-2,06	0,00	52	204,90	0,02	64	-548,87	0,04								
47	94,59	0,00	268	-94,72	0,00	53	134,01	0,01	65	-617,86	0,05								
118	2996,08	0,16	56	-277,86	0,01	110	743,51	0,07	131	-213,59	0,02								
119	2239,95	0,12	126	-171,44	0,01	111	644,51	0,06	132	-410,30	0,03								
120	1546,99	0,08	197	-171,44	0,01	112	535,44	0,05	133	-582,82	0,05								
121	937,16	0,05	269	-277,86	0,01	113	364,51	0,03	134	-819,63	0,06								
122	492,22	0,03	57	-534,50	0,02	114	243,95	0,02	135	-954,83	0,07								
123	171,19	0,01	127	-492,84	0,02	124	119,31	0,01	136	-1069,33	0,08								
189	2996,08	0,16	198	-492,84	0,02	181	743,51	0,07	202	-213,59	0,02								
190	2239,95	0,12	270	-534,50	0,02	182	644,51	0,06	203	-410,30	0,03								
191	1546,99	0,08	58	-883,06	0,04	183	535,44	0,05	204	-582,82	0,05								
192	937,16	0,05	128	-938,45	0,04	184	364,51	0,03	205	-819,63	0,06								
193	492,22	0,03	199	-938,45	0,04	185	243,95	0,02	206	-954,83	0,07								
194	171,19	0,01	271	-883,06	0,04	195	119,31	0,01	207	-1069,33	0,08								
260	1717,18	0,09	59	-1281,99	0,05	252	424,27	0,04	273	-118,00	0,01								
261	1280,31	0,07	272	-1281,99	0,05	253	365,24	0,03	274	-233,83	0,02								
262	881,98	0,05	129	-1548,93	0,06	254	300,52	0,03	275	-335,67	0,03								
263	533,78	0,03	200	-1548,93	0,06	255	204,90	0,02	276	-467,97	0,04								
264	277,52	0,01	130	-2242,94	0,09	256	134,01	0,01	277	-548,87	0,04								
265	94,59	0,00	201	-2242,94	0,09	266	62,09	0,01	278	-617,86	0,05								
<b>Máximo</b>	<b>0,16</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,09</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,07</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,08</b>									
<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>									
<b>Média</b>	<b>0,06</b>		<b>Média</b>	<b>0,03</b>		<b>Média</b>	<b>0,03</b>		<b>Média</b>	<b>0,04</b>									

Fonte: A Autora (2020).

## PERFIL 2L

Nº Barra	BANZO INFERIOR			BANZO SUPERIOR			MONTANTE			DIAGONAIS				
	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência
42	1570,88	0,48	54	-2,07	0,00	48	65,91	0,01	60	-117,04	0,02	60	-117,04	0,02
43	1177,99	0,36	55	-93,92	0,00	49	386,07	0,07	61	-216,59	0,03	61	-216,59	0,03
44	816,03	0,25	56	-263,57	0,01	50	336,39	0,06	62	-303,75	0,04	62	-303,75	0,04
45	495,17	0,15	57	-495,80	0,03	51	281,46	0,05	63	-431,24	0,06	63	-431,24	0,06
46	263,27	0,08	58	-817,00	0,04	52	189,58	0,03	64	-498,76	0,07	64	-498,76	0,07
47	93,81	0,03	59	-1179,53	0,06	53	128,38	0,02	65	-555,64	0,08	65	-555,64	0,08
118	2900,88	0,89	125	-4,13	0,00	110	714,43	0,13	131	-222,24	0,03	131	-222,24	0,03
119	2179,64	0,67	126	-178,33	0,01	111	625,41	0,11	132	-401,66	0,05	132	-401,66	0,05
120	1512,80	0,46	127	-493,00	0,03	112	526,70	0,09	133	-558,61	0,08	133	-558,61	0,08
121	918,86	0,28	128	-920,09	0,05	113	354,19	0,06	134	-798,30	0,11	134	-798,30	0,11
122	492,37	0,15	129	-1514,69	0,08	114	243,65	0,04	135	-918,86	0,12	135	-918,86	0,12
123	178,13	0,05	130	-2182,59	0,11	124	128,83	0,02	136	-1020,01	0,14	136	-1020,01	0,14
189	2900,88	0,89	196	-4,13	0,00	181	714,43	0,13	202	-222,24	0,03	202	-222,24	0,03
190	2179,64	0,67	197	-178,33	0,01	182	625,41	0,11	203	-401,66	0,05	203	-401,66	0,05
191	1512,80	0,46	198	-493,00	0,03	183	526,70	0,09	204	-558,61	0,08	204	-558,61	0,08
192	918,86	0,28	199	-920,09	0,05	184	354,19	0,06	205	-798,30	0,11	205	-798,30	0,11
193	492,37	0,15	200	-1514,69	0,08	185	243,65	0,04	206	-918,86	0,12	206	-918,86	0,12
194	178,13	0,05	201	-2182,59	0,11	195	128,83	0,02	207	-1020,01	0,14	207	-1020,01	0,14
260	1570,88	0,48	267	-2,07	0,00	252	386,07	0,07	273	-117,04	0,02	273	-117,04	0,02
261	1177,99	0,36	268	-93,92	0,00	253	336,39	0,06	274	-216,59	0,03	274	-216,59	0,03
262	816,03	0,25	269	-263,57	0,01	254	281,46	0,05	275	-303,75	0,04	275	-303,75	0,04
263	495,17	0,15	270	-495,80	0,03	255	189,58	0,03	276	-431,24	0,06	276	-431,24	0,06
264	263,27	0,08	271	-817,00	0,04	256	128,38	0,02	277	-498,76	0,07	277	-498,76	0,07
265	93,81	0,03	272	-1179,53	0,06	266	65,91	0,01	278	-555,64	0,08	278	-555,64	0,08
<b>Máximo</b>	<b>0,89</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,11</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,13</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,14</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,14</b>	
<b>Mínimo</b>	<b>0,03</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,02</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,02</b>	
<b>Média</b>	<b>0,32</b>		<b>Média</b>	<b>0,04</b>		<b>Média</b>	<b>0,06</b>		<b>Média</b>	<b>0,07</b>		<b>Média</b>	<b>0,07</b>	

Fonte: A Autora (2020).

## PERFIL U + 2L

Nº Barra	BANZO INFERIOR			BANZO SUPERIOR			MONTANTE			DIAGONAIS			
	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)
42	1670,40	0,09	54	-2,07	0,00	48	67,04	0,01	60	-122,22	0,02		
43	1250,84	0,07	55	-98,09	0,00	49	409,87	0,07	61	-229,67	0,03		
44	865,38	0,05	56	-278,00	0,01	50	355,86	0,06	62	-323,86	0,04		
45	524,90	0,03	57	-525,62	0,02	51	296,32	0,05	63	-457,60	0,06		
46	277,67	0,02	58	-866,44	0,03	52	199,89	0,04	64	-531,14	0,07		
47	97,97	0,01	59	-1252,51	0,05	53	133,89	0,02	65	-593,35	0,08		
118	3000,12	0,16	125	-4,14	0,00	110	738,17	0,13	131	-227,41	0,03		
119	2252,26	0,12	126	-182,52	0,01	111	644,82	0,12	132	-414,75	0,06		
120	1562,02	0,09	127	-507,38	0,02	112	541,48	0,10	133	-578,67	0,08		
121	948,54	0,05	128	-949,82	0,04	113	364,48	0,06	134	-824,56	0,11		
122	506,79	0,03	129	-1563,93	0,06	114	249,14	0,04	135	-951,14	0,13		
123	182,28	0,01	130	-2255,32	0,09	124	129,93	0,02	136	-1057,64	0,14		
189	3000,12	0,16	196	-4,14	0,00	181	738,17	0,13	202	-227,41	0,03		
190	2252,26	0,12	197	-182,52	0,01	182	644,82	0,12	203	-414,75	0,06		
191	1562,02	0,09	198	-507,38	0,02	183	541,48	0,10	204	-578,67	0,08		
192	948,54	0,05	199	-949,82	0,04	184	364,48	0,06	205	-824,56	0,11		
193	506,79	0,03	200	-1563,93	0,06	185	249,14	0,04	206	-951,14	0,13		
194	182,28	0,01	201	-2255,32	0,09	195	129,93	0,02	207	-1057,64	0,14		
260	1670,40	0,09	267	-2,07	0,00	252	409,87	0,07	273	-122,22	0,02		
261	1250,84	0,07	268	-98,09	0,00	253	355,86	0,06	274	-229,67	0,03		
262	865,38	0,05	269	-278,00	0,01	254	296,32	0,05	275	-323,86	0,04		
263	524,90	0,03	270	-525,62	0,02	255	199,89	0,04	276	-457,60	0,06		
264	277,67	0,02	271	-866,44	0,03	256	133,89	0,02	277	-531,14	0,07		
265	97,97	0,01	272	-1252,52	0,05	266	67,04	0,01	278	-593,35	0,08		
<b>Máximo</b>	<b>0,16</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,09</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,13</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,14</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,14</b>
<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,02</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,02</b>
<b>Média</b>	<b>0,06</b>		<b>Média</b>	<b>0,03</b>		<b>Média</b>	<b>0,06</b>		<b>Média</b>	<b>0,07</b>		<b>Média</b>	<b>0,07</b>

Fonte: A Autora (2020).

### APÊNDICE D – Índice Solicitação/Resistência para carregamento de vento de 40 m/s

PERFIL U														
BANZO INFERIOR				BANZO SUPERIOR				MONTANTE				DIAGONAIS		
Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/Resistência
47	83,67	0,00	54	-2,71	0,00	48	56,37	0,01	60	-104,39	0,01	60	-104,39	0,01
265	83,67	0,00	55	-83,78	0,00	53	123,94	0,01	131	-191,75	0,01	131	-191,75	0,01
46	250,88	0,01	125	-5,45	0,00	124	108,62	0,01	202	-191,75	0,01	202	-191,75	0,01
123	153,69	0,01	196	-5,45	0,00	195	108,62	0,01	273	-104,39	0,01	273	-104,39	0,01
194	153,69	0,01	267	-2,70	0,00	256	123,94	0,01	61	-213,70	0,02	61	-213,70	0,02
264	250,88	0,01	268	-83,78	0,00	266	56,37	0,01	62	-309,43	0,02	62	-309,43	0,02
122	453,22	0,02	56	-251,18	0,01	52	190,56	0,02	274	-213,70	0,02	274	-213,70	0,02
193	453,22	0,02	126	-153,90	0,01	114	229,24	0,02	275	-309,43	0,02	275	-309,43	0,02
45	487,10	0,03	197	-153,90	0,01	185	229,24	0,02	63	-428,63	0,03	63	-428,63	0,03
263	487,10	0,03	269	-251,18	0,01	255	190,56	0,02	132	-382,81	0,03	132	-382,81	0,03
44	806,02	0,04	57	-487,76	0,02	50	337,51	0,03	203	-382,81	0,03	203	-382,81	0,03
262	806,02	0,04	127	-453,75	0,02	51	276,96	0,03	276	-428,63	0,03	276	-428,63	0,03
121	872,94	0,05	198	-453,75	0,02	113	345,85	0,03	64	-504,47	0,04	64	-504,47	0,04
192	872,94	0,05	270	-487,76	0,02	184	345,85	0,03	65	-568,99	0,04	65	-568,99	0,04
43	1172,12	0,06	58	-807,01	0,03	253	337,51	0,03	133	-549,81	0,04	133	-549,81	0,04
261	1172,12	0,06	271	-807,01	0,03	254	276,96	0,03	204	-549,81	0,04	204	-549,81	0,04
120	1443,31	0,08	128	-874,11	0,04	49	392,65	0,04	277	-504,47	0,04	277	-504,47	0,04
191	1443,31	0,08	199	-874,11	0,04	252	392,65	0,04	278	-568,99	0,04	278	-568,99	0,04
42	1574,46	0,09	59	-1173,69	0,05	112	502,79	0,05	134	-766,63	0,06	134	-766,63	0,06
260	1574,46	0,09	272	-1173,69	0,05	183	502,79	0,05	205	-766,63	0,06	205	-766,63	0,06
119	2094,84	0,11	129	-1445,11	0,06	111	608,12	0,06	135	-897,80	0,07	135	-897,80	0,07
190	2094,84	0,11	200	-1445,11	0,06	182	608,12	0,06	206	-897,80	0,07	206	-897,80	0,07
118	2808,25	0,15	130	-2097,69	0,08	110	703,72	0,07	136	-1008,92	0,08	136	-1008,92	0,08
189	2808,25	0,15	201	-2097,69	0,08	181	703,72	0,07	207	-1008,92	0,08	207	-1008,92	0,08
<b>Máximo</b>	<b>0,15</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,08</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,07</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,08</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,08</b>	
<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>	
<b>Média</b>	<b>0,05</b>		<b>Média</b>	<b>0,03</b>		<b>Média</b>	<b>0,03</b>		<b>Média</b>	<b>0,03</b>		<b>Média</b>	<b>0,04</b>	

Fonte: A Autora (2020).



PERFIL 2L												
BANZO INFERIOR				BANZO SUPERIOR				MONTANTE				DIAGONAIS
Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Solicitação/ Resistência
42	1474,94	0,45	54	-2,70	0,00	48	55,24	0,01	60	-99,21	0,01	0,01
43	1099,28	0,34	55	-79,61	0,00	49	368,85	0,07	61	-200,62	0,07	0,03
44	756,67	0,23	56	-236,76	0,01	50	318,04	0,06	62	-289,32	0,06	0,04
45	457,37	0,14	57	-457,95	0,02	51	262,10	0,05	63	-402,28	0,05	0,05
46	236,49	0,07	58	-757,58	0,04	52	180,26	0,03	64	-472,08	0,03	0,06
47	79,52	0,02	59	-1100,71	0,06	53	118,44	0,02	65	-531,28	0,02	0,07
118	2709,01	0,83	125	-5,43	0,00	110	679,98	0,12	131	-186,58	0,12	0,03
119	2022,21	0,62	126	-149,73	0,01	111	588,71	0,11	132	-369,72	0,11	0,05
120	1394,09	0,43	127	-439,36	0,02	112	487,99	0,09	133	360,46	0,09	0,07
121	843,25	0,26	128	-844,39	0,04	113	335,55	0,06	134	-740,36	0,06	0,10
122	438,80	0,13	129	748,30	0,07	114	223,76	0,04	135	566,28	0,04	0,12
123	149,54	0,05	130	1149,31	0,11	124	107,50	0,02	136	674,83	0,02	0,14
189	2709,01	0,83	196	-5,43	0,00	181	679,98	0,12	202	-186,58	0,12	0,03
190	2022,21	0,62	197	-149,73	0,01	182	588,71	0,11	203	-369,72	0,11	0,05
191	1394,09	0,43	198	-439,36	0,02	183	487,99	0,09	204	360,46	0,09	0,07
192	843,25	0,26	199	-844,39	0,04	184	335,55	0,06	205	-740,36	0,06	0,10
193	438,80	0,13	200	748,30	0,07	185	223,76	0,04	206	566,28	0,04	0,12
194	149,54	0,05	201	1149,31	0,11	195	107,50	0,02	207	674,83	0,02	0,14
260	1474,94	0,45	267	-2,70	0,00	252	368,85	0,07	273	-99,21	0,07	0,01
261	1099,28	0,34	268	-79,61	0,00	253	318,04	0,06	274	-200,62	0,06	0,03
262	756,67	0,23	269	-236,76	0,01	254	262,10	0,05	275	-289,32	0,05	0,04
263	457,37	0,14	270	-457,95	0,02	255	180,26	0,03	276	-402,28	0,03	0,05
264	236,49	0,07	271	-757,57	0,04	256	118,44	0,02	277	-472,08	0,02	0,06
265	79,52	0,02	272	-1100,71	0,06	266	55,24	0,01	278	-531,28	0,01	0,07
<b>Máximo</b>	<b>0,83</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,11</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,12</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,14</b>		
<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		
<b>Média</b>	<b>0,30</b>		<b>Média</b>	<b>0,03</b>		<b>Média</b>	<b>0,06</b>		<b>Média</b>	<b>0,06</b>		

Fonte: A Autora (2020).

PERFIL U + 2L														
BANZO INFERIOR				BANZO SUPERIOR				MONTANTE				DIAGONAIS		
Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência	Nº Barra	Solicitação (kgf)	Solicitação/ Resistência
47	81,25	0,00	54	-2,71	0,00	48	55,89	0,01	60	-101,36	0,01	60	-101,36	0,01
265	81,25	0,00	55	-81,35	0,00	266	55,89	0,01	273	-101,36	0,01	273	-101,36	0,01
46	243,04	0,01	125	-5,39	0,00	53	120,96	0,02	61	-206,78	0,03	61	-206,78	0,03
123	151,30	0,01	196	-5,39	0,00	124	108,13	0,02	131	-188,74	0,03	131	-188,74	0,03
194	151,30	0,01	267	-2,71	0,00	195	108,13	0,02	202	-188,74	0,03	202	-188,74	0,03
264	243,04	0,01	268	-81,35	0,00	256	120,96	0,02	274	-206,78	0,03	274	-206,78	0,03
122	445,43	0,02	56	-243,31	0,01	52	185,17	0,03	62	-298,95	0,04	62	-298,95	0,04
193	445,43	0,02	126	-151,48	0,01	255	185,17	0,03	275	-298,95	0,04	275	-298,95	0,04
45	471,27	0,03	197	-151,48	0,01	114	226,30	0,04	132	-375,92	0,05	132	-375,92	0,05
263	471,27	0,03	269	-243,31	0,01	185	226,30	0,04	203	-375,92	0,05	203	-375,92	0,05
44	779,98	0,04	57	-471,87	0,02	51	269,23	0,05	63	-414,90	0,06	63	-414,90	0,06
262	779,98	0,04	127	-445,91	0,02	254	269,23	0,05	276	-414,90	0,06	276	-414,90	0,06
121	857,28	0,05	198	-445,91	0,02	50	327,34	0,06	64	-487,50	0,07	64	-487,50	0,07
192	857,28	0,05	270	-471,87	0,02	113	340,49	0,06	65	-549,09	0,07	65	-549,09	0,07
43	1133,79	0,06	58	-780,88	0,03	184	340,49	0,06	133	-539,43	0,07	133	-539,43	0,07
261	1133,79	0,06	128	-858,30	0,03	253	327,34	0,06	204	-539,43	0,07	204	-539,43	0,07
42	1522,04	0,08	199	-858,30	0,03	49	380,13	0,07	277	-487,50	0,07	277	-487,50	0,07
120	1417,55	0,08	271	-780,88	0,03	252	380,13	0,07	278	-549,09	0,07	278	-549,09	0,07
191	1417,55	0,08	59	-1135,23	0,05	112	495,15	0,09	134	-753,03	0,10	134	-753,03	0,10
260	1522,04	0,08	272	-1135,23	0,05	183	495,15	0,09	205	-753,03	0,10	205	-753,03	0,10
119	2056,88	0,11	129	-1419,18	0,06	111	598,04	0,11	135	-880,95	0,12	135	-880,95	0,12
190	2056,88	0,11	200	-1419,18	0,06	182	598,04	0,11	206	-880,95	0,12	206	-880,95	0,12
118	2756,25	0,15	130	-2059,50	0,08	110	691,28	0,13	207	662,17	0,14	207	662,17	0,14
189	2756,25	0,15	201	-2059,50	0,08	181	691,28	0,13	136	662,17	0,14	136	662,17	0,14
<b>Máximo</b>	<b>0,15</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,08</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,13</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,14</b>		<b>Máximo</b>	<b>0,14</b>	
<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,00</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>		<b>Mínimo</b>	<b>0,01</b>	
<b>Média</b>	<b>0,05</b>		<b>Média</b>	<b>0,03</b>		<b>Média</b>	<b>0,06</b>		<b>Média</b>	<b>0,07</b>		<b>Média</b>	<b>0,07</b>	

Fonte: A Autora (2020).



**APÊNDICE F – Deformações nodais para carregamento de vento de 35 m/s**

PERFIL U	COMB 1	COMB 2	COMB 3	COMB 4	COMB 5	PERFIL 2L	COMB 1	COMB 2	COMB 3	COMB 4	COMB 5	PERFIL U + 2L	COMB 1	COMB 2	COMB 3	COMB 4	COMB 5	
22	X	-2,85	-2,63	1,98	2,42	-1,20	X	-2,68	-2,46	2,14	2,58	-1,04	X	-2,76	-2,54	2,07	2,50	-1,12
	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z	0,22	0,17	-0,13	-0,16	0,10	Z	0,21	0,16	-0,15	-0,17	0,09	Z	0,21	0,16	-0,14	-0,17	0,09
29	X	-2,69	-2,53	1,92	2,34	-1,12	X	-2,54	-2,37	2,07	2,50	-0,96	X	-2,60	-2,44	2,00	2,43	-1,03
	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z	-5,37	-2,54	0,89	0,95	-3,34	Z	-5,33	-2,27	1,15	1,19	-3,24	Z	-5,32	-2,40	1,03	1,08	-3,27
35	X	-4,89	-4,53	4,36	2,21	-1,71	X	-4,70	-4,38	4,51	2,37	-1,56	X	-4,76	-4,45	4,44	2,30	-1,62
	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z	-9,68	-4,03	2,82	-0,19	-5,64	Z	-9,88	-3,76	3,09	-0,03	-5,69	Z	-9,73	-3,88	2,97	-0,08	-5,62
38	X	-5,17	-4,70	4,52	2,27	-1,85	X	-4,97	-4,53	4,68	2,43	-1,68	X	-5,05	-4,61	4,60	2,35	-1,76
	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z	0,40	0,30	-0,30	-0,14	0,16	Z	0,39	0,29	-0,32	-0,15	0,15	Z	0,39	0,30	-0,31	-0,15	0,16
69	X	-4,86	-4,53	4,36	-1,71	1,69	X	-4,70	-4,38	4,51	-1,56	1,75	X	-4,76	-4,45	4,44	-1,62	1,68
	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z	-9,68	-4,03	2,82	-5,64	-1,47	Z	-9,88	-3,76	3,09	-5,69	-1,39	Z	-9,73	-3,88	2,97	-5,62	-1,40
72	X	-5,14	-4,70	4,52	-1,85	1,61	X	-4,97	-4,53	4,68	-1,68	1,77	X	-5,05	-4,61	4,60	-1,76	1,70
	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z	0,40	0,30	-0,30	0,16	-0,80	Z	0,39	0,29	-0,32	0,15	-0,10	Z	0,39	0,30	-0,31	0,16	-0,09
103	X	-2,69	-2,53	1,92	-1,12	2,34	X	-2,54	-2,37	2,07	-0,96	2,50	X	-2,60	-2,44	2,00	-1,03	2,43
	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z	-5,37	-2,54	0,89	-3,34	0,95	Z	-5,33	-2,27	1,15	-3,24	1,19	Z	-5,32	-2,40	1,03	-3,27	1,08
106	X	-2,85	-2,63	1,98	-1,20	2,42	X	-2,68	-2,46	2,14	-1,04	2,58	X	-2,76	-2,54	2,07	-1,12	2,50
	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z	0,22	0,17	-0,13	0,10	-0,16	Z	0,21	0,16	-0,15	0,09	-0,17	Z	0,21	0,16	-0,14	0,09	0,14

Fonte: A Autora (2020).

**APÊNDICE G – Deformações nodais para carregamento de vento de 40 m/s**

C	COMB 1	COMB 2	COMB 3	COMB 4	COMB 5	2L		COMB 1	COMB 2	COMB 3	COMB 4	COMB 5	C 2L	COMB 1	COMB 2	COMB 3	COMB 4	COMB 5
						X	Y											
22	X	-2,71	-2,42	3,60	4,17	-0,66	X	-2,54	-2,26	3,76	4,34	-0,39	X	-2,62	-2,33	3,68	4,26	-0,47
	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z	0,21	0,15	-0,25	-0,28	0,05	Z	0,20	0,13	-0,26	-0,30	0,04	Z	0,20	0,14	-0,26	-0,29	0,05
29	X	-2,56	-2,35	3,46	4,02	-0,51	X	-2,40	-2,19	3,61	4,17	-0,04	X	-2,47	-2,26	3,54	4,10	-0,42
	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z	-5,08	-1,39	3,08	3,16	-2,44	Z	-5,03	-0,04	3,44	3,49	-2,30	Z	-5,03	-1,21	3,26	3,33	-2,35
35	X	-4,59	-4,71	7,45	4,64	-0,48	X	-4,44	-4,01	7,60	4,80	-0,33	X	-4,77	-4,09	7,52	4,73	-0,40
	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z	-9,12	-1,74	7,21	3,29	-3,83	Z	-9,28	-1,29	7,67	3,59	-3,81	Z	0,37	-1,52	7,44	3,45	-3,79
38	X	-4,86	-4,28	7,75	4,81	-0,56	X	-4,69	-4,12	7,92	4,98	-0,40	X	-4,77	-4,20	7,84	4,90	-0,47
	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z	0,38	0,25	-0,54	-0,32	0,07	Z	0,37	0,24	-0,55	-0,34	0,06	Z	0,37	0,25	-0,55	-0,33	0,06
69	X	-4,59	-4,17	7,45	-0,48	3,83	X	-4,44	-4,01	7,60	-0,33	3,99	X	-4,50	-4,09	7,52	-0,40	3,92
	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z	-9,12	-1,74	7,21	-3,83	1,61	Z	-9,28	-1,29	7,67	-3,81	1,81	Z	-9,15	-1,52	7,44	-3,79	1,73
72	X	-4,86	-4,29	7,75	-0,56	3,95	X	-4,69	-4,12	7,92	-0,40	4,12	X	-4,77	-4,20	7,84	-0,47	4,04
	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z	0,38	0,25	-0,54	0,07	-0,25	Z	0,37	0,24	-0,55	0,06	-0,27	Z	0,37	0,25	-0,55	0,06	-0,26
103	X	-2,56	-2,35	3,46	-0,51	4,02	X	-2,40	-2,19	3,61	-0,35	4,17	X	-2,47	-2,26	3,54	-0,42	4,10
	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	103	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z	-5,08	-1,39	3,08	-2,44	3,16	Z	-5,03	-1,04	3,44	-2,30	3,49	Z	-5,03	-1,21	3,26	-2,35	3,33
106	X	-2,71	-2,42	3,60	-0,56	4,17	X	-2,54	-2,26	3,76	-0,39	4,34	X	-2,62	-2,33	3,68	-0,47	4,26
	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	106	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z	0,21	0,15	-0,25	0,05	-0,28	Z	0,20	0,13	-0,26	0,04	-0,30	Z	0,20	0,14	-0,26	0,05	-0,29

Fonte: A Autora (2020).