



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JUDAH FONSÊCA PEREIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS COM MADEIRA,
AÇO LAMINADO E AÇO CONFORMADO A FRIO EM TELHADOS DE
EDIFICAÇÕES**

São Luís
2019

JUDAH FONSÊCA PEREIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS COM MADEIRA,
AÇO LAMINADO E AÇO CONFORMADO A FRIO EM TELHADOS DE
EDIFICAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Clodoaldo Cesar Malheiros Ferreira

São Luís

2019

JUDAH FONSÊCA PEREIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS COM MADEIRA,
AÇO LAMINADO E AÇO CONFORMADO A FRIO EM TELHADOS DE
EDIFICAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Clodoaldo Cesar Malheiros Ferreira (Orientador)
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Dr. Iêdo Alves de Souza
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Esp. Fabiano Petrucci de Sousa Ferreira
Universidade Estadual do Maranhão

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por dar a oportunidade de realizar mais uma conquista.

Aos meus pais, Luis Fernando Pereira e Elis Regina Fonsêca Pereira, por todo amor, carinho e apoio nessa jornada.

Ao meu orientador, Clodoaldo Cesar Malheiros Ferreira, pela ajuda na pesquisa e elaboração do projeto.

Aos professores da Universidade Estadual do Maranhão, pelo conhecimento passado ao longo do curso.

Aos colegas de curso de Engenharia Civil da UEMA, pela amizade e momentos compartilhados durante esses anos.

RESUMO

O presente trabalho faz uma análise comparativa entre a utilização de três materiais diferentes, madeira, aço laminado e aço dobrado a frio, para a estrutura de coberturas de edificações. A comparação dos materiais é feita para três vãos diferentes, 8 metros, 15 metros e 20 metros. Após uma caracterização básica dos materiais utilizados, é feito o dimensionamento dos elementos da estrutura, composta por terças e treliças, de acordo com os esforços obtidos através do software Ftool. Esses esforços são obtidos considerando as cargas de telhado, ripas, caibros, terças e da própria treliça, além das cargas de vento, que são calculadas pelo software VisualVentos. O dimensionamento dos sistemas estruturais é feito através de programas específicos para cada material, sendo os softwares Jwood, VisualMetal e DimPerfil, utilizados para as estruturas de madeira, aço laminado e aço dobrado a frio, respectivamente. Após essa etapa, calculou-se a quantidade de material para todos os vãos considerados, e com a utilização de valores de preço por peça de tabelas da SINAPI e de fabricantes, realizou-se a estimativa de preço de material para cada estrutura, fazendo uma comparação entre elas. Foi encontrado que o aço laminado é o mais caro para todos os três vãos, enquanto a madeira é a mais barata para os vãos de 8 metros e 20 metros, assim como o aço dobrado o mais barato para o vão de 15 metros.

Palavras-chave: Análise comparativa. Madeira. Aço laminado. Aço dobrado a frio. Treliça de cobertura.

ABSTRACT

The present work makes a comparative analysis between the use of three different materials, wood, rolled steel and cold bent steel, for the roof structure of buildings. The comparison of materials is made for three different spans, 8 meters, 15 meters and 20 meters. After a basic characterization of the materials used, the elements of the structure are made, consisting of purlins and trusses, according to the efforts obtained through the Ftool software. These efforts are obtained by considering the roof, lath, rafter, third and trellis loads, as well as the wind loads, which are calculated by VisualVentos software. Structural systems are dimensioned through specific programs for each material, with Jwood, VisualMetal and DimPerfil software used for wood, cold rolled and cold bent steel structures, respectively. After this step, the material quantity was calculated for all spans considered, and using SINAPI and manufacturer tables price per piece values, the material price was estimated for each structure, making a comparison between them. Rolled steel has been found to be the most expensive for all three spans, while wood is the cheapest for 8-meter and 20-meter spans, as well as the cheapest bent steel for the 15-meter span.

Keywords: Comparative analysis. Wood. Laminated steel. Cold bent steel. Covering truss.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 Justificativa | 14 |
| 1.2 Objetivos | 15 |
| 1.2.1 Objetivo geral | 15 |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | 15 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 Sistema estrutural | 16 |
| 2.2 Materiais | 18 |
| 2.2.1 Madeira | 18 |
| 2.2.2 Aço laminado..... | 19 |
| 2.2.3 Aço conformado a frio | 20 |
| 2.3 Ações na estrutura | 22 |
| 2.3.1 Ações permanentes..... | 22 |
| 2.3.2 Ações variáveis | 23 |
| 2.3.3 Ações excepcionais..... | 23 |
| 2.3.4 Ações do vento..... | 23 |
| 2.3.4.1 Pressão dinâmica | 24 |
| 2.3.4.2 Coeficiente de pressão C_{pe} e de forma C_e externos | 28 |
| 2.3.4.3 Coeficiente de pressão interna C_{pi} | 28 |
| 2.3.4.4 Ações estáticas do vento..... | 28 |
| 2.3.5 Combinações das ações | 29 |
| 2.4 Dimensionamento dos elementos da estrutura | 31 |
| 2.4.1 Aço laminado..... | 32 |
| 2.4.1.1 Barras tracionadas | 32 |
| 2.4.1.2 Barras comprimidas..... | 33 |
| 2.4.1.3 Barras submetidas a momento fletor e força cortante | 35 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4.1.4 Barras submetidas à combinação de esforços solicitantes | 36 |
| 2.4.2 Aço conformado a frio | 37 |
| 2.4.2.1 Barras tracionadas | 37 |
| 2.4.2.2 Barras comprimidas..... | 37 |
| 2.4.2.3 Barras submetidas à flexão simples | 39 |
| 2.4.2.4 Barras submetidas à flexão composta..... | 39 |
| 2.4.3 Madeira | 40 |
| 2.4.3.1 Barras tracionadas | 40 |
| 2.4.3.2 Barras comprimidas..... | 41 |
| 2.4.3.3 Barras submetidas à flexão simples reta..... | 42 |
| 2.4.3.4 Barras submetidas à flexão simples oblíqua | 43 |
| 2.4.3.5 Barras submetidas à cisalhamento | 44 |
| 3 METODOLOGIA | 45 |
| 4 DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS..... | 46 |
| 4.1 Vão de 8m Madeira | 46 |
| 4.1.1 Caracterização do edifício | 46 |
| 4.1.2 Materiais..... | 46 |
| 4.1.3 Sistema estrutural | 47 |
| 4.1.4 Ações na estrutura | 47 |
| 4.1.4.1 Carga permanente | 47 |
| 4.1.4.2 Carga Acidental | 48 |
| 4.1.4.3 Carga de vento | 49 |
| 4.1.4.4 Combinações das ações | 49 |
| 4.1.5 Dimensionamento dos elementos | 49 |
| 4.1.5.1 Terça | 50 |
| 4.1.5.2 Treliça..... | 52 |
| 4.2 Vão de 8m Aço Laminado..... | 58 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2.1 Caracterização do edifício | 58 |
| 4.2.2 Materiais..... | 58 |
| 4.2.3 Sistema estrutural | 59 |
| 4.2.4 Ações na estrutura | 59 |
| 4.2.4.1 Cargas permanentes..... | 59 |
| 4.2.4.2 Carga acidental | 60 |
| 4.2.4.3 Carga de vento..... | 60 |
| 4.2.4.4 Combinações das ações | 60 |
| 4.2.5 Dimensionamento dos elementos | 60 |
| 4.2.5.1 Terça | 61 |
| 4.2.5.2 Treliça..... | 62 |
| 4.3 Vão de 8m Aço Dobrado | 65 |
| 4.3.2 Materiais..... | 65 |
| 4.3.3 Sistema estrutural | 65 |
| 4.3.4 Ações na estrutura | 66 |
| 4.3.4.1 Cargas permanentes..... | 66 |
| 4.3.4.2 Carga acidental | 66 |
| 4.3.4.3 Carga de vento..... | 66 |
| 4.3.4.4 Combinações das ações | 66 |
| 4.3.5 Dimensionamento dos elementos | 67 |
| 4.3.5.1 Terça | 67 |
| 4.3.5.2 Treliça..... | 69 |
| 4.4 Vão de 15m Madeira | 73 |
| 4.4.1 Caracterização do edifício | 73 |
| 4.4.2 Materiais..... | 74 |
| 4.4.3 Sistema estrutural | 74 |
| 4.4.4 Ações na estrutura | 74 |

| | |
|---|-----------|
| 4.4.4.1 Carga permanente | 74 |
| 4.4.4.2 Carga Acidental | 75 |
| 4.4.4.3 Carga de vento | 75 |
| 4.4.4.4 Combinações das ações | 79 |
| 4.4.5 Dimensionamento dos elementos | 79 |
| 4.4.5.1 Terça | 79 |
| 4.4.5.2 Treliça..... | 80 |
| 4.5 Vão de 15 m Aço Laminado..... | 82 |
| 4.5.1 Caracterização do edifício | 82 |
| 4.5.2 Materiais..... | 82 |
| 4.5.3 Sistema estrutural | 83 |
| 4.5.4 Ações na estrutura | 83 |
| 4.5.4.1 Carga permanente | 83 |
| 4.5.4.2 Carga acidental | 83 |
| 4.5.4.3 Carga de vento..... | 84 |
| 4.5.4.4 Combinações das ações | 84 |
| 4.5.5 Dimensionamento dos elementos | 84 |
| 4.5.5.1 Terça | 84 |
| 4.5.5.2 Treliça..... | 85 |
| 4.6 Vão de 15 m Aço Dobrado | 87 |
| 4.6.1 Caracterização do edifício | 87 |
| 4.6.2 Materiais..... | 87 |
| 4.6.3 Sistema estrutural | 87 |
| 4.6.4 Ações na estrutura | 88 |
| 4.6.4.1 Carga permanente | 88 |
| 4.6.4.2 Carga acidental | 88 |
| 4.6.4.3 Carga de vento..... | 88 |

| | | |
|------------|--------------------------------------|------------|
| 4.6.4.4 | Combinções das ações | 88 |
| 4.6.5 | Dimensionamento dos elementos | 89 |
| 4.6.5.1 | Terça | 89 |
| 4.6.5.2 | Treliça..... | 90 |
| 4.7 | Vão de 20 m Madeira | 92 |
| 4.7.1 | Caracterização do edifício | 92 |
| 4.7.2 | Materiais..... | 92 |
| 4.7.3 | Sistema estrutural | 92 |
| 4.7.4 | Ações na estrutura | 93 |
| 4.7.4.1 | Carga permanente | 93 |
| 4.7.4.2 | Carga Acidental | 94 |
| 4.7.4.3 | Carga de vento..... | 94 |
| 4.7.4.4 | Combinções das ações | 96 |
| 4.7.5 | Dimensionamento dos elementos | 97 |
| 4.7.5.1 | Terça | 97 |
| 4.7.5.2 | Treliça..... | 98 |
| 4.8 | Vão de 20 m Aço Laminado..... | 100 |
| 4.8.1 | Caracterização do edifício | 100 |
| 4.8.2 | Materiais..... | 100 |
| 4.8.3 | Sistema estrutural | 100 |
| 4.8.4 | Ações na estrutura | 101 |
| 4.8.4.1 | Carga permanente | 101 |
| 4.8.4.2 | Carga Acidental | 101 |
| 4.8.4.3 | Carga de vento..... | 101 |
| 4.8.4.4 | Combinções das ações | 102 |
| 4.8.5 | Dimensionamento dos elementos | 102 |
| 4.8.5.1 | Terça | 102 |

| | |
|---|------------|
| 4.8.5.2 Trelça..... | 103 |
| 4.9 Vão de 20 m Aço Dobrado | 105 |
| 4.9.1 Caracterização do edifício | 105 |
| 4.9.2 Materiais..... | 105 |
| 4.9.3 Sistema estrutural | 105 |
| 4.9.4 Ações na estrutura | 105 |
| 4.9.4.1 Carga permanente | 105 |
| 4.9.4.2 Carga acidental | 106 |
| 4.9.4.3 Carga de vento..... | 106 |
| 4.9.4.4 Combinações das ações | 106 |
| 4.9.5 Dimensionamento dos elementos | 106 |
| 4.9.5.1 Terça | 106 |
| 4.9.5.2 Trelça..... | 107 |
| 5 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MATERIAIS | 110 |
| 5.1 Vão de 8 m | 110 |
| 5.2 Vão de 15 m | 113 |
| 5.3 Vão de 20 m | 116 |
| 5.4 Resumo de materiais | 119 |
| 6 CONCLUSÃO | 121 |
| REFERÊNCIAS..... | 122 |

1 INTRODUÇÃO

O termo telhado é utilizado para designar o componente utilizado na construção civil que realiza a cobertura de uma casa, prédio ou outra edificação. Segundo Moliterno (2010) “O telhado destina-se a proteger o edifício contra a ação de intempéries, tais como chuva, vento, raios solares, neve e também impedir a penetração de poeiras e ruídos no seu interior”. Sua superfície pode ser formada por um ou mais planos (uma água, duas águas ou múltiplas águas) ou por uma ou mais superfícies curvas (arco, cúpula ou arcos múltiplos).

O telhado é constituído de duas partes principais: cobertura e armação. A cobertura pode ser de telhas cerâmicas, chapas onduladas de fibrocimento, madeira aluminizada, PVC, entre outros, desde que impermeável às águas pluviais e resistente à ação do vento e intempéries. Já a armação, responsável por sustentar a cobertura, além de receber e distribuir apropriadamente as cargas do telhado ao restante do edifício, é formada por ripas, caibros, terças, tesouras e contraventamentos. No caso da cobertura ser formada por peças de maiores dimensões que a cobertura convencional de telhas cerâmicas, como por exemplo as chapas de fibrocimento, ela poderá se apoiar diretamente sobre as terças, dispensando assim o uso das ripas e dos caibros.

Geralmente, a estrutura da armação de um telhado é composta parcialmente ou totalmente por aço, madeira, alumínio ou concreto armado. E até um mesmo material pode prover uma estrutura de características diferentes devido às categorias distintas que possui, como por exemplo, a madeira, que pode ser serrada ou laminada colada, ou o concreto armado que pode ser moldado *in loco* ou pré moldado.

Além disso, o aço possui peças que diferem entre si na maneira de formação utilizada, o que gera perfis diferentes tanto em propriedade quanto em forma, como o laminado a quente, o conformado a frio e o soldado.

Posteriormente, O CENTRO TECNOLÓGICO DA CERÂMICA E DO VIDRO (1998) enfatiza a concepção de soluções estruturais para telhados:

“As atuais soluções estruturais para coberturas inclinadas [...] dependem dos materiais usados e do tipo de estrutura do edifício, mas refletem sempre, em termos de concepção, a herança das estruturas de madeira com grelhas sucessivas sobrepostas”. (CENTRO TECNOLÓGICO DA CERÂMICA E DO VIDRO, 1998, p. 75)

O presente trabalho se propõe a analisar o dimensionamento dos elementos de um telhado de duas águas para uma edificação residencial, para três soluções estruturais distintas em tesoura, realizando um comparativo de estimativa de preço entre elas, além de suas vantagens e desvantagens.

1.1 Justificativa

Geralmente os telhados de edificações residenciais no Brasil são formados por estruturas descontínuas de madeira serrada. Seja pela economia de tempo e/ou dinheiro proveniente da inexistência de projeto adequado, geralmente feito pelo profissional que monta a cobertura, seja pelo maior conhecimento popular, ou, seja pela flexibilidade perante modificações a serem realizadas no canteiro de obras, a aceitação desse tipo de estrutura ainda é a mais alta. No entanto, em inúmeras situações outros materiais e outras soluções estruturais apresentam características adequadas e até melhores que a madeira para cumprir a função de suporte das telhas.

As estruturas em aço, por exemplo, são particularmente adequadas para projetos de galpões, aplicados no comércio e na indústria em edificações como: fábricas, oficinas, depósitos, lojas, academias, ginásios cobertos, garagens. A utilização dessas estruturas se dá pela capacidade de vencer grandes vãos com pouco consumo de material, e principalmente por ser um tipo de construção limpa, e com rapidez na execução, reduzindo custos também com mão de obra. Dito isso, por que, apesar dessas vantagens os sistemas estruturais em aço são pouco utilizados em telhados de edificações residenciais?

A comparação entre sistemas estruturais pode ser feita com base em fatores estéticos, comerciais, de cumprimento de prazos de execução, entre outros. Entretanto, o aspecto que geralmente exerce maior influência na escolha de um sistema estrutural é a taxa de consumo de material da estrutura, que influencia diretamente no custo da obra. Diferentes tipos de perfis em aço, como os laminados

e os conformados a frio, apresentam diferentes taxas de consumo de aço para um mesmo projeto, o que pode influenciar diretamente no custo final da obra

Portanto, para cada tipo de projeto, devem-se conhecer as características dos materiais e os diversos tipos de perfis utilizados e sua taxa de consumo, de forma a poder empregar a solução estrutural mais adequada para a cobertura. Tendo isto em vista, este trabalho visa responder à pergunta feita através do estudo de diferentes configurações para um mesmo sistema estrutural, apontando a mais eficiente estruturalmente, que atenda aos requisitos de segurança com economia de material.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar comparativamente três soluções em tesoura (estrutura descontínua) para três vãos diferentes, de 8 metros, 15 metros e 20 metros, para o telhado de uma edificação residencial de duas águas, a primeira composta por madeira serrada, a segunda constituída de aço com perfil laminado, e a terceira formada por aço com perfil de chapa dobrada (perfil conformado a frio).

1.2.2 Objetivos específicos

- Dimensionar os elementos estruturais do telhado, incluindo suas treliças e terças;
- Apresentar as características desses diferentes modelos de estruturas para telhado e algumas das vantagens e desvantagens de cada um deles;
- Verificar o volume de aço e madeira para as três soluções estruturais;
- Comparar a viabilidade de uso de cada material, através de uma estimativa de preço.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo mostra a fundamentação teórica para a compreensão dos procedimentos necessários para concepção do projeto de um telhado de duas águas de uma edificação com materiais diferentes formando sua estrutura, e para diferentes vãos, com a definição do sistema estrutural utilizado, as principais propriedades de cada material, e critérios de carregamento e dimensionamento dos elementos estruturais, segundo as normas brasileiras vigentes.

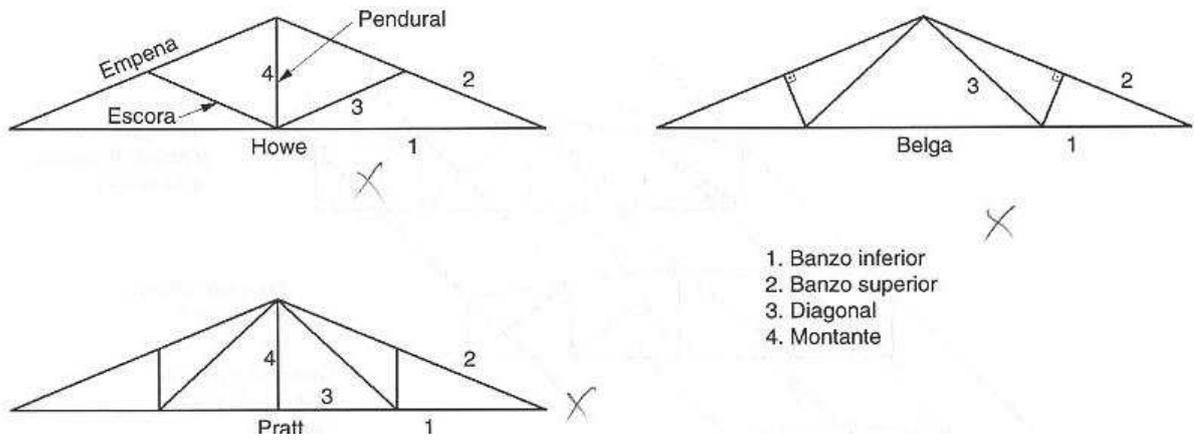
2.1 Sistema estrutural

A definição do sistema estrutural é uma das etapas iniciais do projeto, e uma escolha adequada apresenta benefícios para a obra obra como um todo, desde facilidade de fabricação e montagem, menor peso da estrutura, além de menor custo.

De acordo com Pfeil e Pfeil (2003, p.15) “Talvez o sistema estrutural mais tradicional seja o sistema treliçado utilizado em coberturas tanto residencial quanto industriais e em pontes. Provavelmente, isso acontece porque a estrutura treliçada permite que se explore melhor todo o potencial de um material (CALIL JR. E MOLINA, 2010).

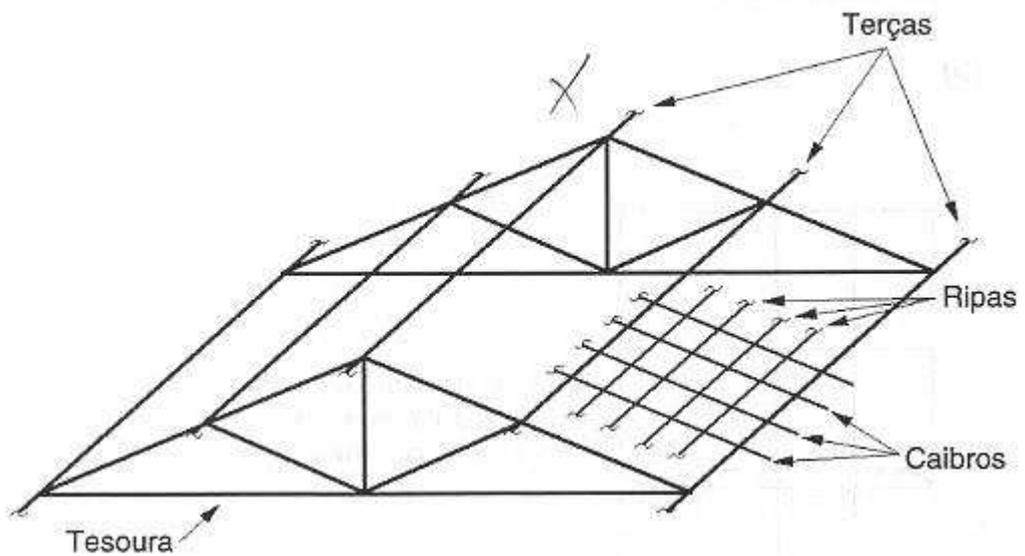
Essa estrutura de apoio, no caso de telhados, se chama tesoura, e é uma treliça plana triangular, formada por barras ligadas entre si por nós rotulados (articulações), logo, as barras trabalham apenas a esforços axiais de tração ou compressão. A função da tesoura é transmitir as cargas das telhas, caibros, ripas e terças para o restante da edificação de modo eficiente e econômico. Existem diversos formatos de tesouras, com diversos arranjos geométricos. A figura 1 mostra alguns dos tipos de tesoura mais utilizados para estruturas de madeira e de aço. A seguir, a figura 2 mostra uma tesoura com os elementos de sustentação das telhas. Complementando a isso, a figura 3 mostra os sistemas de contraventamentos utilizados em treliças.

Figura 1 - Treliças para telhado e nomenclatura de seus elementos



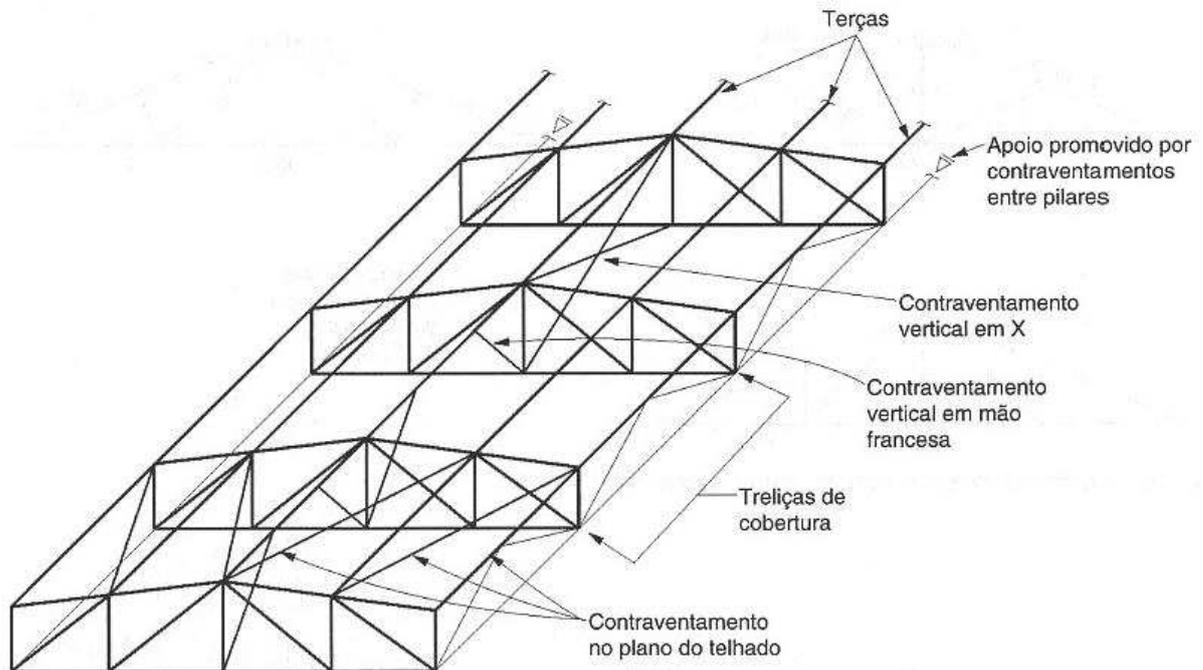
Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

Figura 2 - Treliças para telhado e nomenclatura de seus elementos



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

Figura 3 - Sistemas de contraventamento de treliças



Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

2.2 Materiais

2.2.1 Madeira

A madeira é, possivelmente, o mais antigo material de construção devido a sua disponibilidade na natureza e sua relativa facilidade de manuseio. É obtida de troncos de árvores e se divide em duas principais categorias: as madeiras duras, proveniente de árvores frondosas (dicotiledôneas); e as madeiras macias, provenientes em geral das árvores coníferas. Elas não se distinguem propriamente pela resistência e sim pela estrutura celular dos troncos.

Dos diversos tipos de madeira de construção existentes, destacam-se três tipos: a madeira serrada, a mais comum entre todas, obtida do corte do tronco em serraria, em dimensões padronizadas para o comércio; a madeira compensada, a mais antiga entre todas, formada pela colagem de lâminas finas; e a madeira laminada e colada, muito utilizada na Europa e América do Norte, obtida através do corte em lâminas de determinada madeira, e depois estas são coladas sob pressão.

No caso de estruturas de telhado, geralmente os elementos são de seção retangular, devido ao melhor encaixe entre si e entre eles e as telhas.

De acordo com a NBR 7190:1997, para a total caracterização da madeira para utilização em estruturas, devem ser determinadas as seguintes propriedades, obtidas através de ensaios e que variam para cada espécie de madeira:

- a) Resistência à compressão paralela às fibras, f_{ck} e resistência à compressão normal às fibras, $f_{ck,90}$
- b) Resistência à tração paralela às fibras, f_{tk} e resistência à tração normal às fibras, $f_{tk,90}$.

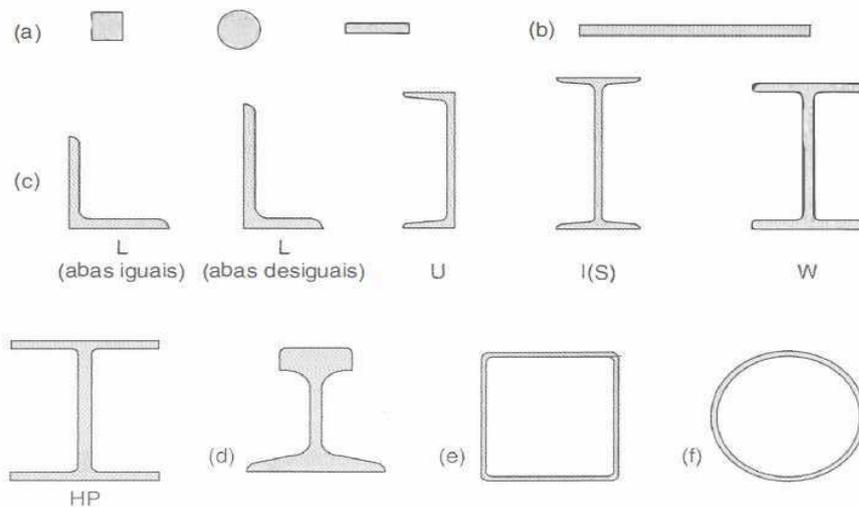
Observação: Considera-se como nula a resistência à tração normal às fibras da madeira, para efeito de projeto estrutural.

- c) Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, f_{vk} .
- d) Resistência ao embutimento paralelo às fibras, f_e .
- e) Densidade básica, ρ_{bas} , que é definida pela razão entre massa seca e o volume saturado, e densidade aparente, $\rho_{aparente}$, calculada com a massa do corpo de prova a 12%.
- f) Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, E_c , e módulo de elasticidade na compressão normal às fibras, E_{cn} .

2.2.2 Aço laminado

O aço laminado é produto da laminação a quente, e por ser proveniente diretamente da usina siderúrgica, dispensa uma fabricação mais “artesanal” a qual passa o aço conformado a frio. É fornecido sob a forma de perfis, barras e chapas. Existem perfis de diversos formatos, sendo a seção em I ou H mais comum, oferecido em alturas que variam entre 150 e 610 mm de altura. A figura a seguir mostra os principais produtos do aço laminado para construção civil.

Figura 4 – Principais produtos do aço laminado para utilização estrutural: (a) barras com diferentes seções transversais, (b) chapas, (c) perfis laminados, (d) trilhos, (e) tubo quadrado, (f) tubo redondo



Fonte: Pfeil e Pfeil (2010).

De acordo com a NBR 8800:2008, para efeitos de cálculo, para os aços laminados mencionados anteriormente, adota-se os seguintes valores de propriedades mecânicas:

- Módulo de elasticidade, $E = 200000 \text{ MPa}$;
- Coeficiente de Poisson, $\nu_a = 0,3$;
- Módulo de elasticidade transversal, $G = 77000 \text{ MPa}$;
- Coeficiente de dilatação térmica, $\beta_a = 1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- Massa específica, $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$.

Além disso, o aço deve ter resistência ao escoamento máxima de 450 MPa e a razão entre a resistência a ruptura (f_u) e a resistência ao escoamento (f_y) não deve ser superior a 1,18.

2.2.3 Aço conformado a frio

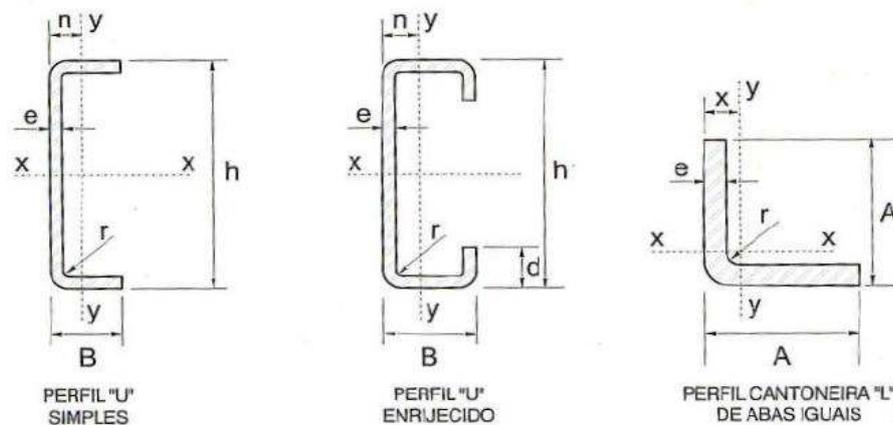
O perfil formado ou dobrado a frio é o perfil obtido por conformação a frio de produtos planos, como chapas e tiras (Dias, 2002). Sua formação é regularizada

pela NBR 6355:2003. Os produtos podem ser dobrados tanto por perfiladeiras quanto por dobradeiras.

As dobradeiras produzem peças com comprimento que varia de 3 a 6 metros e de espessura de até 12,5 milímetros. Já as perfiladeiras produzem perfis de qualquer comprimento, no entanto, perfis mais leves, por serem utilizadas chapas mais finas, geralmente com espessura máxima de 3 milímetros e com dimensões máximas dos perfis de 50 x 150 x 50 mm, para perfis enrijecidos.

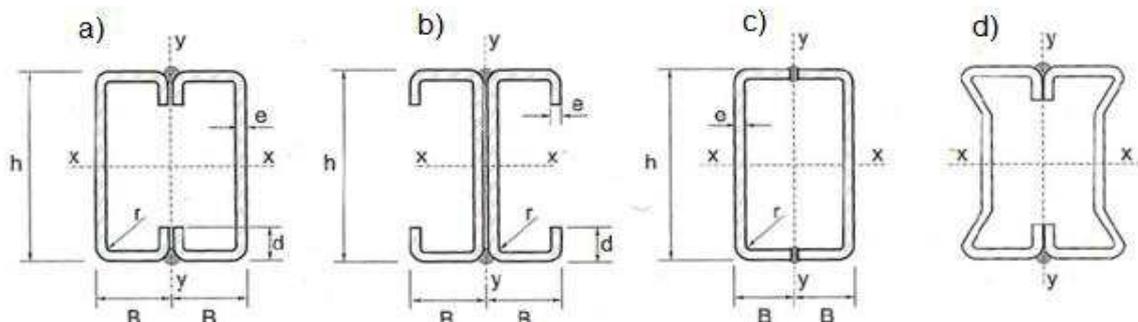
Normalmente, o perfil de aço conformado a frio é utilizado como elemento estrutural de construções leves, em barras de treliças, terças, entre outros. A figura 5 mostra os principais perfis dobrados. A figura 6 mostra algumas composições de perfis formados a frio.

Figura 5 – Exemplos de perfis simples formados a frio



Fonte: Dias (2002).

Figura 6 – Exemplos de composição de perfis formados a frio: a) e d) duplo U enrijecido fechado, b) duplo U enrijecido aberto, c) duplo U simples fechado



Fonte: Adaptado de Dias (2002).

Os valores adotados das propriedades mecânicas são os mesmos do aço laminado, definido no item 2.2.2.

2.3 Ações na estrutura

Ação em uma estrutura pode ser definido como tudo aquilo que provoca tensões e deformações nos elementos estruturais (CHAMBERLAIN; FICANHA; FABEANE, 2013).

A estrutura tem que resistir às ações e suas combinações na situação mais desfavorável, e além disso, deve assegurar condições de conforto e de segurança, considerando os estados-limites últimos e de serviço, ELU e ELS, respectivamente. De acordo com a NBR 8681:2003, as ações são classificadas como permanentes variáveis ou excepcionais.

2.3.1 Ações permanentes

“Ações que ocorrem com valores constantes ou de pequena variação em torno de sua média, durante praticamente toda a vida da construção” (NBR 8681, 2003, p.2). São constituídas pelo próprio da estrutura e pelo peso dos componentes construtivos permanentes (laje, cobertura, etc).

Os pesos específicos dos materiais estruturais e dos componentes construtivos permanentes são indicados pela NBR 6120:1980 ou através de catálogos de fabricantes.

2.3.2 Ações variáveis

“Ações que ocorrem com valores que apresentam variações significativas em torno de sua média, durante a vida da construção” (NBR 8681, 2003, p.2). São as cargas acidentais das construções, causadas pela ações do vento, pelo uso e ocupação da edificação, como sobrecargas em pisos e coberturas, entre outras.

As ações dos vento são definidas pela NBR 6123:1988 e os dados para uso e ocupação da edificação pela NBR 6120:1980.

2.3.3 Ações excepcionais

“Ações excepcionais são as que têm duração extremamente curta e muito baixa probabilidade de ocorrência durante a vida da construção, mas que devem ser consideradas nos projetos de determinadas estruturas” (NBR 8681, 2003, p.2). São derivadas de causas como explosões, choques de veículos, entre outras.

2.3.4 Ações do vento

De acordo com BELLEI (2008, p.53) “A ação dos ventos nas estruturas é uma das mais importantes e não pode ser negligenciada, sob o risco de colocar a estrutura em colapso”.

Os procedimentos e considerações para determinar as ações do vento na estrutura são determinados pela NBR 6123:1988, e para análise dessas cargas é preciso conhecer três parâmetros, que são: pressão dinâmica, coeficiente de pressão C_{pe} e de forma C_e externos, e coeficiente de pressão interna C_{pi} .

2.3.4.1 Pressão dinâmica

A pressão dinâmica depende da velocidade característica do vento e de elementos de correção que interferem nesta. Segundo a NBR 6123:1988, a velocidade característica do vento, V_k , é determinada pela equação 1.

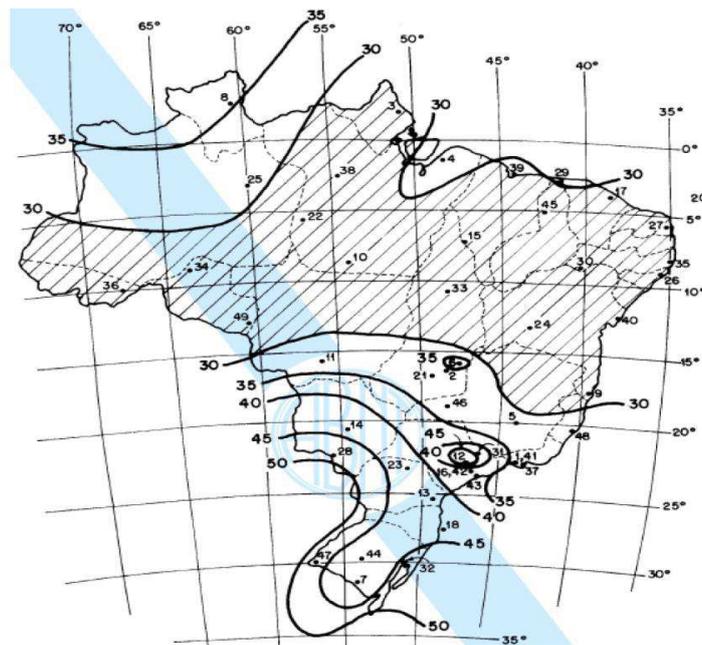
$$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3 \quad (1)$$

Onde:

- V_0 – Velocidade básica do vento;
- S_1 – Fator topográfico;
- S_2 – Fator de rugosidade, dimensões e altura;
- S_3 – Fator estatístico.

A velocidade básica do vento depende do local onde a estrutura será construída, e é medida em 3 segundos, podendo ser ultrapassada uma vez a cada 50 anos, a 10 metros acima do terreno, em lugar aberto e plano. A figura 7 mostra as isopletas de velocidade do vento no território nacional.

Figura 7- Mapa de isopletas de velocidade básica do vento do Brasil, em m/s



Fonte: ABNT NBR 6123:1988.

O fator topográfico, S_1 , leva em conta as oscilações do relevo do terreno e é determinado de acordo com a NBR 6123:1998, da seguinte forma:

- a) Terreno plano ou fracamente acidentado: $S_1 = 1,0$;
- b) Taludes e morros: $S_1 \geq 1,0$ (para definição de valores ver item 5.2 da norma);
- c) Vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção: $S_1 = 0,9$.

O fator de rugosidade, dimensões e altura, S_2 , é obtido considerando a influência combinada da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação e da mudança da velocidade do vento com a altura acima do terreno.

A tabela 1 classifica a rugosidade do terreno em cinco categorias

Tabela 1 – Categorias de rugosidade do terreno

| | |
|-----|--|
| I | Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente. |
| II | Terrenos abertos em nível, ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1,0 m. |
| III | Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. A cota média do topo dos obstáculos é igual a 3,0 m. |
| IV | Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. A cota média do topo dos obstáculos é igual a 10 m. |
| V | Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. A cota média do topo dos obstáculos é igual ou superior a 25 m. |

Fonte: ABNT NBR 6123:1998.

A tabela 2 classifica as dimensões da edificação em três classes.

Tabela 2 – Classificação das dimensões da edificação

| | |
|----------|---|
| Classe A | Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m. |
| Classe B | Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m. |
| Classe C | Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m. |

Fonte: ABNT NBR 6123:1988.

Os valores de S_2 para as categorias de rugosidade do terreno e classes de dimensões das edificações, em função da altura z sobre o terreno são ilustrados na tabela 3, obtida na NBR 6123:1988.

Tabela 3 – Fator S_2

| z (m) | Categoria | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|-----------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|
| | I | | | II | | | III | | | IV | | | V | | |
| | Classe | | | Classe | | | Classe | | | Classe | | | Classe | | |
| | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C |
| ≤ 5 | 1,06 | 1,04 | 1,01 | 0,94 | 0,92 | 0,89 | 0,88 | 0,86 | 0,82 | 0,79 | 0,76 | 0,73 | 0,74 | 0,72 | 0,67 |
| 10 | 1,10 | 1,09 | 1,06 | 1,00 | 0,98 | 0,95 | 0,94 | 0,92 | 0,88 | 0,86 | 0,83 | 0,80 | 0,74 | 0,72 | 0,67 |
| 15 | 1,13 | 1,12 | 1,09 | 1,04 | 1,02 | 0,99 | 0,98 | 0,96 | 0,93 | 0,90 | 0,88 | 0,84 | 0,79 | 0,76 | 0,72 |
| 20 | 1,15 | 1,14 | 1,12 | 1,06 | 1,04 | 1,02 | 1,01 | 0,99 | 0,96 | 0,93 | 0,91 | 0,88 | 0,82 | 0,80 | 0,76 |
| 30 | 1,17 | 1,17 | 1,15 | 1,10 | 1,08 | 1,06 | 1,05 | 1,03 | 1,00 | 0,98 | 0,96 | 0,93 | 0,87 | 0,85 | 0,82 |
| 40 | 1,20 | 1,19 | 1,17 | 1,13 | 1,11 | 1,09 | 1,08 | 1,06 | 1,04 | 1,01 | 0,99 | 0,96 | 0,91 | 0,89 | 0,86 |
| 50 | 1,21 | 1,21 | 1,19 | 1,15 | 1,13 | 1,12 | 1,10 | 1,09 | 1,06 | 1,04 | 1,02 | 0,99 | 0,94 | 0,93 | 0,89 |
| 60 | 1,22 | 1,22 | 1,21 | 1,16 | 1,15 | 1,14 | 1,12 | 1,11 | 1,09 | 1,07 | 1,04 | 1,02 | 0,97 | 0,95 | 0,92 |
| 80 | 1,25 | 1,24 | 1,23 | 1,19 | 1,18 | 1,17 | 1,16 | 1,14 | 1,12 | 1,10 | 1,08 | 1,06 | 1,01 | 1,00 | 0,97 |
| 100 | 1,26 | 1,26 | 1,25 | 1,22 | 1,21 | 1,20 | 1,18 | 1,17 | 1,15 | 1,13 | 1,11 | 1,09 | 1,05 | 1,03 | 1,01 |
| 120 | 1,28 | 1,28 | 1,27 | 1,24 | 1,23 | 1,22 | 1,20 | 1,20 | 1,18 | 1,16 | 1,14 | 1,12 | 1,07 | 1,06 | 1,04 |
| 140 | 1,29 | 1,29 | 1,28 | 1,25 | 1,24 | 1,24 | 1,22 | 1,22 | 1,20 | 1,18 | 1,16 | 1,14 | 1,10 | 1,09 | 1,07 |
| 160 | 1,30 | 1,30 | 1,29 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,24 | 1,23 | 1,22 | 1,20 | 1,18 | 1,16 | 1,12 | 1,11 | 1,10 |
| 180 | 1,31 | 1,31 | 1,31 | 1,28 | 1,27 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,23 | 1,22 | 1,20 | 1,18 | 1,14 | 1,14 | 1,12 |
| 200 | 1,32 | 1,32 | 1,32 | 1,29 | 1,28 | 1,28 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,23 | 1,21 | 1,20 | 1,16 | 1,16 | 1,14 |
| 250 | 1,34 | 1,34 | 1,33 | 1,31 | 1,31 | 1,31 | 1,30 | 1,29 | 1,28 | 1,27 | 1,25 | 1,23 | 1,20 | 1,20 | 1,18 |
| 300 | - | - | - | 1,34 | 1,33 | 1,33 | 1,32 | 1,32 | 1,31 | 1,29 | 1,27 | 1,26 | 1,23 | 1,23 | 1,22 |
| 350 | - | - | - | - | - | - | 1,34 | 1,34 | 1,33 | 1,32 | 1,30 | 1,29 | 1,26 | 1,26 | 1,26 |
| 400 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,34 | 1,32 | 1,32 | 1,29 | 1,29 | 1,29 |
| 420 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,35 | 1,35 | 1,33 | 1,30 | 1,30 | 1,30 |
| 450 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,32 | 1,32 | 1,32 |
| 500 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,34 | 1,34 | 1,34 |

Fonte: ABNT NBR 6123:1988.

O fator estatístico, S_3 , baseia-se em conceitos estatísticos e pondera o grau de segurança exigido e a vida útil da edificação. Os valores para esse fator são mostrados na tabela 4.

Tabela 4 – Valores mínimos do fator estatístico S_3

| Grupo | Descrição | S_3 |
|-------|---|-------|
| 1 | Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.) | 1,10 |
| 2 | Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação | 1,00 |
| 3 | Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.) | 0,95 |
| 4 | Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.) | 0,88 |
| 5 | Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 e 3 durante a construção. | 0,83 |

Fonte: ABNT NBR 6123:1988.

Após encontrados a velocidade básica do vento e os fatores de correção apresentados, é determinada a velocidade característica do vento e em seguida calcula-se a pressão dinâmica através da equação 2, de acordo com a NBR 6123:1988.

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

2.3.4.2 Coeficiente de pressão C_{pe} e de forma C_e externos

Os valores dos coeficientes de pressão e de forma externos, assim como o do coeficiente de pressão interna, são usados para a obtenção da ação estática do vento que atuará na estrutura. Paredes, telhados e elementos de vedação possuem coeficientes específicos para cada um.

A tabela 4 da ABNT NBR 6123:1988 provê os coeficientes de pressão e de forma, externos, para paredes de edificações de planta retangular. Além disso, a tabela 5 da mesma norma fornece os mesmos coeficientes para telhados com duas águas, simétricos, em edificações de planta retangular.

2.3.4.3 Coeficiente de pressão interna C_{pi}

Se a edificação for completamente impermeável ao ar, a pressão no interior dela será invariável no tempo e independente da corrente de ar externa. São consideradas como superfícies impermeáveis: lajes, paredes de alvenaria, de pedra, de tijolos, e afins, sem portas, janelas ou quaisquer outras aberturas. Os outros elementos construtivos e vedações são considerados permeáveis.

Para edifícios com 4 faces igualmente permeáveis, utilizar o valor mais nocivo para o coeficiente de pressão interna: -0,3 ou 0

Para outros tipos de configuração deve-se verificar o item 6.2 da ABNT NBR 6123:1988.

2.3.4.4 Ações estáticas do vento

Para determinação das forças estáticas devidas ao vento deve-se fazer a combinação dos coeficientes de pressão externa e interna, com seus valores mais significativos para as paredes internas, externas e cobertura, considerando os dois casos de incidência do vento, a 0° e 90° . Valores positivos para esses coeficientes indicam sobrepressão e valores negativos indicam sucção.

Em seguida, utilizando a combinação dos coeficientes, a pressão dinâmica, q , e a área de atuação dessa pressão, A , calcula-se a força devida ao vento, conforme a NBR 6123:1988, através da equação 3.

$$q = (C_{pe} - C_{pi}) * q * A \quad (3)$$

2.3.5 Combinações das ações

“Para a verificação da segurança em relação aos possíveis estados limites, para cada tipo de carregamento devem ser consideradas todas as combinações de ações que possam acarretar os efeitos mais desfavoráveis nas seções críticas da estrutura” (NBR 8681, 2003, p.6). As ações permanentes devem ser consideradas de forma total, enquanto das ações variáveis são consideradas apenas as partes que provocam efeitos desfavoráveis para a segurança.

Para as combinações últimas normais, utiliza-se a equação 4, determinada pela NBR 8800:2008.

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} * F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} * F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} * \psi_{0j} * F_{Qj,k}) \quad (4)$$

Onde:

- F_d = força última normal;
- $F_{Gi,k}$ = valores característicos das ações permanentes;
- $F_{Q1,k}$ = valor característico da ação variável considerada principal para a combinação;
- $F_{Qj,k}$ = valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal;
- γ_{gi} , γ_{q1} e γ_{qj} = coeficientes de ponderação de suas respectivas ações;
- ψ_{0j} = fator de combinação das ações.

As tabelas 5,6 e 7 mostram os valores dos coeficientes de ponderação e do fator de combinação para as diferentes ações nas combinações.

Tabela 5 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações variáveis

| Ações variáveis (γ_q) | | | | |
|--------------------------------|-----------------------|---------------|-----------------|--|
| Combinações | Efeito da temperatura | Ação do vento | Ações truncadas | Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação |
| Normais | 1,2 | 1,4 | 1,2 | 1,5 |

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8800:2008.

Tabela 6 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações permanentes

| Ações permanentes (γ_g) | | | | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|---|---|---|--|
| Combinações | Peso próprio de estruturas metálicas | Peso próprio de estruturas pré-moldadas | Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes | Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adição <i>in loco</i> | Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos |
| Normais | 1,25 | 1,30 | 1,35 | 1,40 | 1,50 |
| | 1,00* | 1,00* | 1,00* | 1,00* | 1,00* |

*Valores correspondentes aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8800:2008.

Tabela 7 – Valores dos fatores de combinação

| | Ações | ψ_0 |
|--|---|----------|
| Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação | Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas | 0,5 |
| | Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas | 0,7 |
| | Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas | 0,8 |
| Vento | Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral | 0,6 |

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8800:2008.

2.4 Dimensionamento dos elementos da estrutura

Após o cálculo das ações que atuarão na estrutura, obtêm-se os esforços nas seções de cada elemento estrutural, e a partir daí faz-se o dimensionamento das peças seguido de sua verificação em relação à resistência (estados limites últimos) e em relação ao desempenho (estados limites de utilização).

Segundo a NBR 8681:2003, as condições usuais de segurança referentes aos estados limites últimos são expressas pela equação a seguir.

$$R_d \geq S_d \quad (5)$$

Onde:

- R_d – Valores de cálculo dos correspondentes esforços resistentes;
- S_d – Valores de cálculo dos esforços atuantes.

Além disso, a equação 6 expressa as condições usuais de segurança relativas aos estados limites de utilização.

$$S_{ser} \leq S_{lim} \quad (6)$$

Onde:

- S_{ser} – Valores dos efeitos estruturais de interesse, obtidos com base nas combinações de serviço das ações;
- S_{lim} – Valores limites adotados para esses efeitos.

2.4.1 Aço laminado

O dimensionamento das estruturas de aço laminado será feito baseado na NBR 8800: 2008.

2.4.1.1 Barras tracionadas

Segundo Pfeil e Pfeil (2010), barras tracionadas são aquelas submetidas a solicitações de tração axial ou simples. Seu dimensionamento deve ser feito atendendo a condição a seguir, de acordo com a NBR 8800:2008.

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

Onde:

- $N_{t,Sd}$ – Força axial de tração solicitante de cálculo;
- $N_{t,Rd}$ – Força axial de tração resistente de cálculo.

A força axial de tração resistente de cálculo, será o menor dos valores obtidos considerando-se os estados limites últimos de escoamento da seção bruta e ruptura da seção líquida, indicados nas equações a seguir, respectivamente.

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (8)$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad (9)$$

Onde:

- A_g – Área bruta da seção transversal da barra;
- A_e – Área líquida efetiva da seção transversal da barra;
- f_y – Resistência ao escoamento do aço;
- f_u – Resistência à ruptura do aço;
- γ_{a1} e γ_{a2} – Coeficientes de ponderação das resistências.

A norma recomenda ainda que, o índice de esbeltez das barras tracionadas, excetuando-se tirantes de barras redondas pré-tensionadas ou outras barras que tenham sido montadas com pré-tensão, não supere 300, conforme a equação 10.

$$\lambda = \frac{L}{r} \leq 300 \quad (10)$$

Onde:

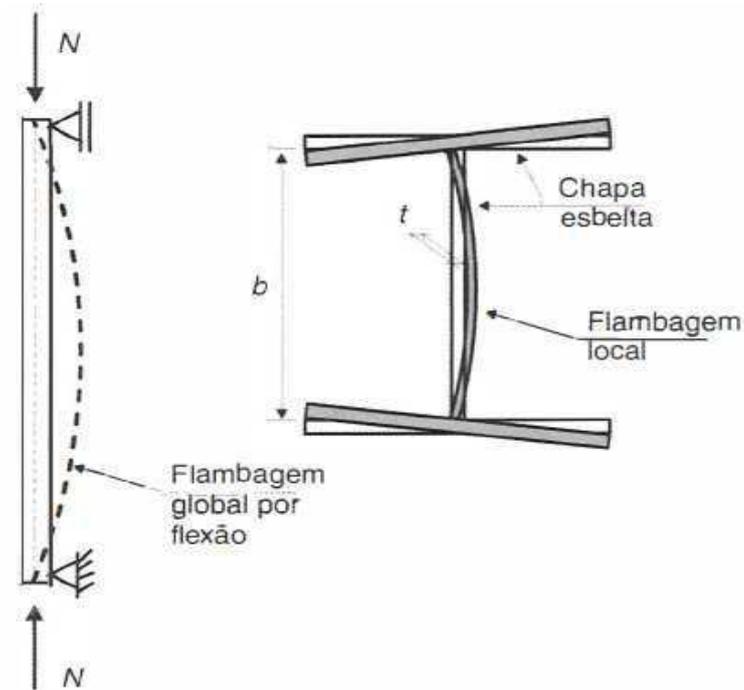
- λ – Índice de esbeltez;
- L – Comprimento da barra;
- r – Raio de giração.

2.4.1.2 Barras comprimidas

São as barras prismáticas submetidas à força axial de compressão. Ao contrário do esforço de tração que tende a retificar as peças reduzindo o efeito de curvaturas iniciais existentes, o esforço de compressão tende a acentuar esse efeito (PFEIL; PFEIL, 2010). Esse esforço provoca deslocamentos laterais na peça, processo conhecido como flambagem global por flexão, e que geralmente diminui a capacidade de carga da peça em comparação com a barra tracionada.

Outro efeito a ser considerado é a flambagem local, instabilidade caracterizada pelo aparecimento de deslocamentos transversais à chapa, na forma de ondulações. O surgimento desse fenômeno depende da esbeltez da chapa (b/t). A figura 8 mostra os tipos de instabilidade citados.

Figura 8- Efeitos em uma barra comprimida



Fonte: Adaptado de Pfeil e Pfeil (2010).

Portanto, o dimensionamento de elementos submetidos à compressão axial deverá levar em consideração esses efeitos que possam ocorrer. Segundo a NBR 8800: 2008, para dimensionamento dessas barras deverá ser atendida a condição da equação 11.

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (11)$$

- $N_{c,Sd}$ – Força axial de compressão solicitante de cálculo;
- $N_{c,Rd}$ – Força axial de compressão resistente de cálculo.

A força axial de compressão resistente de cálculo da peça, $N_{c,Rd}$, será definida pela expressão:.

$$N_{c,Rd} = \frac{X Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (12)$$

Onde:

- A_g – Área bruta da seção transversal da barra;
- f_y – Resistência ao escoamento do aço;
- X – Fator de redução associado à resistência à compressão;
- Q – Fator de redução total associado à flambagem local;
- γ_{a1} – Coeficiente de ponderação das resistências.

O valor de Q deve ser obtido no anexo F da NBR 8800:2008, e o valor de X no item 5.3.3 da mesma norma.

Além disso, o maior índice de esbeltez das barras comprimidas não deve ser superior a 200, de acordo com a equação 13.

$$\lambda = \frac{K L}{r} \leq 200 \quad (13)$$

Onde:

- λ – Índice de esbeltez;
- L – Comprimento da barra;
- r – Raio de giração;
- K – Coeficiente de flambagem.

O valor do coeficiente de flambagem K é obtido no anexo E da NBR 8800:2008.

2.4.1.3 Barras submetidas a momento fletor e força cortante

No dimensionamento de barras submetidas a momento fletor e força cortante, devem ser atendidas as seguintes condições, segundo a NBR 8800:2008:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (14)$$

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

Onde:

- M_{Sd} – Momento fletor solicitante de cálculo;
- V_{Sd} – Força cortante solicitante de cálculo;
- M_{Rd} – Momento fletor resistente de cálculo;
- V_{Rd} – Força cortante resistente de cálculo.

Com relação ao momento fletor, devem ser considerados os estados limites últimos de flambagem lateral com torção (FLT) e a flambagem local para os componentes da barra (alma, aba, mesa).

Já para a força cortante, consideram-se os estados limites últimos de escoamento e flambagem por cisalhamento.

2.4.1.4 Barras submetidas à combinação de esforços solicitantes

Para a atuação simultânea da força axial de tração ou de compressão e de momentos fletores, deve ser obedecida a limitação fornecida pelas seguintes expressões de interação, conforme a NBR 8800:2008:

a) Para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1 \quad (16)$$

b) Para $\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2$

$$\frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1 \quad (17)$$

Onde:

- N_{Sd} – Força axial solicitante de cálculo de tração ou compressão, a que for aplicável;
- N_{Rd} – Força axial resistente de cálculo de tração ou compressão, a que for aplicável;
- $M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$ – Momentos fletores solicitantes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos x e y da seção transversal;
- $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ – Momentos fletores resistentes de cálculo, respectivamente em relação aos eixos x e y da seção transversal.

2.4.2 Aço conformado a frio

O dimensionamento das estruturas de aço conformado a frio será feito baseado na NBR 14762:2010.

2.4.2.1 Barras tracionadas

O dimensionamento ocorre de forma análoga ao definido no item 2.4.1.1 para o aço laminado.

2.4.2.2 Barras comprimidas

No dimensionamento das barras comprimidas deve ser atendida a seguinte condição, conforme a NBR 14762:2010.

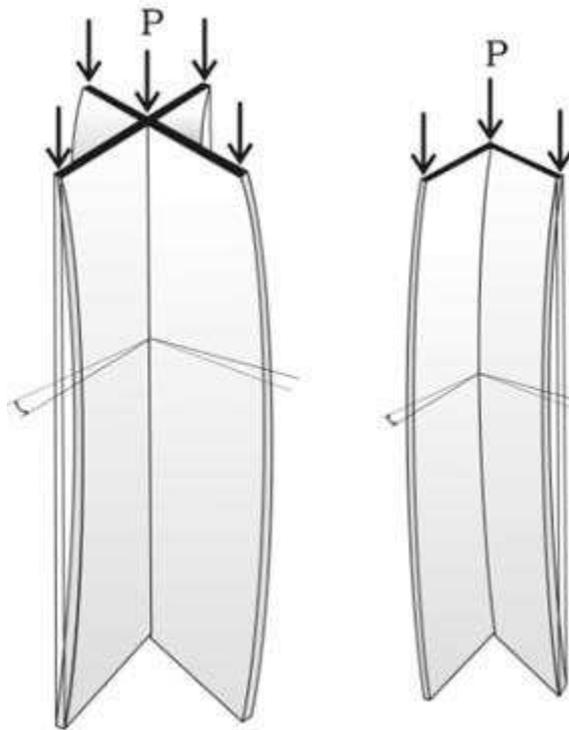
$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (18)$$

Onde:

- $N_{c,Sd}$ – Força axial de compressão solicitante de cálculo;
- $N_{c,Rd}$ – Força axial de compressão resistente de cálculo.

As barras comprimidas estão sujeitas à instabilidade global por flexão, por torção ou por flexotorção. A figura 9 mostra esses efeitos.

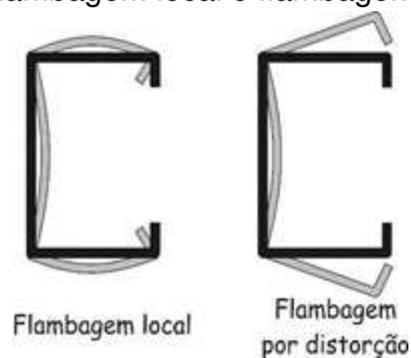
Figura 9 - Instabilidade por torção e por flexotorção



Fonte: Adaptado de Silva e Pannoni (2010).

Somado a isso, deve-se considerar os efeitos da flambagem local e flambagem por distorção, indicados na figura 10.

Figura 10 - Flambagem local e flambagem por distorção



Fonte: Adaptado de INSTITUTO AÇO BRASIL (2008).

Portanto, para dimensionar uma peça submetida à compressão, o esforço resistente da peça deverá ser calculado considerando os efeitos eventuais da instabilidade global e local, além da instabilidade distorcional. O menor valor encontrado é o esforço resistente da peça.

Além disso, o maior índice de esbeltez das barras comprimidas não deve ser superior a 200.

2.4.2.3 Barras submetidas à flexão simples

O dimensionamento ocorre de forma análoga ao definido no item 2.4.1.3 com relação às condições de resistência.

Para a ação de momento fletor, deve-se considerar ainda os efeitos da flambagem lateral com torção e da flambagem distorcional, conforme item 9.8.2 da NBR 14762:2010.

Para a atuação simultânea de força cortante e de momento fletor na mesma seção, deve ser obedecida a limitação fornecida pelas seguintes expressões de interação, conforme a NBR 14762:2010.

$$\left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}}\right)^2 \leq 1 \quad (19)$$

Onde:

- M_{Sd} – Momento fletor solicitante de cálculo;
- M_{Rd} – Momento fletor resistente de cálculo;
- V_{Sd} – Força cortante solicitante de cálculo;
- V_{Rd} – Força cortante resistente de cálculo.

2.4.2.4 Barras submetidas à flexão composta

A força normal solicitante de cálculo e os momentos fletores solicitantes de cálculo devem satisfazer a expressão de interação indicada a seguir, de acordo com a NBR 14762:2010.

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1 \quad (20)$$

Onde:

- N_{Sd} – Força axial solicitante de cálculo de tração ou compressão, a que for aplicável;
- N_{Rd} – Força axial resistente de cálculo de tração ou compressão, a que for aplicável;
- $M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$ – Momentos fletores solicitantes de cálculo, em relação aos eixos x e y, respectivamente;
- $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ – Momentos fletores resistentes de cálculo, em relação aos eixos x e y, respectivamente.

2.4.3 Madeira

O dimensionamento das estruturas de aço laminado será feito baseado na NBR 7190: 1997.

2.4.3.1 Barras tracionadas

Nas barras tracionadas axialmente, a condição de segurança é expressa pela equação a seguir, de acordo com a NBR 7190:1997.

$$\sigma_{td} \leq f_{td} \quad (21)$$

Onde:

- σ_{td} – Tensão de cálculo, obtida dividindo-se a força de tração de dimensionamento pela área útil da seção transversal;
- f_{td} – Resistência de cálculo à tração paralela às fibras.

A resistência de cálculo à tração paralela às fibras é obtida pela equação a seguir:

$$f_{td} = K_{mod} \frac{f_{tk}}{\gamma_w} \quad (22)$$

Onde:

- K_{mod} – Coeficiente de modificação;
- f_{tk} – Resistência característica à tração paralela às fibras;
- γ_w – Coeficiente de minoração da resistência da madeira, de valor igual a 1,8.

O coeficiente de modificação, K_{mod} , é formado pelo produto de três coeficientes parciais, que levam em consideração, respectivamente, a classe de carregamento e o tipo de material empregado, a classe de umidade e o tipo de material empregado, e, se a madeira é de primeira ou segunda categoria. Esses valores são obtidos no item 6.4.4 da NBR 7190:1997.

A norma recomenda ainda que o comprimento da barra dividido pela menor dimensão da seção transversal, não deve exceder 50.

2.4.3.2 Barras comprimidas

Nas barras curtas comprimidas axialmente, a condição de segurança é expressa pela equação seguinte, conforme a NBR 7190:1997.

$$\sigma_{cd} \leq f_{cd} \quad (23)$$

Onde:

- σ_{cd} – Tensão de cálculo, obtida dividindo-se a força de compressão de dimensionamento pela área útil da seção transversal;
- f_{cd} – Resistência de cálculo à compressão paralela às fibras.

A resistência de cálculo à compressão paralela às fibras é obtida pela equação a seguir:

$$f_{cd} = K_{mod} \frac{f_{ck}}{\gamma_w} \quad (24)$$

Onde:

- K_{mod} – Coeficiente de modificação;

- f_{ck} – Resistência característica à compressão paralela às fibras;
- γ_w – Coeficiente de minoração da resistência da madeira, de valor igual a 1,4.

Peças comprimidas podem atingir seu estado limite por perda de estabilidade em função de sua esbeltez. O valor dessa esbeltez não deve ser superior que 140. Logo, além da verificação da resistência deve-se atender a condição de segurança relativa ao estado último de instabilidade, segundo o item 7.5 da NBR 7190:1997

Mas também, considerando que a força aplicada não seja esteja exatamente no centro geométrico da barra, pode vir a ocorrer o esforço de flexocompressão, que tem sua verificação no item 7.3.6 da NBR 7190:1997.

2.4.3.3 Barras submetidas à flexão simples reta

Para as peças submetidas a momento fletor, a segurança é garantida pela observância simultânea das condições a seguir, de acordo com a NBR 7190:1997.

$$\sigma_{c1,d} \leq f_{cd} \quad (25)$$

$$\sigma_{t2,d} \leq f_{td} \quad (26)$$

Onde:

- f_{td} – Resistência à tração definida em 1.1.1;
- f_{cd} – Resistência à compressão definida em 1.1.2;
- $\sigma_{t2,d}$ – Tensão atuante de cálculo na borda mais tracionada da seção transversal considerada;
- $\sigma_{c1,d}$ – Tensão atuante de cálculo na borda mais comprimida da seção transversal considerada.

As tensões atuantes de cálculo nas bordas são calculadas pelas seguintes expressões:

$$\sigma_{c1,d} = \frac{M_d}{W_c} \quad (27)$$

$$\sigma_{t2,d} = \frac{M_d}{W_t} \quad (28)$$

Onde W_c e W_t são os respectivos módulos de resistência e podem ser calculados de acordo com o item 7.3.3 da NBR 7190:1997.

2.4.3.4 Barras submetidas à flexão simples oblíqua

Para as barras em que o momento fletor atua em um plano que não contém um de seus eixos centrais de inércia, a condição de segurança é expressa pela mais rigorosa das duas condições seguintes, tanto em relação às tensões de tração quanto às de compressão, de acordo com a NBR 7190:1997.

$$\frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{wd}} + k_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{wd}} \leq 1 \quad (29)$$

$$k_M \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{wd}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{wd}} \leq 1 \quad (30)$$

Onde:

- $\sigma_{Mx,d}$ – Tensão máxima devida à componente de flexão atuante na direção x;
- $\sigma_{My,d}$ – Tensão máxima devida à componente de flexão atuante na direção y;
- f_{wd} – Resistência de cálculo de tração ou compressão, conforme a borda verificada;
- k_M – Coeficiente de correção.

Para barras com seção transversal retangular, o coeficiente de correção possui o valor de 0,5 e para as demais seções possui valor unitário.

2.4.3.5 Barras submetidas à cisalhamento

Nas barras submetidas à flexão com força cortante, a condição de segurança em relação às tensões tangenciais é expressa pela equação a seguir, segundo a NBR 7190:1997.

$$\tau_d = \frac{V_d S}{b I} \leq f_{vd} \quad (31)$$

Onde:

- τ_d – Tensão máxima de cisalhamento atuando no ponto mais solicitado da peça;
- V_d – Força cortante na seção em estudo;
- S – Momento estático da seção para o ponto onde se quer calcular a tensão;
- b – Largura ou somatória das larguras no ponto da seção em estudo;
- I – Momento de inércia da seção transversal;
- f_{vd} – Resistência de cálculo ao cisalhamento.

O valor da resistência de cálculo ao cisalhamento é adotado como sendo doze por cento do valor da resistência de cálculo à compressão paralela às fibras, no caso da espécie de coníferas, ou dez por cento do valor da resistência de cálculo à compressão paralela às fibras, no caso de espécies folhosas.

3 METODOLOGIA

Inicialmente, foram definidas algumas características das edificações a serem estudadas, como o vão, comprimento, altura, espaçamento entre pórticos, inclinação dos pórticos, telha utilizada, localização, e condições de entorno. Além disso, foram definidas as cargas a serem consideradas no dimensionamento, como o peso próprio, carga accidental, e carga de vento. Para realização desta etapa, utilizou-se como referências as normas NBR 6120:1980 – Cargas para o cálculo de estrutura de edificações, NBR 6123:1988 – Forças devido ao vento em edificações, NBR 8681:2003 – Ações e segurança nas estruturas: procedimento.

Em seguida, foi realizada a combinação de cargas e com o auxílio do software Ftool encontrou-se os esforços atuantes nas barras das estruturas, assim como a deformação das terças.

Logo após, foi feito o dimensionamento dos elementos estruturais, encontrando as seções e perfis necessários para cada. Para as estruturas de madeira, utilizou-se o software Jwood, para as estruturas de aço laminado o software VisualMetal, e para as estruturas de aço dobrado o software DimPerfil4.0.

Por fim, realizou-se o levantamento de quantitativo de material para as estruturas analisadas, e juntamente de tabelas da SINAPI e catálogo de fabricantes, foi feita uma estimativa de preço para cada estrutura, verificando-se qual a mais econômica.

4 DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS

4.1 Vão de 8m Madeira

4.1.1 Caracterização do edifício

Edificação comercial de duas águas, de planta retangular, com repetição de pórticos planos e travamentos longitudinais, com as seguintes características:

- Localização: São Luís – MA;
- Comprimento: 10 m;
- Pé direito: 3 m;
- Distância entre pórticos: 2 m;
- Cobertura em telha cerâmica Marselha ou francesa;
- Uma porta de 1,0 metros de largura por 2,10 metros de altura;
- Duas janelas de 1,0 metros de largura por 1,1 metros de altura.

4.1.2 Materiais

Todas as peças serão de madeira serrada de segunda categoria dicotiledônea, classe de resistência C30, carregamentos de longa duração, classes de umidade 1 e 2.

A tabela 8 mostra as propriedades físicas de resistência e elasticidade para a madeira de classe C30.

Tabela 8 – Classes de resistência

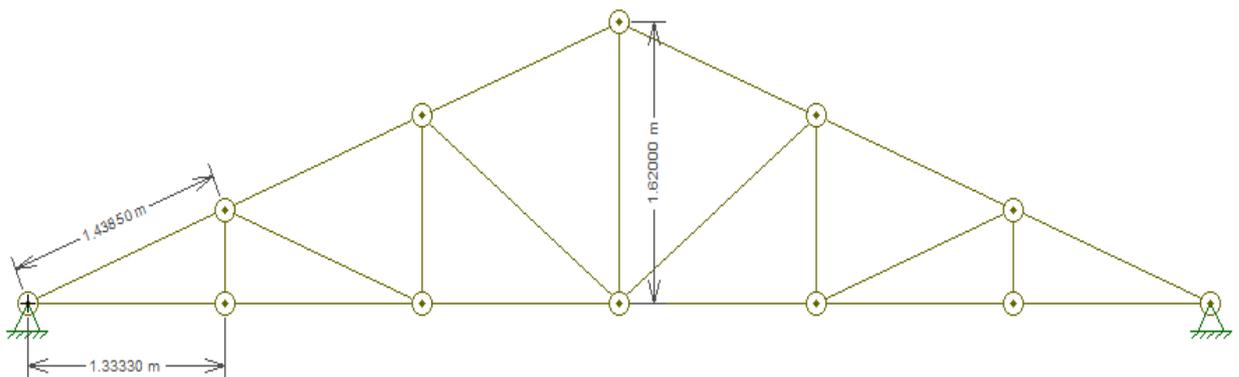
| Dicotiledôneas (valores na condição-padrão de referência U = 12%) | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------------|---|
| Classes | f_{ck} (MPa) | f_{vk} (MPa) | E_{cn} (MPa) | ρ_{bas} (Kg/m ³) | $\rho_{aparente}$ (Kg/m ³) |
| C 30 | 30 | 5 | 14500 | 650 | 800 |

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190:1997.

4.1.3 Sistema estrutural

O sistema estrutural é apresentado na figura 11. Foi utilizada uma tesoura do tipo Howe, pois para o material utilizado, a madeira, permite executar melhor a ligação entre diagonais e banzos de maneira mais natural, que é o entalhe. A distância entre terças e a inclinação do telhado são adotados de acordo com a telha utilizada. Para a telha cerâmica Marselha foi adotada uma inclinação de 22°. Além disso, foram utilizados ripas e caibros para apoiar as telhas nas terças. Todos os nós da treliça são rotulados e as terças são consideradas apoiadas nos nós para facilitar seu dimensionamento.

Figura 11 – Treliça Howe vão de 8 metros



Fonte: Autoria própria através do software Ftool (2019).

4.1.4 Ações na estrutura

As cargas adotadas na estrutura seguem as determinações do item 5.5 da NBR 7190:1997.

4.1.4.1 Carga permanente

As cargas permanentes são o peso próprio da estrutura e dos elementos associados a ela.

O peso próprio da treliça e contraventamento são definidos pela fórmula empírica de Howe a seguir:

$$g_T = 0,0245 (1 + 0,33L) \quad (32)$$

- g_T – Peso próprio da estrutura;
- L – Vão da treliça.

Para o vão de 8 m têm-se o peso da treliça de 0,09 KN/m².

O peso das telhas é definido pelo peso por unidade de uma telha vezes a quantidade de telhas por metro quadrado. Para telha cerâmica tipo Marselha, têm-se 0,028 KN/unidade, e 16 unidades/m². Logo, encontra-se um peso de 0,45 KN/m².

Para as terças são utilizadas barras de seção 6 cm por 12 cm. Seu peso é definido diretamente pelo software Jwood e tem valor de 0,06 KN/m.

Para ripas e caibros, são utilizadas barras de seção 1,5 cm por 5 cm e 5 cm por 6 cm, respectivamente. São adotadas três ripas por metro, assim como dois caibros por metro. O seu peso somado é igual a 0,07 KN/m².

Para ripas, caibros e terças deve ser considerado a inclinação em relação a horizontal, portanto, para o dimensionamento, suas usadas as projeções de suas cargas.

Deve ser considerada ainda a absorção da telha, que é de 30% para a telha cerâmica Marselha, e possui valor de 0,135 KN/m².

4.1.4.2 Carga Acidental

A NBR 6120:1980 define no item 2.2.1.4 que “Todo elemento isolado de cobertura (ripas, terças, e barras de banzo superior de treliças) deve ser projetado para receber na posição mais desfavorável, um carga vertical de 1 KN, além da carga permanente”.

4.1.4.3 Carga de vento

No caso de telhado com telhas cerâmicas, quando não amarradas ou fixadas através de pregos na estrutura de armação do telhado, a ação da sucção não tem relevância. Para o caso da sobrepressão, será utilizada uma carga de $0,3\text{KN/m}^2$.

4.1.4.4 Combinações das ações

As combinações de ações são utilizadas para determinar quais os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura. A seguir, são demonstrados os coeficientes de ponderação e fatores de combinação adotados nessas combinações. Estes valores foram adotados seguindo a NBR 7190 1997.

- a) Ações permanentes de grande variabilidade: $\gamma_g = 1,4$ para situações desfavoráveis e $\gamma_g = 0,9$ para efeitos favoráveis a segurança;
- b) Ações variáveis normais: $\gamma_q = 1,4$;

Os fatores de combinação adotados são:

- a) Pressão dinâmica do vento: $\psi_0 = 0,2$;
- b) Sobrecarga (ações variáveis causadas pelo uso e ocupação): $\psi_0 = 0,8$.

Com esses coeficientes, e, utilizando a equação 4, descrita no item 2.3.5 deste trabalho, estabeleceram-se as combinações dos esforços mais desfavoráveis para a estrutura.

4.1.5 Dimensionamento dos elementos

Com as cargas e geometria da estrutura definidas, calcula-se os esforços internos através do software Ftool, e, com o auxílio do software Jwood, faz-se a implementação das combinações de ações atuantes na estrutura, e verificação das seções escolhidas, e deslocamentos da estrutura.

4.1.5.1 Terça

Num cálculo rigoroso, deve-se considerar a terça como viga contínua ou Gerber, apoiadas sobre as tesouras. Pela razão de facilidade de cálculo, foi considerada como viga simplesmente apoiada. Elas são apoiadas diretamente sobre os nós das tesouras, para evitar efeitos de flexão nas barras do banzo superior.

Estando a terça colocada num plano inclinado, deve-se dimensioná-la para o caso de flexão oblíqua. O dimensionamento é feito diretamente pelo software Jwood.

Dados:

- a) Comprimento da terça: 2 m;
- b) Seção transversal: 6 cm por 12 cm;
- c) Carga permanente - peso próprio: 0,06 KN/m;
- d) Carga permanente - ripas + caibros + telhado: 0 71 KN/m²;
- e) Sobrecarga acidental: 1 KN no meio do vão da terça.

Os dados das cargas no programa, para o caso de flexão, são inseridos em KN/m. Portanto a carga permanente de telhado, ripas e caibros fica igual a 0,95 KN/m. Além disso, a carga acidental fica igual a 0,5 KN/m.

A figura 12 mostra a inserção das cargas e combinação destas, assim como os esforços solicitantes e deformações na barra. Já na figura 13 são feitas as verificações de resistência e de flecha limite.

Figura 12 – Cargas e esforços na terça de madeira

Fonte: Autoria própria através do software Jwood (2019).

Figura 13 – Verificações de resistência e flecha limite na terça de madeira

Fonte: Autoria própria através do software Jwood (2019).

A flecha limite da terça é igual ao comprimento da terça dividido por 200, nesse caso igual a 1 cm. A flecha calculada pelo software é igual a 0,53 cm, o que mostra que a terça atende à condição de deslocamento.

4.1.5.2 Treliça

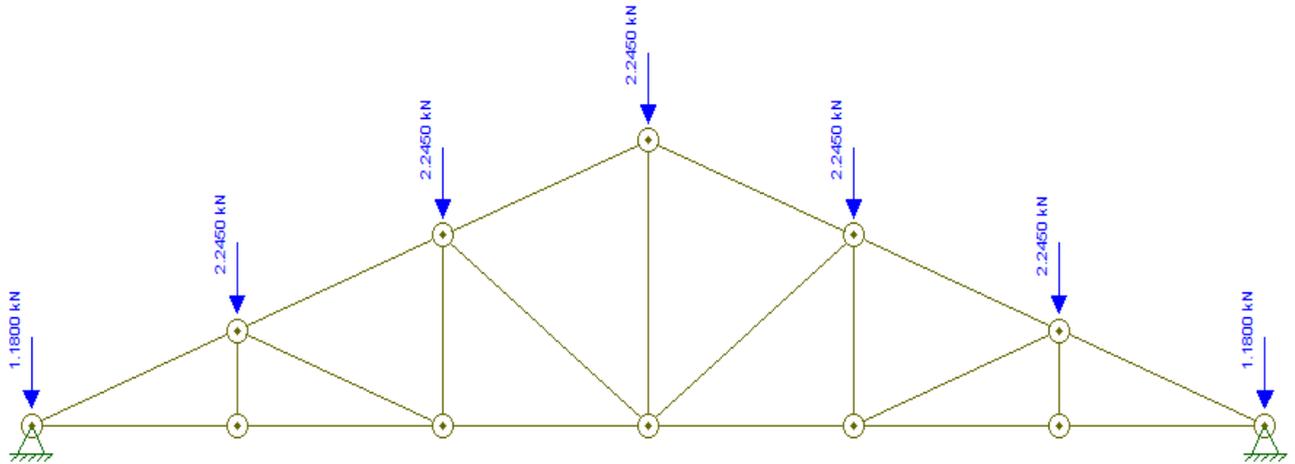
Como já foi dito anteriormente, as extremidades das barras da treliça (banzos montantes e diagonais) são admitidas rotuladas, portanto, serão solicitadas apenas por esforços axiais (tração e compressão). O dimensionamento das barras da treliça é feito pelo software Jwood.

Dados:

- a) Seção transversal do banzo superior: 6 cm por 16 cm;
- b) Seção transversal do banzo inferior, diagonais e montantes: 6 cm por 12 cm;
- c) Carga permanente – peso próprio: 0,09 KN/m²;
- d) Carga permanente – terça: 0,06 KN/m;
- e) Carga permanente – ripas + caibros + telhado: 0 71 KN/m²;
- f) Sobrecarga acidental: 0,3 KN/m².

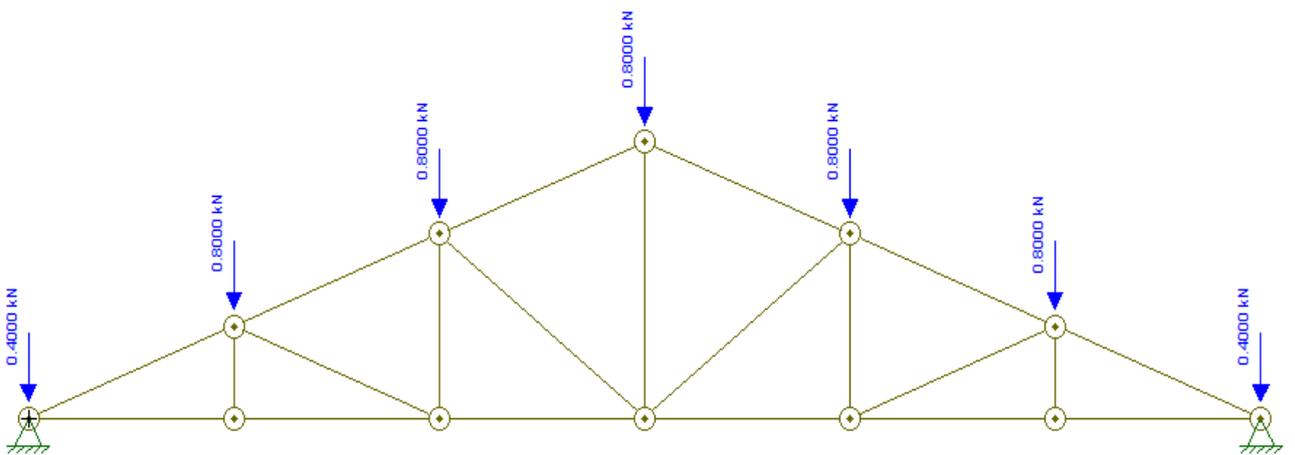
Levando em consideração a área de influência dos materiais na treliça, foram obtidas as cargas pontuais em seus nós. A figura 14 mostra as cargas permanentes combinadas e aplicadas na treliça. A figura 15 mostra as cargas pontuais da sobrecarga.

Figura 14 – Cargas pontuais permanentes



Fonte: Autoria própria através do software Ftool (2019).

Figura 15 – Cargas pontuais de sobrecarga



Fonte: Autoria própria através do software Ftool (2019).

A seguir são calculados os esforços nas barras com o software ftool, e indicados os esforços máximos de cada barra para realizar seu dimensionamento. A tabela 9 mostra esses esforços para cada elemento, já realizando a combinação dos esforços.

Tabela 9 – Esforços máximos por elemento estrutural de madeira: Vão de 8 m

| Elemento Estrutural | Carga Permanente (KN) | Carga Acidental (KN) | Combinação (KN) |
|---------------------|-----------------------|----------------------|-----------------|
| Banzo Superior | -14,98 | -5,33 | -28,43 |
| Banzo Inferior | +13,98 | +4,94 | +26,49 |
| Diagonal | -3,57 | -1,27 | -6,78 |
| Montante | +4,49 | +1,6 | +8,52 |

Fonte: Autoria própria (2019).

1) Banzo Superior

A figura 16 mostra as propriedades geométricas das barras do banzo superior. A figura 17 mostra o esforço de compressão limite para a barra em estudo, e por fim, a figura 18 verifica a flexocompressão para o esforço encontrado na tabela 9.

Figura 16 – Propriedades geométricas do banzo superior de madeira

The screenshot shows a software interface with the following sections and data:

- Dados Geométricos:**
 - b = 6 cm
 - h = 16 cm
 - L = 143,8 cm
 - Área = 96,0 cm²
- Cálculo de λx e λy:**
 - Formula: $\lambda_x = \frac{L}{\sqrt{\frac{h^2}{12}}}$, Result: λx = 31,134
 - Formula: $\lambda_y = \frac{L}{\sqrt{\frac{b^2}{12}}}$, Result: λy = 83,023
- Inércia:**
 - Formula: $I_x = \frac{b \cdot h^3}{12}$, Result: Ix = 2048,00 cm⁴
 - Formula: $I_y = \frac{h \cdot b^3}{12}$, Result: Iy = 288,00 cm⁴
- Módulo de Resistência:**
 - Formula: $W_x = \frac{b \cdot h^2}{6}$, Result: Wx = 256,00 cm³
 - Formula: $W_y = \frac{h \cdot b^2}{6}$, Result: Wy = 96,00 cm³

Fonte: Autoria própria através do software Jwood (2019).

Figura 17 – Esforço máximo de compressão no banco superior de madeira

Classe de Resistência | kmod1 e 2 | kmod3 | Geometria | Tração | **Compressão** | Flexão | Verificações - Flexão | Flexocompressão | Relatório

Definição de $F_{c0,d}$

$$f_{c0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c0k}}{\gamma_w}$$

$\gamma_w = 1.4$

$k_{mod} = 0.560$

$F_{c0,k} = 3.0$ kN/cm²

$F_{c0,d} = 1.2000$ kN/cm²

Cálculo de $E_{0,05}$

$$E_{0,05} = 0.7 \cdot E_{c0m}$$

$E_{c0,m} = 1450.0$ kN/cm²

$E_{0,05} = 1015.00$ kN/cm²

Cálculo de $\lambda_{rel,x}$ e $\lambda_{rel,y}$

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0k}}{E_{0,05}}}$$

$\lambda_{rel,x} = 0.539$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0k}}{E_{0,05}}}$$

$\lambda_{rel,y} = 1.437$

Cálculo de k_x e k_y

BC = 0.2

$$k_x = 0.5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,x} - 0.3) + (\lambda_{rel,x})^2]$$

$$k_y = 0.5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0.3) + (\lambda_{rel,y})^2]$$

$k_x = 0.669$ $k_y = 1.646$

Cálculo de k_{cx} e k_{cy}

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}}$$

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{(k_y)^2 - (\lambda_{rel,y})^2}}$$

$k_{cx} = 0.938$ $k_{cy} = 0.408$

Resistência à Compressão

$$N_{c,d} = k_{c(x,y)} \cdot f_{c0,d} \cdot A$$

$N_{c,d} = 47.049$ kN

Fonte: Autoria própria através do software Jwood (2019).

Figura 18 – Verificação à flexocompressão no banco superior de madeira

Classe de Resistência | kmod1 e 2 | kmod3 | Geometria | Tração | Compressão | Flexão | **Verificações - Flexão** | Flexocompressão | Relatório

Propriedades da peça

$A = 96.0$ cm²

$F_{c0,d} = 1.2000$ kN/cm²

$k_{cx} = 0.938$

$k_{cy} = 0.408$

$k_M = 1.00$

Excentricidade mínima e esforços

$N_{c,d} = 28.43$ kN

$$E_{min} = \frac{L}{300}$$

$E_{min} = 0.48$ cm

$$M_d = N_d \cdot E_{min}$$

$M_{xd} = 13.63$ kN.cm

$M_{yd} = 0.00$ kN.cm

Verificações para $\lambda_{rel} \leq 0,3$

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + k_M \cdot \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1$$

≤ 1

≤ 1

Cálculo das Tensões Excêntricas

$$\sigma_{xd} = \frac{M_{xd}}{W_x}$$

$$\sigma_{yd} = \frac{M_{yd}}{W_y}$$

$\sigma_{Mxd} = 0.05$ kN/cm²

$\sigma_{Myd} = 0.00$ kN/cm²

$$\sigma_{Ncd} = \frac{N_d}{A}$$

$\sigma_{Nc,d} (kN/cm^2) = 0.30$

Elbeltezes Relativas

$\lambda_{rel,y} = 1.437$

$\lambda_{rel,x} = 0.539$

Verificações para $\lambda_{rel} > 0,3$

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cx} \cdot f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cy} \cdot f_{c0,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1$$

$0.42 \leq 1$

$0.91 \leq 1$

PASSOU!

Fonte: Autoria própria através do software Jwood (2019).

Logo, a barra resiste ao esforço solicitante.

2) Banco Inferior

A figura 19 mostra as propriedades geométricas das barras do banco inferior. A figura 20 mostra o esforço de tração limite para a barra em estudo.

Figura 19 – Propriedades geométricas do banzo inferior de madeira

Classe de Resistência kmod1 e 2 kmod3 Geometria Tração Compressão Flexão Verificações - Flexão Flexocompressão Relatório

Dados Geométricos

b = 6 cm

h = 12 cm

L = 133,3 cm

Área = 72,0 cm²

Cálculo de λ_x e λ_y

$\lambda_x = \frac{L}{\sqrt{\frac{h^2}{12}}}$ $\lambda_x = 38,480$

$\lambda_y = \frac{L}{\sqrt{\frac{b^2}{12}}}$ $\lambda_y = 76,961$

Inércia

$I_x = \frac{b \cdot h^3}{12}$

$I_y = \frac{h \cdot b^3}{12}$

$I_x = 864,00$ cm⁴

$I_y = 216,00$ cm⁴

Módulo de Resistência

$W_x = \frac{b \cdot h^2}{6}$

$W_y = \frac{h \cdot b^2}{6}$

$W_x = 144,00$ cm³

$W_y = 72,00$ cm³

Fonte: Autoria própria através do software Jwood (2019).

Figura 20 – Esforço máximo de tração no banzo inferior de madeira

Classe de Resistência kmod1 e 2 kmod3 Geometria Tração Compressão Flexão Verificações - Flexão Flexocompressão Relatório

Definição de $F_{cd,d}$

$f_{c0d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c0k}}{\gamma_w}$ $\gamma_w = 1,8$

kmod = 0,560

$F_{c0,k} = 3,0$ kN/cm²

$F_{c0,d} = 0,9333$ kN/cm²

Definição da resistência à tração

$N_{t,d} = f_{c0d} \cdot A$

$N_{t,d} = 67,20$ kN

Fonte: Autoria própria através do software Jwood (2019).

Logo, a barra suporta o esforço solicitante.

3) Diagonal

A figura 21 mostra as propriedades geométricas das barras da diagonal. A figura 22 mostra o esforço de compressão limite para a barra em estudo, e por fim, a figura 23 verifica a flexocompressão para o esforço encontrado na tabela 9.

Figura 21 – Propriedades geométricas da diagonal de madeira

| Classe de Resistência | kmod1 e 2 | kmod3 | Geometria | Tração | Compressão | Flexão | Verificações - Flexão | Flexocompressão | Relatório |
|---|-----------|-----------------|-----------|----------|------------|--------|-----------------------|-----------------|-----------|
| Dados Geométricos | | | | | | | | | |
| b = | 6 | cm | | | | | | | |
| h = | 12 | cm | | | | | | | |
| L = | 171,6 | cm | | | | | | | |
| Área = | 72,0 | cm ² | Calcular | | | | | | |
| Cálculo de λ_x e λ_y | | | | | | | | | |
| $\lambda_x = \frac{L}{\sqrt{\frac{h^2}{12}}}$ | | $\lambda_x =$ | 49,537 | Calcular | | | | | |
| $\lambda_y = \frac{L}{\sqrt{\frac{b^2}{12}}}$ | | $\lambda_y =$ | 99,073 | Calcular | | | | | |
| Inércia | | | | | | | | | |
| $I_x = \frac{b \cdot h^3}{12}$ | | | | | | | | | |
| $I_y = \frac{h \cdot b^3}{12}$ | | | | | | | | | |
| $I_x =$ | 864,00 | cm ⁴ | | | | | | | |
| $I_y =$ | 216,00 | cm ⁴ | | | | | | | |
| Calcular | | | | | | | | | |
| Módulo de Resistência | | | | | | | | | |
| $W_x = \frac{b \cdot h^2}{6}$ | | | | | | | | | |
| $W_y = \frac{h \cdot b^2}{6}$ | | | | | | | | | |
| $W_x =$ | 144,00 | cm ³ | | | | | | | |
| $W_y =$ | 72,00 | cm ³ | | | | | | | |
| Calcular | | | | | | | | | |

Fonte: Autoria própria através do software Jwood (2019).

Figura 22 – Esforço máximo de compressão na diagonal de madeira

| Classe de Resistência | kmod1 e 2 | kmod3 | Geometria | Tração | Compressão | Flexão | Verificações - Flexão | Flexocompressão | Relatório |
|---|-----------|---------------------|-----------|----------|------------|--------|-----------------------|-----------------|-----------|
| Definição de $f_{c0,d}$ | | | | | | | | | |
| $f_{c0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c0,k}}{Y_w}$ | | $Y_{wt} =$ | 1,4 | | | | | | |
| kmod = | 0,560 | | | | | | | | |
| $f_{c0,k} =$ | 3,0 | kN/cm ² | | | | | | | |
| $f_{c0,d} =$ | 1,2000 | kN/cm ² | Calcular | | | | | | |
| Cálculo de $E_{0,05}$ | | | | | | | | | |
| $E_{0,05} = 0,7 \cdot E_{c0,m}$ | | | | | | | | | |
| $E_{c0,m} =$ | 1450,0 | kN/cm ² | | | | | | | |
| $E_{0,05} =$ | 1015,00 | kN/cm ² | Calcular | | | | | | |
| Cálculo de $\lambda_{rel,x}$ e $\lambda_{rel,y}$ | | | | | | | | | |
| $\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}}$ | | $\lambda_{rel,x} =$ | 0,857 | | | | | | |
| $\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}}$ | | $\lambda_{rel,y} =$ | 1,714 | Calcular | | | | | |
| Cálculo de k_x e k_y | | | | | | | | | |
| BC = | 0,2 | | | | | | | | |
| $k_x = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2]$ | | | | | | | | | |
| $k_y = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2]$ | | | | | | | | | |
| $k_x =$ | 0,923 | $k_y =$ | 2,111 | Calcular | | | | | |
| Cálculo de k_{cx} e k_{cy} | | | | | | | | | |
| $k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}}$ | | | | | | | | | |
| $k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{(k_y)^2 - (\lambda_{rel,y})^2}}$ | | | | | | | | | |
| $k_{cx} =$ | 0,790 | $k_{cy} =$ | 0,299 | Calcular | | | | | |
| Resistência à Compressão | | | | | | | | | |
| $N_{c,d} = k_{c(x,y)} \cdot f_{c0,d} \cdot A$ | | | | | | | | | |
| $N_{c,d} =$ | 25,844 | kN | Calcular | | | | | | |

Fonte: Autoria própria através do software Jwood (2019).

Figura 23 – Verificação à flexocompressão na diagonal de madeira

The screenshot shows a software interface for wood design verification, organized into several panels:

- Classe de Resistência:** kmod1 e 2, kmod3, Geometria, Tração, Compressão, Flexão, Verificações - Flexão, Flexocompressão, Relatório.
- Propriedades da peça:**
 - A = 72.0 cm²
 - f_{co,d} = 1.2000 kN/cm²
 - k_{cx} = 0.790
 - k_{cy} = 0.299
 - k_M = 1.00
- Excentricidade mínima e esforços:**
 - N_{c,d} = 6.78 kN
 - $E_{min} = \frac{L}{300}$
 - M_d = N_d * E_{min}
 - M_{x,d} = 3.88 kN.cm
 - E_{min} = 0.57 cm
 - M_{y,d} = 0.00 kN.cm
- Verificações para λ_{rel} ≤ 0,3:**
 - Equation 1: $\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{co,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{co,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{co,d}} \leq 1$
 - Equation 2: $\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{co,d}}\right)^2 + k_M \cdot \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{co,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{co,d}} \leq 1$
 - Results: ≤ 1, ≤ 1
- Cálculo das Tensões Excêntricas:**
 - $\sigma_{xd} = \frac{M_{xd}}{W_x}$, $\sigma_{yd} = \frac{M_{yd}}{W_y}$
 - σ_{Mx,d} = 0.03 kN/cm²
 - σ_{My,d} = 0.00 kN/cm²
 - $\sigma_{Ncd} = \frac{N_d}{A}$, σ_{Nc,d} (kN/cm²) = 0.09
- Elbeltezes Relativas:**
 - λ_{rel,y} = 1.714
 - λ_{rel,x} = 0.857
- Verificações para λ_{rel} > 0,3:**
 - Equation 1: $\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cx} \cdot f_{co,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{co,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{co,d}} \leq 1$
 - Equation 2: $\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cy} \cdot f_{co,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{co,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{co,d}} \leq 1$
 - Results: 0.17 ≤ 1, 0.40 ≤ 1

At the bottom right, it says **PASSOU!**

Fonte: Autoria própria através do software Jwood (2019).

4) Montante

Para o montante principal, têm-se o mesmo esforço de tração máximo que o da barra do banzo inferior. Contudo, como os esforços nos montantes secundários são muito baixos, para estes irá se adotar peças duplas de seção 2,5 cm por 10 cm, sendo estas barras pregadas nos banzos.

4.2 Vão de 8m Aço Laminado

4.2.1 Caracterização do edifício

O edifício é o mesmo do item 4.1.1.

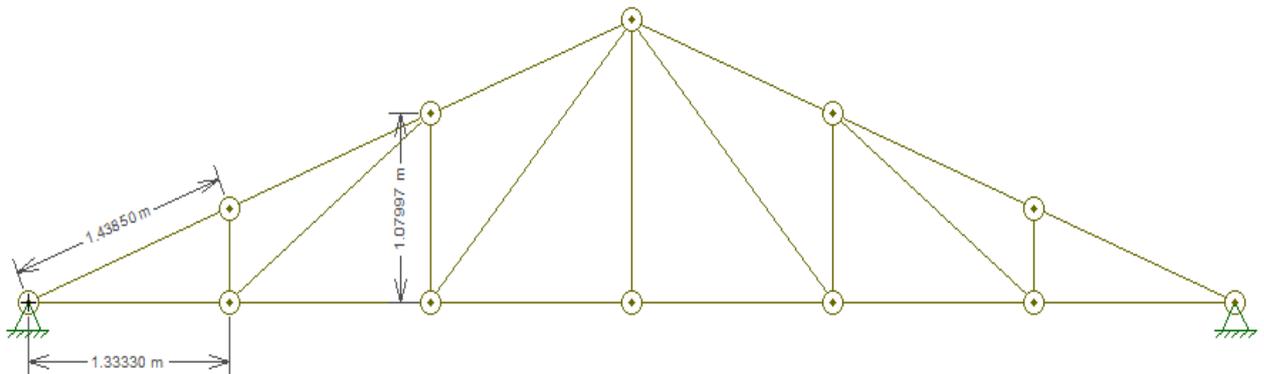
4.2.2 Materiais

Todas as peças são de aço ASTM A-36, por ser um dos mais utilizados, possuindo boas propriedades mecânicas. Essas propriedades são indicadas no item 2.2.2.

4.2.3 Sistema estrutural

O sistema estrutural é apresentado na figura 24. Foi utilizada uma tesoura do tipo Pratt, pois para o material utilizado, o aço, tem como vantagem as barras verticais trabalhando à compressão, sendo seus comprimentos menores do que as diagonais tracionadas, portanto, os comprimentos de flambagem são reduzidos. As telhas, ripas e caibros são os mesmos do item 4.1.3.

Figura 24 – Trelça Pratt vão de 8 metros



Fonte: Autoria própria através do software Ftool (2019).

4.2.4 Ações na estrutura

As cargas adotadas na estrutura seguem as determinações do item 4.7 da NBR 8800:2008.

4.2.4.1 Cargas permanentes

As cargas de telhado, ripas e caibros são as mesmas do item 4.1.4.1, já que são utilizados os mesmo materiais.

O peso próprio da treliça é calculado considerando o peso dos perfis pré-adotados e é igual a 0,04 KN/m².

Para as terças utiliza-se o perfil U 76 x 6,11, de peso próprio 0,06 KN/m.

4.2.4.2 Carga acidental

As cargas acidentais são as mesmas determinadas pelo item 4.1.4.2.

4.2.4.3 Carga de vento

As cargas de vento são as mesmas determinadas pelo item 4.1.4.3.

4.2.4.4 Combinações das ações

A seguir, são demonstrados os coeficientes de ponderação e fatores de combinação adotados nessas combinações. Estes valores foram adotados foram adotados seguindo a NBR 8800:2008.

- a) Ações permanentes: $\gamma_g = 1,25$ para situações desfavoráveis e $\gamma_g = 1,0$ para efeitos favoráveis a segurança;
- b) Ações variáveis normais: $\gamma_q = 1,5$;

Os fatores de combinação adotados são:

- a) Pressão dinâmica do vento: $\psi_0 = 0,6$;
- b) Sobrecarga (ações variáveis causadas pelo uso e ocupação): $\psi_0 = 0,8$.

Com esses coeficientes, e, utilizando a equação 4, descrita no item 2.3.5 deste trabalho, estabeleceram-se as combinações dos esforços mais desfavoráveis para a estrutura.

4.2.5 Dimensionamento dos elementos

Com as cargas e geometria da estrutura definidas, calcula-se os esforços internos através do software Ftool, e, com o auxílio do software VisualMetal, faz-se a implementação das combinações de ações atuantes na estrutura, e verificação das seções escolhidas, e deslocamentos da estrutura.

4.2.5.1 Terça

O dimensionamento das terças é feito diretamente pelo software VisualMetal.

Dados:

- Comprimento da terça: 2 m;
- Seção transversal: Perfil U 76 x 6,11;
- Carga permanente – peso próprio: 0,06 KN/m;
- Carga permanente – ripas + caibros + telhado: 0 71 KN/m²;
- Sobrecarga acidental: 1 KN no meio do vão da terça.

Com o software Ftool foram calculados os momentos fletores e esforços cortantes na terça, para os eixos x e y, e em seguida esses valores foram introduzidos no VisualMetal para o dimensionamento, em KN.cm e KN, respectivamente.

A figura 25 mostra as propriedades geométricas do perfil, a inserção das cargas já combinadas, assim como os esforços solicitantes. Além disso, mostra os valores de esforços resistentes para momento fletor e força cortante, assim como para a combinação destes. Esses esforços já consideram os efeitos de flambagem que podem vir a acontecer.

Figura 25 – Cargas e esforços na terça de aço laminado

Identificação
Perfil U 76 x 6,11

Dimensões

| | | | | | |
|----|---------|----|----------------------|----|----------------------|
| d | 76 mm | Ag | 7,78 cm ² | Wx | 18,1 cm ³ |
| tw | 4,32 mm | Ix | 71 cm ⁴ | Wy | 3,43 cm ³ |
| bf | 36 mm | Iy | 8,7 cm ⁴ | x | 1,1 cm |
| tf | 6 mm | It | 1,1 cm ⁴ | P | 6,11 kgf/m |

Compr. Flambagem

| | |
|------|--------|
| Lfix | 200 cm |
| Lfly | 200 cm |
| Lb | 200 cm |

Solicitações

| | |
|-----|-----------|
| Nd | 0,00 kN |
| Vd | 2,18 kN |
| Mdx | 134 kN.cm |
| Mdy | 54 kN.cm |

Resultados

| | | |
|-----------|--------------|----------|
| Rd(Nd) | 0,00 kN | |
| Rd(Vd) | 37,32 kN | OK! |
| Rd(Mdx) | 368,75 kN.cm | OK! |
| Rd(Mdy) | 96,47 kN.cm | OK! |
| Rd(Md+Nd) | 0,92 | <= 1 OK! |

Perfil indicado para elementos sujeitos à flexão composta (Ex.: terças)

Calcular Mais Leve Relatório Ok

Fonte: Autoria própria através do software VisualMetal (2019).

A flecha limite da terça é igual ao comprimento da terça dividido por 180, nesse caso igual a 1,11 cm. A flecha calculada pelo software Ftool é igual a 0,29 cm, o que mostra que a terça atende à condição de deslocamento.

4.2.5.2 Treliça

O dimensionamento das barras da treliça é feito pelo software VisualMetal.

Dados:

- a) Seção transversal do banzo superior e banzo inferior: Perfil U 102 x 9,3;
- b) Seção transversal das diagonais e montantes: Perfil cantoneira 38,1 x 38,1 x 1,83;
- c) Carga permanente – peso próprio: 0,04 KN/m²;
- d) Carga permanente – terça: 0,06 KN/m;
- e) Carga permanente – ripas + caibros + telhado: 0 71 KN/m²;
- f) Sobrecarga acidental: 0,3 KN/m².

As cargas nos nós são calculadas e aplicadas do mesmo modo que foi descrito no item 4.1.5.2. Os esforços máximos de cada barra são mostrados na tabela 10.

Tabela 10 – Esforços máximos por elemento estrutural de aço laminado

| Elemento Estrutural | Carga Permanente (KN) | Carga Acidental (KN) | Combinação (KN) |
|---------------------|-----------------------|----------------------|-----------------|
| Banzo Superior | -13,78 | -4,44 | -23,9 |
| Banzo Inferior | +12,78 | +4,11 | +22,14 |
| Diagonal | +4,02 | +1,29 | +6,96 |
| Montante | -3,1 | -1 | -5,375 |

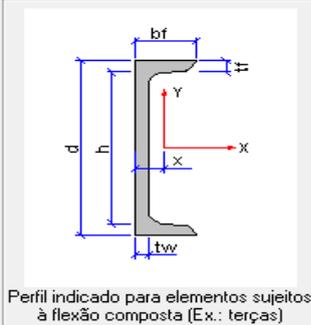
Fonte: Autoria própria (2019).

1) Banzo Superior

A figura 26 mostra as propriedades geométricas do perfil, a inserção das cargas combinadas, assim como o esforços solicitante obtido na tabela 10. Além disso, mostra o esforço resistente de compressão da peça, já considerando a verificação de sua esbeltez.

Figura 26 – Carga e esforços no banzo superior de aço laminado

| Identificação | | | | | |
|--------------------|---------|----|----------------------|----|----------------------|
| Perfil U 102 x 9,3 | | | | | |
| Dimensões | | | | | |
| d | 102 mm | Ag | 11,9 cm ² | Wx | 34,3 cm ³ |
| tw | 6,27 mm | Ix | 174 cm ⁴ | Wy | 5,24 cm ³ |
| bf | 42 mm | Iy | 16,2 cm ⁴ | x | 1,15 cm |
| tf | 8 mm | IT | 2,6 cm ⁴ | P | 9,3 kgf/m |



Perfil indicado para elementos sujeitos à flexão composta (Ex.: terças)

| Compr. Flambagem | | Solicitações | | Resultados | |
|------------------|----------|--------------|----------|------------|----------------------|
| Lflx | 143,8 cm | Nd | -23,9 kN | Rd(Nd) | -99,06 kN Ok! |
| Lfly | 143,8 cm | Vd | 0 kN | Rd(Vd) | 0,00 kN |
| Lb | 143,8 cm | Mdx | 0 kN.cm | Rd(Mdx) | 0,00 kN.cm |
| | | Mdy | 0 kN.cm | Rd(Mdy) | 0,00 kN.cm |
| | | | | Rd(Md+Nd) | 0,00 <= 1 |

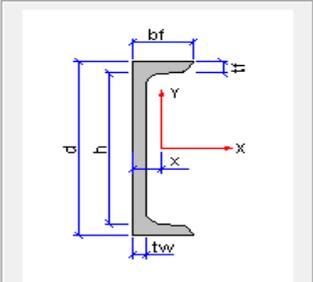
Fonte: Autoria própria através do software VisualMetal (2019).

2) Banzo Inferior

A figura 27 mostra as propriedades geométricas do perfil, a inserção das cargas combinadas, assim como o esforço solicitante obtido na tabela 10. Além disso, mostra o esforço resistente de tração da peça, já considerando a verificação de sua esbeltez.

Figura 27 – Carga e esforços no banzo inferior de aço laminado

| Identificação | | | | | |
|---------------------------|---------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|
| Perfil U 102 x 9,3 | | | | | |
| Dimensões | | | | | |
| d | 102 mm | Ag | 11,9 cm ² | W _x | 34,3 cm ³ |
| tw | 6,27 mm | I _x | 174 cm ⁴ | W _y | 5,24 cm ³ |
| bf | 42 mm | I _y | 16,2 cm ⁴ | x | 1,15 cm |
| tf | 8 mm | IT | 2,6 cm ⁴ | P | 9,3 kgf/m |



Perfil indicado para elementos sujeitos à flexão composta (Ex.: terças)

| Compr. Flambagem | | Solicitações | | Resultados | |
|------------------|----------|-----------------|----------|--|----------------------|
| L _{flx} | 133,3 cm | N _d | 22,14 kN | R _d (N _d) | 267,75 kN Ok! |
| L _{fly} | 133,3 cm | V _d | 0 kN | R _d (V _d) | 0,00 kN |
| L _b | 133,3 cm | M _{dx} | 0 kN.cm | R _d (M _{dx}) | 0,00 kN.cm |
| | | M _{dy} | 0 kN.cm | R _d (M _{dy}) | 0,00 kN.cm |
| | | | | R _d (M _d +N _d) | 0,00 <= 1 |

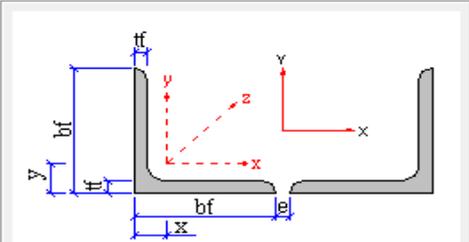
Fonte: Autoria própria através do software VisualMetal (2019).

3) Diagonal

A figura 28 mostra as propriedades geométricas do perfil, a inserção das cargas combinadas, assim como o esforço solicitante obtido na tabela 10. Além disso, mostra o esforço resistente de tração da peça, já considerando a verificação de sua esbelteza.

Figura 28 – Carga e esforços na diagonal de aço laminado

| Identificação | | | |
|--|----------|----------------------------------|----------------------|
| Perfil L 38,1 x 1,83 | | | |
| Dimensões | | | |
| bf* | 38,1 mm | Ag* | 2,32 cm ² |
| tf* | 3,2 mm | I _x =I _y * | 3,33 cm ⁴ |
| =y* | 1,07 cm | r _z * | 0,76 cm |
| P* | | 1,83 kgf/m | |
| Dado referente a uma única cantoneira | | | |
| <input type="button" value="↩"/> <input type="button" value="↪"/> <input type="button" value="⏪"/> <input type="button" value="⏩"/> <input type="button" value="⏴"/> <input type="button" value="⏵"/> <input type="button" value="⏶"/> <input type="button" value="⏷"/> <input type="button" value="⏸"/> <input type="button" value="⏹"/> <input type="button" value="⏺"/> | | | |
| Espaçamento | | Solicitações | |
| e | 0,00 mm | N _d | 6,96 kN |
| Compr. Flambagem | | | |
| L _{flx} | 171,6 cm | | |
| L _{fly} | 171,6 cm | | |



Perfil indicado para elementos sujeitos à tração ou compressão (Ex.: elementos de treliça)

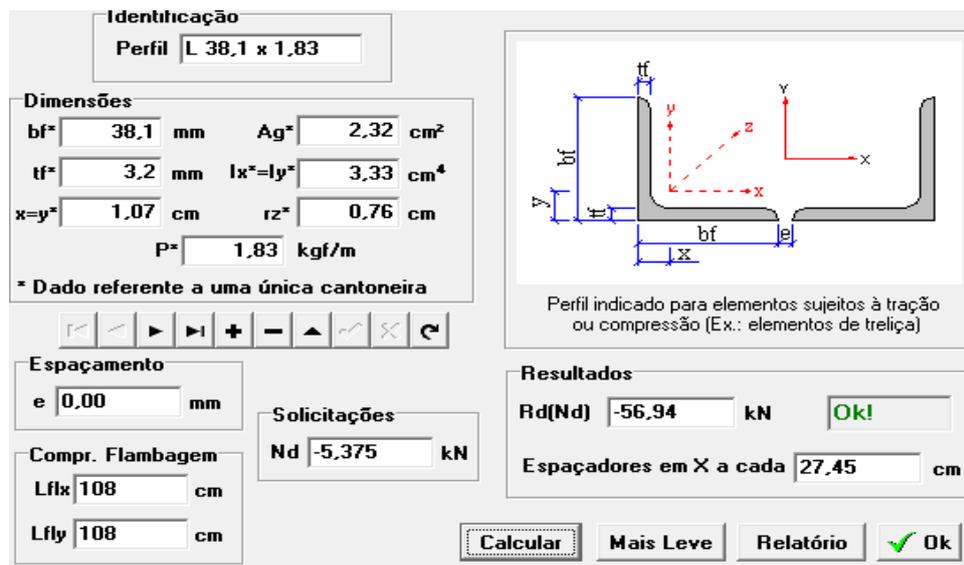
| Resultados | |
|----------------------------------|----------------------|
| R _d (N _d) | 104,40 kN Ok! |
| Espaçadores em X a cada | 43,61 cm |

Fonte: Autoria própria através do software VisualMetal (2019).

4) Montante

A figura 29 mostra as propriedades geométricas do perfil, a inserção das cargas combinadas, assim como o esforço solicitante obtido na tabela 10. Além disso, mostra o esforço resistente de compressão da peça, já considerando a verificação de sua esbeltez.

Figura 29 – Carga e esforços no montante de aço laminado



Identificação
Perfil L 38,1 x 1,83

Dimensões
 bf^* 38,1 mm Ag^* 2,32 cm²
 tf^* 3,2 mm $I_x^*=I_y^*$ 3,33 cm⁴
 $x=y^*$ 1,07 cm r_z^* 0,76 cm
 P^* 1,83 kgf/m
 * Dado referente a uma única cantoneira

Espaçamento
e 0,00 mm

Compr. Flambagem
Lfix 108 cm
Lfly 108 cm

Solicitações
Nd -5,375 kN

Resultados
Rd(Nd) -56,94 kN **Ok!**
Espaceadores em X a cada 27,45 cm

Calculador Mais Leve Relatório **Ok**

Perfil indicado para elementos sujeitos à tração ou compressão (Ex.: elementos de treliça)

Fonte: Autoria própria através do software VisualMetal (2019).

4.3 Vão de 8m Aço Dobrado

4.3.1 Caracterização do edifício

O edifício é o mesmo do item 4.1.1.

4.3.2 Materiais

O material é o mesmo do item 4.2.2.

4.3.3 Sistema estrutural

O sistema estrutural é o mesmo do item 4.2.3.

4.3.4 Ações na estrutura

As cargas adotadas na estrutura seguem as determinações do item 6 da NBR 14762:2010.

4.3.4.1 Cargas permanentes

As cargas de telhado, ripas e caibros são as mesmas do item 4.1.4.1, já que são utilizados os mesmo materiais.

O peso próprio da treliça é calculado considerando o peso dos perfis pré-adotados e é igual a 0,05 KN/m².

Para as terças utiliza-se o perfil Ue 75 x 40 x 15 x 2,0, de peso próprio 0,027 KN/m.

4.3.4.2 Carga acidental

As cargas acidentais são as mesmas determinadas pelo item 4.1.4.2.

4.3.4.3 Carga de vento

As cargas de vento são as mesmas determinadas pelo item 4.1.4.3.

4.3.4.4 Combinações das ações

A seguir, são demonstrados os coeficientes de ponderação e fatores de combinação adotados nessas combinações. Estes valores foram adotados seguindo a NBR 14762:2010.

- a) Ações permanentes: $\gamma_g = 1,25$ para situações desfavoráveis e $\gamma_g = 1,0$ para efeitos favoráveis a segurança;
- b) Ações variáveis normais: $\gamma_q = 1,5$;

Os fatores de combinação adotados são:

- a) Pressão dinâmica do vento: $\psi_0 = 0,6$;

b) Sobrecarga (ações variáveis causadas pelo uso e ocupação): $\psi_0 = 0,8$.

Com esses coeficientes, e, utilizando a equação 4, descrita no item 2.3.5 deste trabalho, estabeleceram-se as combinações dos esforços mais desfavoráveis para a estrutura.

4.3.5 Dimensionamento dos elementos

Com as cargas e geometria da estrutura definidas, calcula-se os esforços internos através do software Ftool, e, com o auxílio do software DimPerfil, faz-se a implementação das combinações de ações atuantes na estrutura, e verificação das seções escolhidas, e deslocamentos da estrutura.

4.3.5.1 Terça

O dimensionamento das terças é feito diretamente pelo software DimPerfil.

Dados:

- a) Comprimento da terça: 2 m;
- b) Seção transversal: Perfil Ue 75 x 40 x 15 x 2,0;
- c) Carga permanente – peso próprio: 0,027 KN/m;
- d) Carga permanente – ripas + caibros + telhado: 0 71 KN/m²;
- e) Sobrecarga acidental: 1 KN no meio do vão da terça.

Com o software Ftool foram calculados os momentos fletores e esforços cortantes na terça, para os eixos x e y, e em seguida esses valores foram introduzidos no DimPerfil para o dimensionamento, em KN.cm e KN, respectivamente.

A figura 30 mostra as propriedades geométricas do perfil, e a imagem 31 mostra a inserção das cargas já combinadas, assim como os esforços solicitantes. Além disso, mostra os valores de esforços resistentes para momento fletor e força cortante, assim como para a combinação destes. Esses esforços já consideram os efeitos de flambagem que podem vir a acontecer.

Figura 30 – Propriedades geométricas da terça de aço dobrado

Escolha do Perfil Cálculo dos Esforços

Dimensões do perfil [cm] **Escolha do Perfil (NBR 6355)**

bw = 7.5 t = 0.2
 bf = 4 α =
 D = 1.5 β = 90
 De = θ =

Propriedades Geométricas a serem calculadas

Seção Bruta Deslocamentos
 Seção Efetiva NBR 14762/2010

Tensão de trabalho - σ: 25 kN/cm² **Atualizar**

N 10 kN
 Mx 10 kN.cm
 My 10 kN.cm

Propriedades Geométricas da Seção

Calculo das Propriedades da Seção

bf = 4 cm bw = 7.5 cm
 α = 0 ° β = 90 °
 Ix = 30.29454 cm⁴ Iy = 7.88633 cm⁴
 It = 0.0457 cm⁴ xg = -1.50247 cm
 x0 = -3.44715 cm y0 = 0 cm
 rx = 2.96888 cm ry = 1.51478 cm
 Wy = 3.15766 cm³ Iw = 109.96496 cm⁶
 φp = 0 ° m = 2.69804 kg/m

D =
 A =
 Ix =
 yG =
 z0 =
 Wx =
 zG =

Fonte: Autoria própria através do software DimPerfil (2019).

Figura 31 – Cargas e esforços da terça de aço dobrado

Escolha do Perfil Cálculo dos Esforços

Dimensões (cm)

α = 0
 bw = 5
 bf = 2.5
 D = 1
 t = 0.12
 β = 90

Comprimentos (cm)

Lx: 200
 Ly: 200
 Lt: 200

Esforços Solicitantes

Nd: kN
 Mxd: 128.5 kN.cm
 Myd: 51.9 kN.cm
 Vd: 1.48 kN

Coefficiente de Momento

Cb: 1
 Em X
 Cb: 1
 Em Y

Resultado: **NBR 14762:2001**
Flexão e Cisalhamento 0,86 (se <=1, ok!)

CALCULAR Relatório: Limpar anterior

Item a ser calculado: Ver

Inequações de verificação p/ Flexão com Cisalhamento

NBR 14762:2010

- Flexão Composta
 - Nrd
 - Mrd
 - Mxrd
 - Myrd
 - Flexão Composta
- Cortante
- Flexão e Cisalhamento**

1,08(E.kv/Iy)^{0,5} = 0,571
 h/t <= 1,08(E.kv/fy)^{0,5}
 γ = 1,1
 Aw = 1,34 cm²
 Vrd = 17,54 kN
 MxRd = 139,13 kN.cm
 VRd = 17,54 kN
 MSd = 128,5 kN.cm
 VSd = 1,48 kN
 Verificação:
 => 0,85 + 0,01 <= 1
 => 0,86 <= 1 - Ok!

Fonte: Autoria própria através do software DimPerfil (2019).

A flecha limite da terça é igual ao comprimento da terça dividido por 180, nesse caso igual a 1,11 cm. A flecha calculada pelo software Ftool é igual a 0,278 cm, o que mostra que a terça atende à condição de deslocamento.

4.3.5.2 Treliça

O dimensionamento das barras da treliça é feito pelo software DimPerfil.

Dados:

- a) Seção transversal do banzo superior e banzo inferior: Perfil U 100 x 40 x 2,65;
- b) Seção transversal das diagonais e montantes: Perfil U 75 x 40 x 2,65;
- c) Carga permanente – peso próprio: 0,05 KN/m²;
- d) Carga permanente – terço: 0,027 KN/m;
- e) Carga permanente – ripas + caibros + telhado: 0 71 KN/m²;
- f) Sobrecarga acidental: 0,3 KN/m².

As cargas nos nós são calculadas e aplicadas do mesmo modo que foi descrito no item 4.1.5.2. Os esforços máximos de cada barra são mostrados na tabela 11.

Tabela 11 – Esforços máximos por elemento estrutural de aço laminado

| Elemento Estrutural | Carga Permanente (KN) | Carga Acidental (KN) | Combinação (KN) |
|---------------------|-----------------------|----------------------|-----------------|
| Banzo Superior | -13,96 | -4,44 | -24,11 |
| Banzo Inferior | +12,9 | +4,11 | +22,29 |
| Diagonal | +4,1 | +1,29 | +7,06 |
| Montante | -3,135 | -1 | -5,41 |

Fonte: Autoria própria (2019).

1) Banzo Superior

A figura 32 mostra as propriedades geométricas do perfil, e a figura 33 mostra a inserção das cargas combinadas, assim como os esforços solicitantes obtidos na tabela 11. Além disso, mostra o esforço resistente de compressão da peça, já considerando os efeitos de flambagem.

Figura 32 – Propriedades geométricas do banzo superior e inferior de aço dobrado

Escolha do Perfil | Cálculo dos Esforços

Dimensões do perfil [cm] **Escolha do Perfil (NBR 6355)**

bw = 10 t = 0.265
 bf = 4 α =
 D = β = 90
 De = θ =

Propriedades Geométricas a serem calculadas

Seção Bruta Deslocamentos
 Seção Efetiva NBR 14762/2010 N 10 kN
 Mx 10 kN.cm
 My 10 kN.cm

Tensão de trabalho - σ : 2,203 kN/cm² **Atualizar**

Propriedades Geométrica da Seção

Calculo das Propriedades da Seção

| | | |
|-------------------------------|-------------------------------|-------|
| bf = 4 cm | bw = 10 cm | α = 0 |
| A = 4.53913 cm ² | Ix = 66.75069 cm ⁴ | Iy = |
| Ixy = 0 cm ⁴ | It = 0.10606 cm ⁴ | xg = |
| yg = -5 cm | x0 = -2.2681 cm | y0 = |
| r0 = 4.61953 cm | rx = 3.83479 cm | ry = |
| Wx = 13.35014 cm ³ | Wy = 2.25992 cm ³ | Iw = |
| zm = 0.3975 cm | φp = 0 ° | m = |

Fonte: Autoria própria através do software DimPerfil (2019).

Figura 33 – Carga e esforços do banzo superior de aço dobrado

File Help

Escolha do Perfil | Cálculo dos Esforços

Dimensões (cm)

D = 0
 α = 0
 bw = 10
 bf = 4
 t = 0.265
 β = 90

Comprimentos (cm)

Lx: 143.8
 Ly: 143.8
 Lt: 143.8

Esforços Solicitantes

Nd: -24.11 kN
 Mxd: 0 kN.cm
 Myd: 0 kN.cm
 Vd: 0 kN

Coefficiente de Momento

Em X: Cb: 1
 Em Y: Cb: 1

Resultados

Resultado: NBR 14762:2001
Nrd = 44,8 kN

CALCULAR Relatório: Limpar anterior

Abriu Relatório Salvar Relatório Gerar Tabela

Item a ser calculado: Var

Esforço Resistente à Compressão Centrada

NBR 14762:2010

- Flexão Composta
 - Nrd
 - Nt
 - Nc_MLE
 - Ndist
 - Larguras efetivas
 - Mrd
 - Mxrd
 - Myrd
 - Flexão Composta

Calculo

flambagem por flexão Y-Y

A = 4,54 cm²
 λ0 = 1,3
 X = 0,49
 σ = 11,84 kN/cm²

MÉTODO DAS LARGURAS EFETIVAS (MLE)

Aef_MLE = 4,54 cm²
 γ = 1,2
 Nc = 44,8 kN
 Nrd = 44,8 kN

Fonte: Autoria própria através do software DimPerfil (2019).

2) Banzo Inferior

A figura 32 mostra as propriedades geométricas do perfil, e a figura 35 mostra a inserção das cargas combinadas, assim como o esforço solicitante obtido na tabela 10. Além disso, mostra o esforço resistente de tração da peça.

Figura 35 – Carga e esforços no banzo inferior de aço dobrado

The screenshot shows the 'Cálculo dos Esforços' (Calculation of Efforts) window in the DimPerfil software. The interface is divided into several sections:

- Dimensões (cm):** D = 0, $\alpha = 0$, $b_w = 10$, $b_f = 4$, $t = 0,265$, $\beta = 90$.
- Comprimentos (cm):** Lx: 133.3, Ly: 133.3, Lt: 133.3.
- Esforços Solicitantes:** Nd: 22.29 kN, Mxd: 0 kN.cm, Myd: 0 kN.cm, Vd: 0 kN.
- Coefficiente de Momento:** Em X Cb: 1, Em Y Cb: 1.
- Resultados:** **Resultado: NBR 14762:2001**, **Nt = 99,04 kN**.
- Item a ser calculado:** Esforço Resistente à Tração Centrada.
- Tree View:** NBR 14762:2010 > Flexão Composta > Nrd > Nt.
- Calculation Details:**
 - $\gamma = 1,35$, $N_{t,Rd} = 134,49 \text{ kN}$
 - Cálculo para ruptura na seção líquida na região da ligação:
 - $C_t = 0,9$, $A_n = 4,54 \text{ cm}^2$, $f_u = 40 \text{ kN/cm}^2$
 - $\gamma = 1,65$, $N_{t,Rd} = 99,04 \text{ kN}$
 - O esforço resistente à tração é o menor valor calculado acima: $N_{t,Rd} = 99,04 \text{ kN}$

Fonte: Autoria própria através do software DimPerfil (2019).

3) Diagonal

A figura 36 mostra as propriedades geométricas do perfil, e a figura 37 mostra a inserção das cargas combinadas, assim como o esforço solicitante obtido na tabela 10. Além disso, mostra o esforço resistente de tração da peça

Figura 36 – Propriedades geométricas da diagonal e montante de aço dobrado

Escolha do Perfil | Cálculo dos Esforços

Dimensões do perfil [cm] **Escolha do Perfil (NBR 6355)**

$b_w = 7.5$ $t = 0.265$
 $b_f = 4$ $\alpha =$
 $D =$ $\beta = 90$
 $De =$ $\theta =$

Propriedades Geométricas a serem calculadas

Seção Bruta
 Seção Efetiva NBR 14762/2010

Deslocamentos

N 10 kN
 Mx 10 kN.cm
 My 10 kN.cm

Atualizar

Calcula as Propriedades Geom. da Seção Efetiva

Propriedades Geométrica da Seção

Calculo das Propriedades da Seção

| | | |
|---------------------------------|----------------------------------|--------------|
| $b_f = 4$ cm | $b_w = 7.5$ cm | $\alpha = 0$ |
| $A = 3.87663$ cm ² | $I_x = 33.97366$ cm ⁴ | $I_y =$ |
| $I_{xy} = 0$ cm ⁴ | $I_t = 0.09055$ cm ⁴ | $x_g =$ |
| $y_g = -3.75$ cm | $x_0 = -2.5307$ cm | $y_0 =$ |
| $r_0 = 4.09376$ cm | $r_x = 2.96036$ cm | $r_y =$ |
| $W_x = 9.05964$ cm ³ | $W_y = 2.16869$ cm ³ | $I_w =$ |
| $r_m = 0.3975$ cm | $\phi_p = 0$ ° | $m = 3$ |

Diagrama de coordenadas: CT, CG

Fonte: Autoria própria através do software DimPerfil (2019).

Figura 37 – Carga e esforços na diagonal de aço dobrado

Escolha do Perfil | Cálculo dos Esforços

Dimensões (cm)

$D = 0$
 $\alpha = 0$
 $b_w = 7.5$
 $b_f = 4$
 $t = 0.265$
 $\beta = 90$

Comprimentos (cm)

$L_x = 210$
 $L_y = 210$
 $L_t = 210$

Esforços Solicitantes

$N_d = 7.06$ kN
 $M_{xd} = 0$ kN.cm
 $M_{yd} = 0$ kN.cm
 $V_d = 0$ kN

Coefficiente de Momento

$C_b = 1$
 $C_b = 1$

Resultado: **NBR 14762:2001**

Nt **84,58 kN**

CALCULAR

Relatório: Limpar anterior

Abrir Relatório | Salvar Relatório | Gerar Tabela

$\gamma = 1,35$
 $N_{t,Rd} = 114,86$ kN

Cálculo para ruptura na seção líquida na região da ligação:

$C_t = 0,9$
 $A_n = 3,88$ cm²
 $f_u = 40$ kN/cm²
 $\gamma = 1,65$
 $N_{t,Rd} = 84,58$ kN

O esforço resistente à tração é o menor valor calculado acima:

$N_{t,Rd} = 84,58$ kN

Fonte: Autoria própria através do software DimPerfil (2019).

4) Montante

A figura 36 mostra as propriedades geométricas do perfil, e a figura 38 mostra a inserção das cargas combinadas, assim como o esforço solicitante obtido na

tabela 10. Além disso, mostra o esforço resistente de compressão da peça, já considerando os efeitos de flambagem.

Figura 38 – Carga e esforços no montante de aço dobrado

The screenshot shows the 'Cálculo dos Esforços' (Calculation of Efforts) window in the DimPerfil software. It is divided into several sections:

- Escolha do Perfil** (Profile Selection): Shows dimensions in cm: $D = 0$, $\alpha = 0$, $b_w = 7.5$, $b_f = 4$, $t = 0.265$, $\beta = 90$.
- Comprimentos (cm)** (Lengths): $L_x = 108$, $L_y = 108$, $L_t = 108$.
- Esforços Solicitantes** (Applied Efforts): $N_d = -5.41$ kN, $M_{xd} = 0$ kN.cm, $M_{yd} = 0$ kN.cm, $V_d = 0$ kN.
- Coefficiente de Momento** (Moment Coefficient): $C_b = 1$ for both Em X and Em Y.
- Resultados** (Results): Displays the final result: **Resultado: NBR 14762:2001** and **Nrd = 50,1 kN**.
- Item a ser calculado:** (Item to be calculated): A tree view showing the calculation path: **Esforço Resistente à Compressão Centrada** > **NBR 14762:2001** > **Flexão Composta** > **Nrd**.
- Calculations:** Shows intermediate results: $\sigma = 29,01$ kN/cm², flambagem por flexo-torção, $A = 3,88$ cm², $\lambda_0 = 1,02$, $X = 0,65$, $\sigma = 15,51$ kN/cm². It also lists the **MÉTODO DAS LARGURAS EFETIVAS (MLE)** with $A_{ef_MLE} = 3,88$ cm², $\gamma = 1,2$, $N_c = 50,1$ kN, and $N_{rd} = 50,1$ kN.

Fonte: Autoria própria através do software DimPerfil.(2019)

4.4 Vão de 15m Madeira

4.4.1 Caracterização do edifício

Edificação industrial de duas águas, de planta retangular, com repetição de pórticos planos e travamentos longitudinais, com as seguintes características:

- Localização: São Luís – MA;
- Comprimento: 20 m;
- Pé direito: 5 m;
- Distância entre pórticos: 3 m;
- Cobertura em telha ondulada de fibrocimento;
- Um portão de 4,0 metros de largura por 2,5 metros de altura;
- Três janelas de 1,0 metros de largura por 1,1 metros de altura.

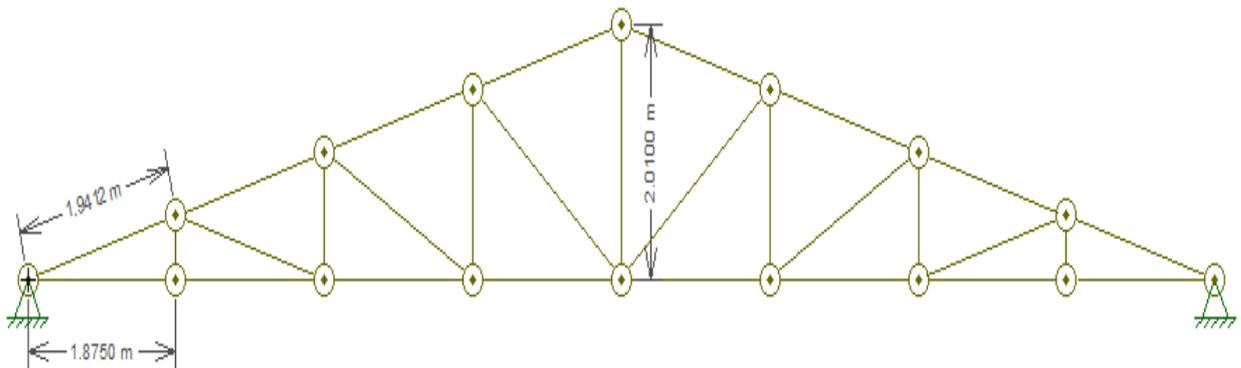
4.4.2 Materiais

O material utilizado é o mesmo do item 4.1.2.

4.4.3 Sistema estrutural

O sistema estrutural é apresentado na figura 39. Para a telha ondulada de fibrocimento foi adotada uma inclinação de 15°. Como as telhas de fibrocimento possuem comprimento maior, não será necessária a utilização de ripas e caibros, sendo apoiadas diretamente sobre as terças.

Figura 39 – Treliça Howe vão de 15 metros



Fonte: Autoria própria através do software Ftool (2019).

4.4.4 Ações na estrutura

As cargas adotadas na estrutura seguem as determinações do item 5.5 da NBR 7190:1997.

4.4.4.1 Carga permanente

O peso próprio da treliça e contraventamento são definidos pela fórmula empírica de Howe a seguir:

$$g_T = 0,0245 (1 + 0,33L) \quad (32)$$

- g_T – Peso próprio da estrutura;
- L – Vão da treliça.

Para o vão de 15 m têm-se o peso da treliça de 0,146 KN/m².

O peso das telhas é obtido através de catálogo de fabricantes e é igual a 0,186 KN/m².

Para as terças são utilizadas barras de seção 6 cm por 16 cm. Seu peso é definido diretamente pelo software Jwood e tem valor de 0,08 KN/m.

Para as terças deve ser considerado a inclinação em relação a horizontal, portanto, para o dimensionamento, suas usadas as projeções de suas cargas.

4.4.4.2 Carga Acidental

A NBR 6120:1980 define no item 2.2.1.4 que "Todo elemento isolado de cobertura (ripas, terças, e barras de banzo superior de treliças) deve ser projetado para receber na posição mais desfavorável, um carga vertical de 1 KN, além da carga permanente".

4.4.4.3 Carga de vento

As cargas de vento foram calculadas utilizando o software VisualVentos. Todos os resultados e considerações seguem o procedimento determinado pela NBR 6123:1988. Os dados necessários para o cálculo destas ações são indicados na figura 40.

Figura 40 – Dados geométricos e aberturas da edificação de vão de 15 m

Dimensões

Medidas

b 15 m a 20 m h 5 m Distância entre pórticos

b1 7,50 m a1 5,00 m a2 5,00 m p 3 m

β 15° h1 2,01 m

Confirmar

Área das aberturas

| Face | Fixa | Móvel |
|------|------------------|--------------------|
| A1 | 0 m ² | 1,1 m ² |
| A2 | 0 m ² | 1,1 m ² |
| A3 | 0 m ² | 1,1 m ² |
| B1 | 0 m ² | 0 m ² |
| B2 | 0 m ² | 0 m ² |
| B3 | 0 m ² | 0 m ² |
| C1 | 0 m ² | 10 m ² |
| C2 | 0 m ² | 0 m ² |
| D1 | 0 m ² | 0 m ² |
| D2 | 0 m ² | 0 m ² |

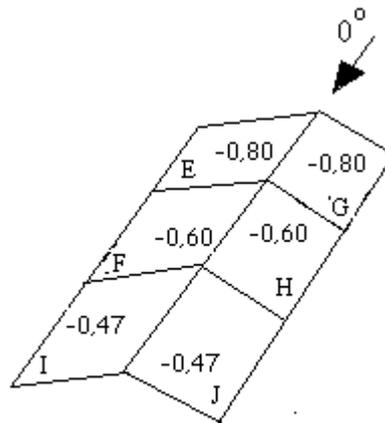
Fonte: Autoria própria através do software VisualVentos (2019).

- A velocidade básica do vento, V_0 , para a região da edificação é igual a 30 m/s.
- O fator topográfico, S_1 , é admitido para terreno plano ou fracamente acidentado, e possui valor igual a 1.
- O fator de rugosidade, S_2 , é obtido para categoria IV e classe A, e é igual a 0,82.
- O fator estatístico, S_3 , é admitido para grupo 2 e possui valor de 1.

A partir desses valores e utilizando as fórmulas 1 e 2 calcula-se a velocidade característica do vento, V_k , e a pressão do vento, q , respectivamente. V_k é igual a 24,6 m/s e q igual a 0,37 KN/m².

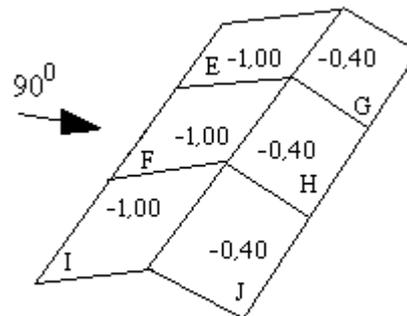
Em seguida, as figuras 41 e 42 mostram os coeficientes de pressão externos para o telhado.

Figura 41 – Coeficiente de pressão externa para telhados com vento a 0° : vão de 15 m



Fonte: Autoria própria através do software VisualVentos (2019).

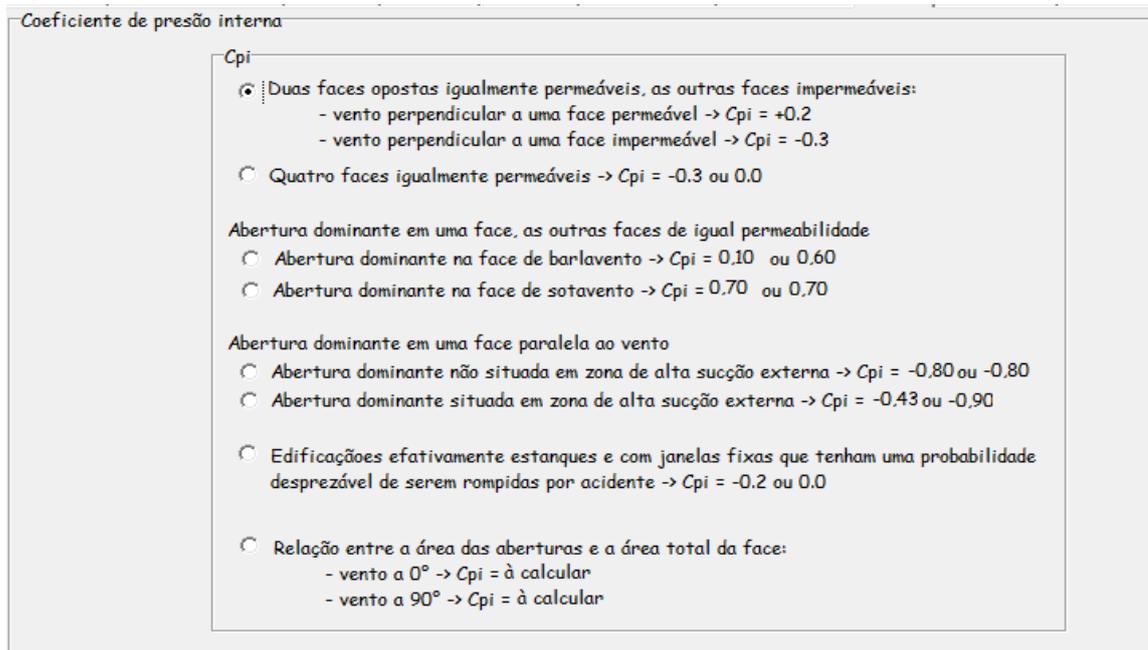
Figura 42 – Coeficiente de pressão externa para telhados com vento a 90° : vão de 15 m



Fonte: Autoria própria através do software VisualVentos (2019).

A figura 43 mostra os coeficientes de pressão interna, adotados de acordo com as características e posição do edifício.

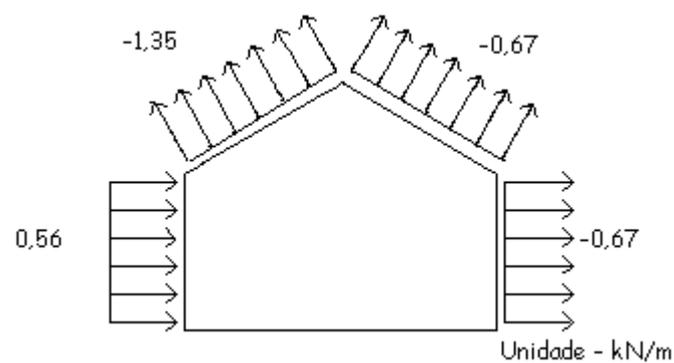
Figura 43 – Coeficientes de pressão interna para telhados



Fonte: Autoria própria através do software VisualVentos (2019).

E por último, a figura mostra 44 mostra o esforço final de vento, já considerando a combinação dos coeficientes internos e externos e sua área de influência. Foi escolhido o esforço mais desfavorável à estrutura.

Figura 44 – Esforço de vento treliça 15 metros



Fonte: Autoria própria através do software VisualVentos (2019).

4.4.4.4 Combinações das ações

As combinações de ações são utilizadas para determinar quais os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura. A seguir, são demonstrados os coeficientes de ponderação e fatores de combinação adotados nessas combinações. Estes valores foram adotados seguindo a NBR 7190 1997.

- a) Ações permanentes de grande variabilidade: $\gamma_g = 1,4$ para situações desfavoráveis e $\gamma_g = 0,9$ para efeitos favoráveis a segurança;
- b) Ações variáveis normais: $\gamma_q = 1,4$;
- c) Os fatores de combinação adotados são:
- d) Pressão dinâmica do vento: $\psi_0 = 0,2$;
- e) Sobrecarga (ações variáveis causadas pelo uso e ocupação): $\psi_0 = 0,8$.

Com esses coeficientes, e, utilizando a equação 4, descrita no item 2.3.5 deste trabalho, estabeleceram-se as combinações dos esforços mais desfavoráveis para a estrutura.

4.4.5 Dimensionamento dos elementos

Com as cargas e geometria da estrutura definidas, calcula-se os esforços internos através do software Ftool, e, com o auxílio do software Jwood, faz-se a implementação das combinações de ações atuantes na estrutura, e verificação das seções escolhidas, e deslocamentos da estrutura. O dimensionamento é feito de forma similar ao item 4.1.5, sendo apresentado aqui portanto apenas os resultados.

4.4.5.1 Terça

O dimensionamento é feito diretamente pelo software Jwood.

Dados:

- a) Comprimento da terça: 3 m;
- b) Seção transversal: 6 cm por 16 cm;
- c) Carga permanente – peso próprio: 0,08 KN/m;
- d) Carga permanente – telhado: 0,186 KN/m²;

e) Sobrecarga acidental: 1 KN no meio do vão da terça.

Os dados das cargas no programa, para o caso de flexão, são inseridos em KN/m. Portanto a carga permanente de telhado fica igual a 0,35 KN/m. Além disso, a carga acidental fica igual a 0,33 KN/m.

A verificação à flexão oblíqua é feita através do maior valor entre as fórmulas 29 e 30 e é mostrada a seguir.

$$\frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{wd}} + k_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{wd}} = 0,89 \leq 1$$

A verificação ao cisalhamento é feita através da fórmula 31 é o resultado é indicado a seguir.

$$\tau_d = \frac{V_d S}{b I} = 0,024 \leq 0,12 = f_{vd}$$

A flecha limite da terça é igual ao comprimento da terça dividido por 200, nesse caso igual a 1,5 cm. A flecha calculada pelo software é igual a 1,46 cm, o que mostra que a terça atende à condição de deslocamento.

4.4.5.2 Trelíça

O dimensionamento das barras da trelíça é feito pelo software Jwood.

Dados:

- a) Seção transversal do banzo superior e inferior: 2 barras de 6 cm por 12 cm;
- b) Seção transversal das diagonais e montantes: 2 barras de 6 cm por 12 cm;
- c) Carga permanente – peso próprio: 0,146 KN/m²;
- d) Carga permanente – terça: 0,08 KN/m;
- e) Carga permanente – telhado: 0,186 KN/m²;
- f) Sobrecarga acidental: 0,178 KN/m².

Levando em consideração a área de influência dos materiais na treliça, foram obtidas as cargas pontuais em seus nós.

A seguir são calculados os esforços nas barras com o software ftool, e indicados os esforços máximos de cada barra para realizar seu dimensionamento. A tabela 12 mostra esses esforços para cada elemento, já realizando a combinação dos esforços. Foi considerada a carga acidental como a ação variável principal e a carga de vento como secundária.

Tabela 12 – Esforços máximos por elemento estrutural de madeira: Vão de 15 m

| Elemento Estrutural | Carga Permanente (KN) | Carga Acidental (KN) | Carga de vento (KN) | Combinação (KN) |
|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------------|
| Banzo Superior | -28,49 | -13,52 | +28,3 | -43,95 |
| Banzo Inferior | +27,52 | +13,1 | -27,3 | +42,53 |
| Diagonal | -5,04 | -2,4 | +5,84 | -7,35 |
| Montante | +6,32 | +3,0 | -5,49 | +10,16 |

Fonte: Autoria própria (2019).

1) Banzo Superior

A verificação à compressão simples é feita pela comparação dos esforços solicitantes e resistentes da barra. O esforço resistente indicado pelo software é igual a -123,06 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 12 é -43,95 KN.

Para o caso da flexocompressão, a fórmula a seguir, do item 7.3.6 da NBR 7190:1997, mostra a verificação da barra.

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{cd}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{cd}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{cd}} k_M = 0,6 \leq 1$$

Onde $\sigma_{Nc,d}$ corresponde à tensão atuante em função apenas da força de compressão, enquanto $\sigma_{Mx,d}$ e $\sigma_{My,d}$ são definidos no item 2.4.3.4. Além disso, f_{cd} é definido no item 2.4.3.2.

Essas verificações já consideram a instabilidade por esbeltez que possa ocorrer, portanto a barra atende aos esforços solicitados.

2) Banzo Inferior

A verificação à tração axial é feita pela comparação dos esforços solicitantes e resistentes da barra. O esforço resistente calculado pelo software é igual a +134,4 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 12 é igual a +42,53 KN. Logo, a barra atende ao esforço imposto.

3) Diagonal

O esforço resistente indicado pelo software é igual a -93,98 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 12 é -7,35 KN. Para o caso da flexocompressão:

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{cd}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{cd}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{cd}} k_M = 0,13 \leq 1$$

Portanto, a barra atende aos esforços solicitantes.

4) Montante

O esforço resistente calculado pelo software é igual a +134,4 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 12 é igual a +10,16 KN. Logo, a barra atende ao esforço imposto.

4.5 Vão de 15 m Aço Laminado

4.5.1 Caracterização do edifício

O edifício é o mesmo mostrado no item 4.4.1.

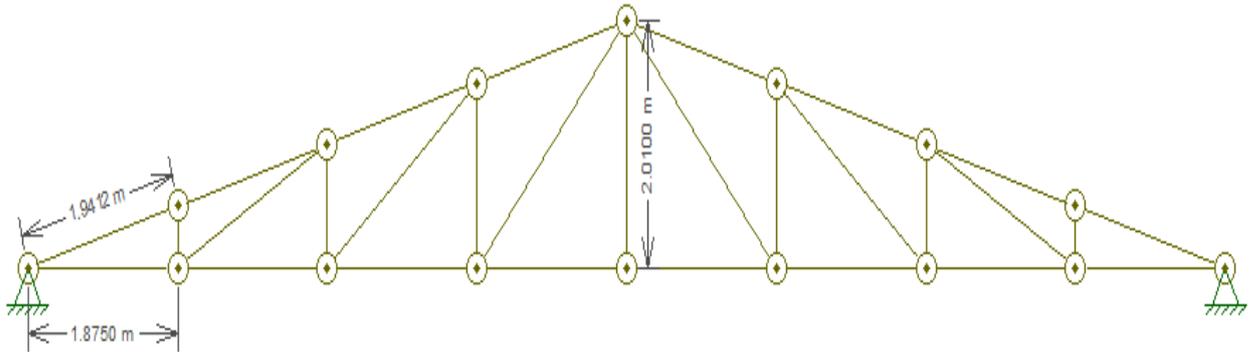
4.5.2 Materiais

O material utilizado é o mesmo do item 4.2.2.

4.5.3 Sistema estrutural

O sistema estrutural é apresentado na figura 45.

Figura 45 – Treliça Pratt vão de 15 metros



Fonte: Autoria própria através do software Ftool (2019).

4.5.4 Ações na estrutura

As cargas adotadas na estrutura seguem as determinações do item 4.7 da NBR 8800:2008.

4.5.4.1 Carga permanente

O peso próprio da treliça é calculado considerando o peso dos perfis pré-adotados e é igual a $0,08 \text{ KN/m}^2$.

Para as terças utiliza-se o perfil U 76 x 6,11, de peso próprio $0,06 \text{ KN/m}$.

O peso das telhas é igual a $0,186 \text{ KN/m}^2$.

4.5.4.2 Carga acidental

As cargas acidentais são as mesmas determinadas pelo item 4.1.4.2.

4.5.4.3 Carga de vento

As cargas de vento são as mesmas determinadas pelo item 4.4.4.3.

4.5.4.4 Combinações das ações

A seguir, são demonstrados os coeficientes de ponderação e fatores de combinação adotados nessas combinações. Estes valores foram adotados seguindo a NBR 8800:2008.

- a) Ações permanentes: $\gamma_g = 1,25$ para situações desfavoráveis e $\gamma_g = 1,0$ para efeitos favoráveis a segurança;
- b) Ações variáveis normais: $\gamma_q = 1,5$;

Os fatores de combinação adotados são:

- a) Pressão dinâmica do vento: $\psi_0 = 0,6$;
- b) Sobrecarga (ações variáveis causadas pelo uso e ocupação): $\psi_0 = 0,8$.

Com esses coeficientes, e, utilizando a equação 4, descrita no item 2.3.5 deste trabalho, estabeleceram-se as combinações dos esforços mais desfavoráveis para a estrutura.

4.5.5 Dimensionamento dos elementos

Com as cargas e geometria da estrutura definidas, calcula-se os esforços internos através do software Ftool, e, com o auxílio do software VisualMetal, faz-se a implementação das combinações de ações atuantes na estrutura, e verificação das seções escolhidas, e deslocamentos da estrutura. O dimensionamento é feito de forma similar ao item 4.2.5, sendo apresentado aqui, portanto, apenas os resultados.

4.5.5.1 Terça

O dimensionamento é feito diretamente pelo software VisualMetal.

Dados:

- a) Comprimento da terça: 3 m;
- b) Seção transversal: Perfil U 76 x 6,11;
- c) Carga permanente – peso próprio: 0,06 KN/m;
- d) Carga permanente – telhado: 0,186 KN/m²;
- e) Sobrecarga acidental: 1 KN no meio do vão da terça.

Com o software Ftool foram calculados os momentos fletores e esforços cortantes na terça, para os eixos x e y, e em seguida esses valores foram introduzidos no VisualMetal para o dimensionamento, em KN.cm e KN, respectivamente.

As verificações à força cortante e ao momento fletor são feitas através das fórmulas 14 e 15, respectivamente. O momento fletor é calculado para o eixo x e para o eixo y. A força cortante utiliza o valor resultante.

$$M_{xSd} = 163,6 \leq 320,47 = M_{Rd}$$

$$M_{ySd} = 43,85 \leq 97,47 = M_{Rd}$$

$$V_{Sd} = 1,115 \leq 37,32 = V_{Rd}$$

A feita ainda a verificação da atuação simultânea de esforços, através da equação 16 ou 17, como não tem atuação de força axial, os valores serão iguais para as duas fórmulas.

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) = 0,97 \leq 1$$

A flecha limite da terça é igual ao comprimento da terça dividido por 180, nesse caso igual a 1,667 cm. A flecha calculada pelo software é igual a 0,746 cm, o que mostra que a terça atende à condição de deslocamento.

4.5.5.2 Treliça

O dimensionamento das barras da treliça é feito pelo software VisualMetal .

Dados:

- a) Seção transversal do banzo superior e inferior: Perfil U 102 x 9,3;
- b) Seção transversal das diagonais e montantes: Perfil cantoneira 38,1 x 38,1 x 1,83;
- c) Carga permanente – peso próprio: 0,08 KN/m²;
- d) Carga permanente – terça: 0,06 KN/m;
- e) Carga permanente – telhado: 0,186 KN/m²;
- f) Sobrecarga acidental: 0,178 KN/m².

Levando em consideração a área de influência dos materiais na treliça, foram obtidas as cargas pontuais em seus nós.

A seguir são calculados os esforços nas barras com o software ftool, e indicados os esforços máximos de cada barra para realizar seu dimensionamento. A tabela 13 mostra esses esforços para cada elemento, já realizando a combinação dos esforços. Foi considerada a carga acidental como a ação variável principal e a carga de vento como secundária.

Tabela 13 – Esforços máximos por elemento estrutural de aço laminado: Vão de 15 m

| Elemento Estrutural | Carga Permanente (KN) | Carga Acidental (KN) | Carga de vento (KN) | Combinação (KN) |
|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------------|
| Banzo Superior | -17,04 | -19,06 | +28,3 | -26,12 |
| Banzo Inferior | +16,45 | +18,41 | -27,3 | +25,25 |
| Diagonal | +3,45 | +3,85 | -6,67 | +4,49 |
| Montante | -2,52 | -2,82 | +4,88 | -3,28 |

Fonte: Autoria própria (2019).

1) Banzo Superior

A verificação à compressão é feita pela comparação dos esforços solicitantes e resistentes da barra. O esforço resistente indicado pelo software é igual a -52,24 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 13 é -26,12 KN.

Essa verificação já considera os efeitos de flambagem que possam ocorrer, portanto a barra atende aos esforços solicitados.

2) Banzo Inferior

A verificação à tração é feita pela comparação dos esforços solicitantes e resistentes da barra. O esforço resistente calculado pelo software é igual a +227,25 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 13 é igual a +25,25 KN. Logo, a barra atende ao esforço imposto.

3) Diagonal

O esforço resistente indicado pelo software é igual a +104,4 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 13 é +4,49 KN.

Portanto, a barra atende aos esforços solicitantes.

4) Montante

O esforço resistente calculado pelo software é igual a -37,39 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 13 é igual a -3,28 KN.

Essa verificação já considera os efeitos de flambagem que possam ocorrer, portanto a barra atende aos esforços solicitados.

4.6 Vão de 15 m Aço Dobrado

4.6.1 Caracterização do edifício

O edifício é o mesmo mostrado no item 4.4.1.

4.6.2 Materiais

O material utilizado é o mesmo do item 4.2.2.

4.6.3 Sistema estrutural

O sistema estrutural é o mesmo do item 4.5.3

4.6.4 Ações na estrutura

As cargas adotadas na estrutura seguem as determinações do item 6 da NBR 14762:2010.

4.6.4.1 Carga permanente

O peso próprio da treliça é calculado considerando o peso dos perfis pré-adotados e é igual a 0,087 KN/m².

Para as terças utiliza-se o perfil Ue 75 x 40 x 15 x 2,0, de peso próprio 0,027 KN/m.

O peso das telhas é igual a 0,186 KN/m².

4.6.4.2 Carga acidental

As cargas acidentais são as mesmas determinadas pelo item 4.1.4.2.

4.6.4.3 Carga de vento

As cargas de vento são as mesmas determinadas pelo item 4.4.4.3.

4.6.4.4 Combinações das ações

A seguir, são demonstrados os coeficientes de ponderação e fatores de combinação adotados nessas combinações. Estes valores foram adotados seguindo a NBR 8800:2008.

- a) Ações permanentes: $\gamma_g = 1,25$ para situações desfavoráveis e $\gamma_g = 1,0$ para efeitos favoráveis a segurança;
- b) Ações variáveis normais: $\gamma_q = 1,5$;

Os fatores de combinação adotados são:

- a) Pressão dinâmica do vento: $\psi_0 = 0,6$;
- b) Sobrecarga (ações variáveis causadas pelo uso e ocupação): $\psi_0 = 0,8$.

Com esses coeficientes, e, utilizando a equação 4, descrita no item 2.3.5 deste trabalho, estabeleceram-se as combinações dos esforços mais desfavoráveis para a estrutura.

4.6.5 Dimensionamento dos elementos

Com as cargas e geometria da estrutura definidas, calcula-se os esforços internos através do software Ftool, e, com o auxílio do software DimPerfil, faz-se a implementação das combinações de ações atuantes na estrutura, e verificação das seções escolhidas, e deslocamentos da estrutura. O dimensionamento é feito de forma similar ao item 4.3.5, sendo apresentado aqui, portanto, apenas os resultados.

4.6.5.1 Terça

O dimensionamento é feito diretamente pelo software DimPerfil.

Dados:

- a) Comprimento da terça: 3 m;
- b) Seção transversal: Perfil Ue 75 x 40 x 15 x 2;
- c) Carga permanente – peso próprio: 0,027 KN/m;
- d) Carga permanente – telhado: 0,186 KN/m²;
- e) Sobrecarga acidental: 1 KN no meio do vão da terça.

Com o software Ftool foram calculados os momentos fletores e esforços cortantes na terça, para os eixos x e y, e em seguida esses valores foram introduzidos no Dimperfil para o dimensionamento, em KN.cm e KN, respectivamente.

As verificações à força cortante e ao momento fletor são feitas através das fórmulas 14 e 15, respectivamente. O momento fletor é calculado para o eixo x e para o eixo y. A força cortante utiliza o valor resultante.

$$M_{xSd} = 163,6 \leq 160,83 = M_{Rd}$$

$$M_{ySd} = 43 \leq 81,68 = M_{Rd}$$

$$V_{Sd} = 1,083 \leq 24,74 = V_{Rd}$$

A feita ainda a verificação da atuação simultânea de esforços, através da equação 19.

$$\left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}}\right)^2 = 1 \leq 1$$

A flecha limite da terça é igual ao comprimento da terça dividido por 180, nesse caso igual a 1,667 cm. A flecha calculada pelo software é igual a 0,91 cm, o que mostra que a terça atende à condição de deslocamento.

4.6.5.2 Treliça

O dimensionamento das barras da treliça é feito pelo software DimPerfil .

Dados:

- a) Seção transversal do banzo superior e inferior: Perfil U 100 x 40 x 2,65;
- b) Seção transversal das diagonais e montantes: Perfil U 75 x 40 x 2,65;
- c) Carga permanente – peso próprio: 0,087 KN/m²;
- d) Carga permanente – terça: 0,027 KN/m;
- e) Carga permanente – telhado: 0,186 KN/m²;
- f) Sobrecarga acidental: 0,178 KN/m².

Levando em consideração a área de influência dos materiais na treliça, foram obtidas as cargas pontuais em seus nós.

A seguir são calculados os esforços nas barras com o software ftool, e indicados os esforços máximos de cada barra para realizar seu dimensionamento. A tabela 14 mostra esses esforços para cada elemento, já realizando a combinação dos esforços. Foi considerada a carga acidental como a ação variável principal e a carga de vento como secundária.

Tabela 14 – Esforços máximos por elemento estrutural de aço dobrado: Vão de 15 m

| Elemento Estrutural | Carga Permanente (KN) | Carga Acidental (KN) | Carga de vento (KN) | Combinação (KN) |
|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------------|
| Banzo Superior | -16,22 | -19,06 | +28,3 | -25,1 |
| Banzo Inferior | +15,67 | +18,41 | -27,3 | +24,27 |
| Diagonal | +3,29 | +3,85 | -6,67 | +4,29 |
| Montante | -2,4 | -2,82 | +4,88 | -3,13 |

Fonte: Autoria própria (2019).

1) Banzo Superior

A verificação à compressão é feita pela comparação dos esforços solicitantes e resistentes da barra. O esforço resistente indicado pelo software é igual a -25,9 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 14 é -25,1 KN.

Essa verificação já considera os efeitos de flambagem que possam ocorrer, portanto a barra atende aos esforços solicitados.

2) Banzo Inferior

A verificação à tração é feita pela comparação dos esforços solicitantes e resistentes da barra. O esforço resistente calculado pelo software é igual a +99,04 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 14 é igual a +24,27 KN. Logo, a barra atende ao esforço imposto.

3) Diagonal

O esforço resistente indicado pelo software é igual a +84,58 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 13 é +4,29 KN.

Portanto, a barra atende aos esforços solicitantes.

4) Montante

O esforço resistente calculado pelo software é igual a -37,385 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 14 é igual a -3,15 KN.

Essa verificação já considera os efeitos de flambagem que possam ocorrer, portanto a barra atende aos esforços solicitados.

4.7 Vão de 20 m Madeira

4.7.1 Caracterização do edifício

Edificação industrial de duas águas, de planta retangular, com repetição de pórticos planos e travamentos longitudinais, com as seguintes características:

- Localização: São Luís – MA;
- Comprimento: 24 m;
- Pé direito: 6 m;
- Distância entre pórticos: 4 m;
- Cobertura em telha ondulada de fibrocimento;
- Um portão de 4,0 metros de largura por 2,5 metros de altura;
- Quatro janelas de 1,0 metros de largura por 1,1 metros de altura.

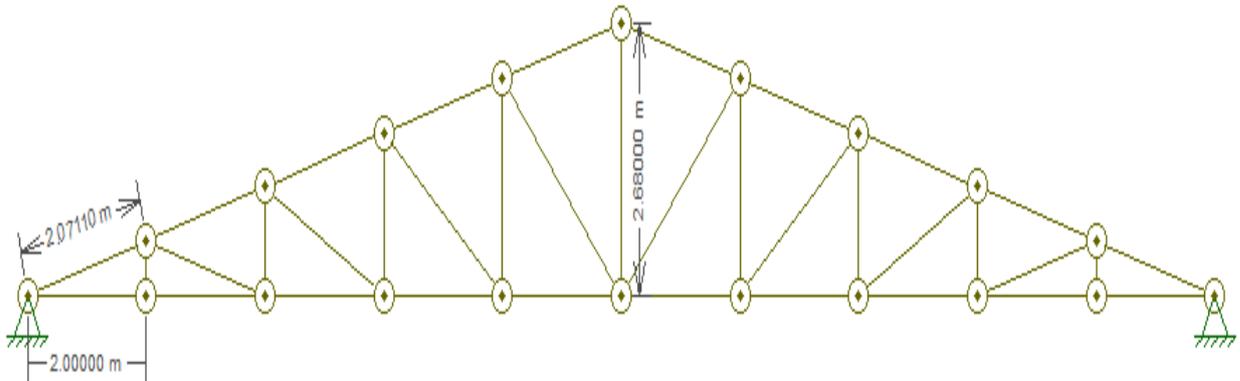
4.7.2 Materiais

O material utilizado é o mesmo do item 4.1.2.

4.7.3 Sistema estrutural

O sistema estrutural é apresentado na figura 46. Para a telha ondulada de fibrocimento foi adotada uma inclinação de 15°.

Figura 46 – Treliza Howe vão de 20 metros



Fonte: Autoria própria através do software Ftool (2019).

4.7.4 Ações na estrutura

As cargas adotadas na estrutura seguem as determinações do item 5.5 da NBR 7190:1997.

4.7.4.1 Carga permanente

O peso próprio da treliça e contraventamento são definidos pela fórmula empírica de Howe a seguir:

$$g_T = 0,0245 (1 + 0,33L) \quad (32)$$

- g_T – Peso próprio da estrutura;
- L – Vão da treliça.

Para o vão de 20 m têm-se o peso da treliça de 0,186 KN/m².

O peso das telhas é obtido através de catálogo de fabricantes e é igual a 0,186 KN/m².

Para as terças são utilizadas barras de seção 6 cm por 16 cm. Seu peso é definido diretamente pelo software Jwood e tem valor de 0,08 KN/m.

Para as terças deve ser considerado a inclinação em relação a horizontal, portanto, para o dimensionamento, suas usadas as projeções de suas cargas.

4.7.4.2 Carga Acidental

A NBR 6120:1980 define no item 2.2.1.4 que “Todo elemento isolado de cobertura (ripas, terças, e barras de banzo superior de treliças) deve ser projetado para receber na posição mais desfavorável, um carga vertical de 1 KN, além da carga permanente”.

4.7.4.3 Carga de vento

As cargas de vento foram calculadas utilizando o software VisualVentos. Todos os resultados e considerações seguem o procedimento determinado pela NBR 6123:1988. Os dados necessários para o cálculo destas ações são indicados na figura 47.

Figura 46 – Dados geométricos e aberturas da edificação de vão de 20 m

Geometria

Dimensões

Medidas

b 20 m a 24 m h 6 m Distância entre pórticos

b1 10,00 m a1 6,67 m a2 5,33 m β 15° h1 2,68 m p 4 m

Confirmar

Área das aberturas

| Face | Fixa | Móvel |
|------|------------------|--------------------|
| A1 | 0 m ² | 2,2 m ² |
| A2 | 0 m ² | 1,1 m ² |
| A3 | 0 m ² | 1,1 m ² |
| B1 | 0 m ² | 0 m ² |
| B2 | 0 m ² | 0 m ² |
| B3 | 0 m ² | 0 m ² |
| C1 | 0 m ² | 10 m ² |
| C2 | 0 m ² | 0 m ² |
| D1 | 0 m ² | 0 m ² |
| D2 | 0 m ² | 0 m ² |

Fonte: Autoria própria através do software VisualVentos (2019).

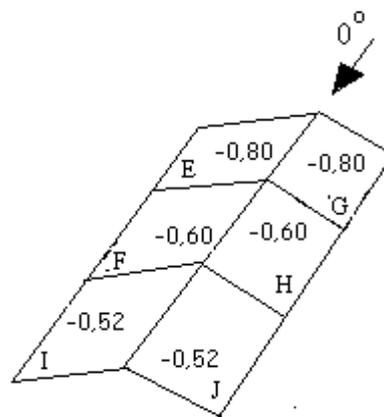
- A velocidade básica do vento, V_0 , para a região da edificação é igual a 30 m/s.
- O fator topográfico, S_1 , é admitido para terreno plano ou fracamente acidentado, e possui valor igual a 1.
- O fator de rugosidade, S_2 , é obtido para categoria IV e classe A, e é igual a 0,82.

- O fator estatístico, S_3 , é admitido para grupo 2 e possui valor de 1.

A partir desses valores e utilizando as fórmulas 1 e 2 calcula-se a velocidade característica do vento, V_k , e a pressão do vento, q , respectivamente. V_k é igual a 24,6 m/s e q igual a 0,37 KN/m².

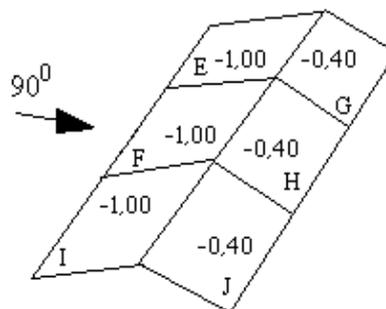
Em seguida, as figuras 47 e 48 mostram os coeficientes de pressão externos para o telhado.

Figura 47 – Coeficiente de pressão externa para telhados com vento a 0°: vão de 20 m



Fonte: Autoria própria através do software VisualVentos (2019).

Figura 48 – Coeficiente de pressão externa para telhados com vento a 90°: vão de 20 m

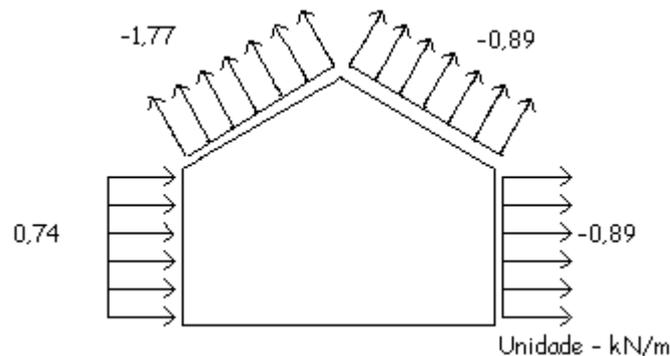


Fonte: Autoria própria através do software VisualVentos (2019).

A figura 43 mostra os coeficientes de pressão interna, adotados de acordo com as características e posição do edifício.

E por último, a figura 49 mostra o esforço final de vento, já considerando a combinação dos coeficientes internos e externos e sua área de influência. Foi escolhido o esforço mais desfavorável à estrutura.

Figura 49 – Esforço de vento treliça 20 metros



Fonte: Autoria própria através do software VisualVentos (2019).

4.7.4.4 Combinações das ações

As combinações de ações são utilizadas para determinar quais os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura. A seguir, são demonstrados os coeficientes de ponderação e fatores de combinação adotados nessas combinações. Estes valores foram adotados seguindo a NBR 7190 1997.

- Ações permanentes de grande variabilidade: $\gamma_g = 1,4$ para situações desfavoráveis e $\gamma_g = 0,9$ para efeitos favoráveis a segurança;
- Ações variáveis normais: $\gamma_q = 1,4$;
- Os fatores de combinação adotados são:
- Pressão dinâmica do vento: $\psi_0 = 0,2$;
- Sobrecarga (ações variáveis causadas pelo uso e ocupação): $\psi_0 = 0,8$.

Com esses coeficientes, e, utilizando a equação 4, descrita no item 2.3.5 deste trabalho, estabeleceram-se as combinações dos esforços mais desfavoráveis para a estrutura.

4.7.5 Dimensionamento dos elementos

Com as cargas e geometria da estrutura definidas, calcula-se os esforços internos através do software Ftool, e, com o auxílio do software Jwood, faz-se a implementação das combinações de ações atuantes na estrutura, e verificação das seções escolhidas, e deslocamentos da estrutura. O dimensionamento é feito de forma similar ao item 4.1.5, sendo apresentado aqui portanto apenas os resultados.

4.7.5.1 Terça

O dimensionamento é feito diretamente pelo software Jwood.

Dados:

- a) Comprimento da terça: 4 m;
- b) Seção transversal: 6 cm por 16 cm;
- c) Carga permanente – peso próprio: 0,08 KN/m;
- d) Carga permanente – telhado: 0,186 KN/m²;
- e) Sobrecarga acidental: 1 KN no meio do vão da terça.

Os dados das cargas no programa, para o caso de flexão, são inseridos em KN/m. Portanto a carga permanente de telhado fica igual a 0,372 KN/m. Além disso, a carga acidental fica igual a 0,25 KN/m.

A verificação à flexão oblíqua é feita através do maior valor entre as fórmulas 29 e 30 e é mostrada a seguir.

$$\frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{wd}} + k_M \frac{\sigma_{My,d}}{f_{wd}} = 0,99 \leq 1$$

A verificação ao cisalhamento é feita através da fórmula 31 e o resultado é indicado a seguir.

$$\tau_d = \frac{V_d S}{b I} = 0,03 \leq 0,12 = f_{vd}$$

A flecha limite da terça é igual ao comprimento da terça dividido por 200, nesse caso igual a 2,0 cm. A flecha calculada pelo software é igual a 1,83 cm, o que mostra que a terça atende à condição de deslocamento.

4.7.5.2 Treliça

O dimensionamento das barras da treliça é feito pelo software Jwood.

Dados:

- a) Seção transversal do banzo superior: 2 barras de 6 cm por 16 cm;
- b) Seção transversal do banzo inferior, diagonais e montantes: 2 barras de 6 cm por 12 cm;
- c) Carga permanente – peso próprio: 0,186 KN/m²;
- d) Carga permanente – terça: 0,08 KN/m;
- e) Carga permanente – telhado: 0,186 KN/m²;
- f) Sobrecarga acidental: 0,125 KN/m².

Levando em consideração a área de influência dos materiais na treliça, foram obtidas as cargas pontuais em seus nós.

A seguir são calculados os esforços nas barras com o software ftool, e indicados os esforços máximos de cada barra para realizar seu dimensionamento. A tabela 15 mostra esses esforços para cada elemento, já realizando a combinação dos esforços. Foi considerada a carga acidental como a ação variável principal e a carga de vento como secundária.

Tabela 15 – Esforços máximos por elemento estrutural de madeira: Vão de 20 m

| Elemento Estrutural | Carga Permanente (KN) | Carga Acidental (KN) | Carga de vento (KN) | Combinação (KN) |
|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------------|
| Banzo Superior | -57,4 | -17,4 | +51,2 | -77,84 |
| Banzo Inferior | +55,4 | +16,8 | -49,5 | +75,1 |
| Diagonal | -9,02 | -2,7 | +9,35 | -11,5 |
| Montante | +13,2 | +4,0 | -10,28 | +18,68 |

Fonte: Autoria própria (2019).

1) Banzo Superior

A verificação à compressão simples é feita pela comparação dos esforços solicitantes e resistentes da barra. O esforço resistente indicado pelo software é igual a -152,88 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 15 é -77,84 KN.

Para o caso da flexocompressão, a fórmula a seguir, do item 7.3.6 da NBR 7190:1997, mostra a verificação da barra.

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{cd}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{cd}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{cd}} k_M = 0,82 \leq 1$$

Onde $\sigma_{Nc,d}$ corresponde à tensão atuante em função apenas da força de compressão, enquanto $\sigma_{Mx,d}$ e $\sigma_{My,d}$ são definidos no item 2.4.3.4. Além disso, f_{cd} é definido no item 2.4.3.2.

Essas verificações já consideram a instabilidade por esbeltez que possa ocorrer, portanto a barra atende aos esforços solicitados.

2) Banzo Inferior

A verificação à tração axial é feita pela comparação dos esforços solicitantes e resistentes da barra. O esforço resistente calculado pelo software é igual a +134,4 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 15 é igual a +75,1 KN. Logo, a barra atende ao esforço imposto.

3) Diagonal

O esforço resistente indicado pelo software é igual a -114,66 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 15 é -11,5 KN. Para o caso da flexocompressão:

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{cd}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{cd}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{cd}} k_M = 0,17 \leq 1$$

Portanto, a barra atende aos esforços solicitantes.

4) Montante

O esforço resistente calculado pelo software é igual a +134,4 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 15 é igual a +18,68 KN. Logo, a barra atende ao esforço imposto.

4.8 Vão de 20 m Aço Laminado

4.8.1 Caracterização do edifício

O edifício é o mesmo do item 4.7.1.

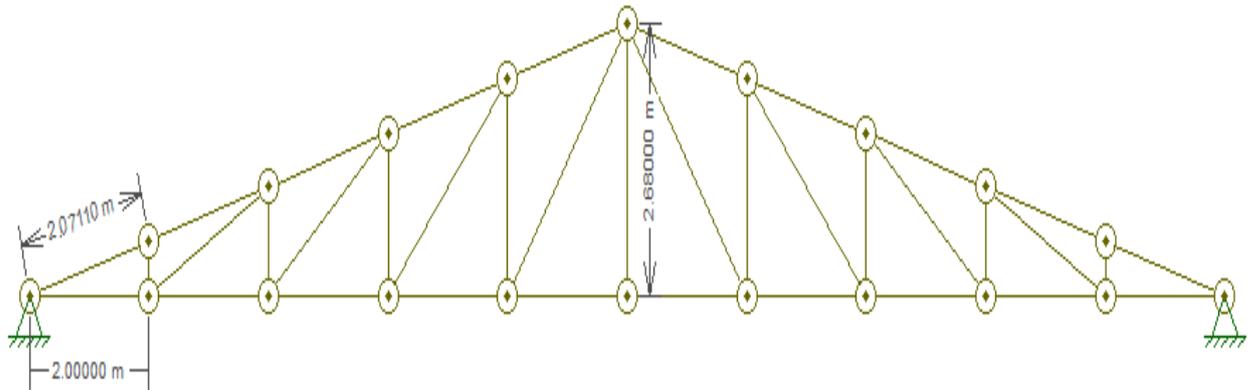
4.8.2 Materiais

O material utilizado é o mesmo do item 4.2.2.

4.8.3 Sistema estrutural

O sistema estrutural é apresentado na figura 50. Para a telha ondulada de fibrocimento foi adotada uma inclinação de 15°.

Figura 50 – Treliça Pratt vão de 20 metros



Fonte: Autoria própria através do software Ftool (2019).

4.8.4 Ações na estrutura

As cargas adotadas na estrutura seguem as determinações do item 4.7 da NBR 8800:2008.

4.8.4.1 Carga permanente

O peso próprio da treliça é calculado considerando o peso dos perfis pré-adotados e é igual a $0,12 \text{ KN/m}^2$.

Para as terças utiliza-se o perfil U 102 x 9,3, de peso próprio $0,093 \text{ KN/m}$.

O peso das telhas é igual a $0,186 \text{ KN/m}^2$.

4.8.4.2 Carga Acidental

A NBR 6120:1980 define no item 2.2.1.4 que "Todo elemento isolado de cobertura (ripas, terças, e barras de banzo superior de treliças) deve ser projetado para receber na posição mais desfavorável, um carga vertical de 1 KN , além da carga permanente".

4.8.4.3 Carga de vento

As cargas de vento são as mesmas do item 4.7.4.3.

4.8.4.4 Combinações das ações

As combinações são feitas da mesma forma que o item 4.5.4.4.

4.8.5 Dimensionamento dos elementos

Com as cargas e geometria da estrutura definidas, calcula-se os esforços internos através do software Ftool, e, com o auxílio do software VisualMetal, faz-se a implementação das combinações de ações atuantes na estrutura, e verificação das seções escolhidas, e deslocamentos da estrutura. O dimensionamento é feito de forma similar ao item 4.2.5, sendo apresentado aqui, portanto, apenas os resultados.

4.8.5.1 Terça

O dimensionamento é feito diretamente pelo software VisualMetal.

Dados:

- a) Comprimento da terça: 4 m;
- b) Seção transversal: Perfil U 102 x 9,3;
- c) Carga permanente – peso próprio: 0,093 KN/m;
- d) Carga permanente – telhado: 0,186 KN/m²;
- e) Sobrecarga acidental: 1 KN no meio do vão da terça.

Com o software Ftool foram calculados os momentos fletores e esforços cortantes na terça, para os eixos x e y, e em seguida esses valores foram introduzidos no VisualMetal para o dimensionamento, em KN.cm e KN, respectivamente.

As verificações à força cortante e ao momento fletor são feitas através das fórmulas 14 e 15, respectivamente. O momento fletor é calculado para o eixo x e para o eixo y. A força cortante utiliza o valor resultante.

$$M_{xSd} = 260,99 \leq 596,04 = M_{Rd}$$

$$M_{ySd} = 69,93 \leq 147,38 = M_{Rd}$$

$$V_{Sd} = 1,115 \leq 72,79 = V_{Rd}$$

A feita ainda a verificação da atuação simultânea de esforços, através da equação 16 ou 17, como não tem atuação de força axial, os valores serão iguais para as duas fórmulas.

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) = 0,91 \leq 1$$

A flecha limite da terça é igual ao comprimento da terça dividido por 180, nesse caso igual a 2,22 cm. A flecha calculada pelo software é igual a 2,16 cm, o que mostra que a terça atende à condição de deslocamento.

4.8.5.2 Treliça

O dimensionamento das barras da treliça é feito pelo software VisualMetal .

Dados:

- a) Seção transversal do banzo superior e inferior: Perfil U 102 x 9,3;
- b) Seção transversal das diagonais e montantes: Perfil cantoneira 38,1 x 38,1 x 1,83;
- c) Carga permanente – peso próprio: 0,12 KN/m²;
- d) Carga permanente – terça: 0,093 KN/m;
- e) Carga permanente – telhado: 0,186 KN/m²;
- f) Sobrecarga acidental: 0,125 KN/m².

Levando em consideração a área de influência dos materiais na treliça, foram obtidas as cargas pontuais em seus nós.

A seguir são calculados os esforços nas barras com o software ftool, e indicados os esforços máximos de cada barra para realizar seu dimensionamento. A tabela 16 mostra esses esforços para cada elemento, já realizando a combinação dos esforços. Foi considerada a carga acidental como a ação variável principal e a carga de vento como secundária.

Tabela 16 – Esforços máximos por elemento estrutural de aço laminado: Vão de 20 m

| Elemento Estrutural | Carga Permanente (KN) | Carga Acidental (KN) | Carga de vento (KN) | Combinação (KN) |
|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------------|
| Banzo Superior | -36,5 | -34,76 | +51,2 | -54,72 |
| Banzo Inferior | +35,26 | +33,58 | -49,5 | +52,865 |
| Diagonal | +6,55 | +6,24 | -10,67 | +8,59 |
| Montante | -5,25 | -5 | +8,55 | -6,88 |

Fonte: Autoria própria (2019).

1) Banzo Superior

A verificação à compressão é feita pela comparação dos esforços solicitantes e resistentes da barra. O esforço resistente indicado pelo software é igual a -55,29 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 16 é -54,72 KN.

Essa verificação já considera os efeitos de flambagem que possam ocorrer, portanto a barra atende aos esforços solicitados.

2) Banzo Inferior

A verificação à tração é feita pela comparação dos esforços solicitantes e resistentes da barra. O esforço resistente calculado pelo software é igual a +267,75 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 16 é igual a +52,865 KN. Logo, a barra atende ao esforço imposto.

3) Diagonal

O esforço resistente indicado pelo software é igual a +104,4 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 16 é +8,59 KN.

Portanto, a barra atende aos esforços solicitantes.

4) Montante

O esforço resistente calculado pelo software é igual a -21,26 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 16 é igual a -6,88 KN.

Essa verificação já considera os efeitos de flambagem que possam ocorrer, portanto a barra atende aos esforços solicitados.

4.9 Vão de 20 m Aço Dobrado

4.9.1 Caracterização do edifício

O edifício é o mesmo do item 4.7.1.

4.9.2 Materiais

O material utilizado é o mesmo do item 4.3.2.

4.9.3 Sistema estrutural

O sistema estrutural é o mesmo do item 4.8.3

4.9.4 Ações na estrutura

As cargas adotadas na estrutura seguem as determinações do item 6 da NBR 14762:2010.

4.9.4.1 Carga permanente

O peso próprio da treliça é calculado considerando o peso dos perfis pré-adotados e é igual a 0,13 KN/m².

Para as terças utiliza-se o perfil Ue 150 x 60 x 20 x 3,0, de peso próprio 0,047 KN/m.

O peso das telhas é igual a 0,186 KN/m².

4.9.4.2 Carga accidental

As cargas accidentais são as mesmas determinadas pelo item 4.1.4.2.

4.9.4.3 Carga de vento

As cargas de vento são as mesmas determinadas pelo item 4.7.4.3.

4.9.4.4 Combinações das ações

As combinações de ações da mesma forma do item 4.6.4.4.

4.9.5 Dimensionamento dos elementos

Com as cargas e geometria da estrutura definidas, calcula-se os esforços internos através do software Ftool, e, com o auxílio do software DimPerfil, faz-se a implementação das combinações de ações atuantes na estrutura, e verificação das seções escolhidas, e deslocamentos da estrutura. O dimensionamento é feito de forma similar ao item 4.3.5, sendo apresentado aqui, portanto, apenas os resultados.

4.9.5.1 Terça

O dimensionamento é feito diretamente pelo software DimPerfil.

Dados:

- a) Comprimento da terça: 4 m;
- b) Seção transversal: Perfil Ue 150 x 60 x 20 x 3;
- c) Carga permanente – peso próprio: 0,047 KN/m;
- d) Carga permanente – telhado: 0,186 KN/m²;
- e) Sobrecarga accidental: 1 KN no meio do vão da terça.

Com o software Ftool foram calculados os momentos fletores e esforços cortantes na terça, para os eixos x e y, e em seguida esses valores foram introduzidos no Dimperfil para o dimensionamento, em KN.cm e KN, respectivamente.

As verificações à força cortante e ao momento fletor são feitas através das fórmulas 14 e 15, respectivamente. O momento fletor é calculado para o eixo x e para o eixo y. A força cortante utiliza o valor resultante.

$$M_{xSd} = 248,8 \leq 435,28 = M_{Rd}$$

$$M_{ySd} = 66,67 \leq 184,4 = M_{Rd}$$

$$V_{Sd} = 1,34 \leq 54,2 = V_{Rd}$$

É feita ainda a verificação da atuação simultânea de esforços, através da equação 19.

$$\left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}}\right)^2 = 0,33 \leq 1$$

A flecha limite da terça é igual ao comprimento da terça dividido por 180, nesse caso igual a 2,22 cm. A flecha calculada pelo software é igual a 2,05 cm, o que mostra que a terça atende à condição de deslocamento.

4.9.5.2 Treliça

O dimensionamento das barras da treliça é feito pelo software DimPerfil .

Dados:

- a) Seção transversal do banzo superior e inferior: Perfil U 100 x 50 x 3,0;
- b) Seção transversal das diagonais e montantes: Perfil U 75 x 40 x 2,65;
- c) Carga permanente – peso próprio: 0,13 KN/m²;
- d) Carga permanente – terça: 0,047 KN/m;
- e) Carga permanente – telhado: 0,186 KN/m²;
- f) Sobrecarga acidental: 0,125 KN/m².

Levando em consideração a área de influência dos materiais na treliça, foram obtidas as cargas pontuais em seus nós.

A seguir são calculados os esforços nas barras com o software ftool, e indicados os esforços máximos de cada barra para realizar seu dimensionamento. A

tabela 17 mostra esses esforços para cada elemento, já realizando a combinação dos esforços. Foi considerada a carga acidental como a ação variável principal e a carga de vento como secundária.

Tabela 17 – Esforços máximos por elemento estrutural de aço dobrado: Vão de 20 m

| Elemento Estrutural | Carga Permanente (KN) | Carga Acidental (KN) | Carga de vento (KN) | Combinação (KN) |
|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------------|
| Banzo Superior | -29,55 | -34,76 | +51,2 | -46,04 |
| Banzo Inferior | +28,55 | +33,58 | -49,5 | +44,48 |
| Diagonal | +5,31 | +6,24 | -10,7 | +7,035 |
| Montante | -4,25 | -5,0 | +8,55 | -5,63 |

Fonte: Autoria própria (2019).

1) Banzo Superior

A verificação à compressão é feita pela comparação dos esforços solicitantes e resistentes da barra. O esforço resistente indicado pelo software é igual a -47,143 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 17 é -46,04 KN.

Essa verificação já considera os efeitos de flambagem que possam ocorrer, portanto a barra atende aos esforços solicitados.

2) Banzo Inferior

A verificação à tração é feita pela comparação dos esforços solicitantes e resistentes da barra. O esforço resistente calculado pelo software é igual a +124,45 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 17 é igual a +44,48 KN. Logo, a barra atende ao esforço imposto.

3) Diagonal

O esforço resistente indicado pelo software é igual a +7,035 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 17 é +84,6 KN.

Portanto, a barra atende aos esforços solicitantes.

4) Montante

O esforço resistente calculado pelo software é igual a -19,35 KN, enquanto o esforço solicitante da tabela 17 é igual a -5,63 KN.

Essa verificação já considera os efeitos de flambagem que possam ocorrer, portanto a barra atende aos esforços solicitados.

5 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MATERIAIS

Neste capítulo, é apresentada a quantidade de material para cada estrutura estudada, e feita a comparação de preço de preço entre elas, considerando o vão em questão.

Depois de ser feito o dimensionamento, foi possível quantificar o consumo de cada material para todos os vão, obtendo o volume de cada estrutura. Foram consideradas apenas as barras da treliça e terças, que são as de maior consumo nas estruturas.

Além disso, a estimativa de preço foi feita para apenas um das treliças da edificação com suas terças apoiadas, sendo a consideração das outras treliças apenas uma multiplicação dos valores apresentados.

5.1 Vão de 8 m

As tabelas 18, 19 e 20 mostram o consumo de material, para madeira, aço laminado e aço dobrado, respectivamente, além do preço por peça e o total do preço da estrutura.

Tabela 18 – Cálculo do consumo de madeira: vão de 8 m

| Madeira | Seção (cm x cm) | Comprimento total (m) | Peso linear (kg/m) | Peso (kg) | Preço por metro (R\$/m) | Preço (R\$) |
|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|-------------------------------|--------------------------|
| Terça | 6 x 12 | 14 | 5,76 | 92,16 | 14,13 | 197,82 |
| Banzo Superior | 6 x 16 | 8,63 | 7,68 | 66,26 | 19,24 | 166,0 |
| Banzo Inferior | 6 x 12 | 8 | 5,76 | 46,08 | 14,13 | 113,04 |
| Diagonal | 6 x 12 | 6,3 | 5,76 | 36,29 | 14,13 | 89,02 |
| Montante principal | 6 x 12 | 1,62 | 5,76 | 9,33 | 14,13 | 22,89 |
| Montantes secundários | 2 x 2,5 x 10 | 3,24 | 4,0 | 12,96 | 12,64 | 40,95 |
| Total | | | | | | <u>R\$ 629,72</u> |

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 19 – Cálculo do consumo de aço laminado: vão de 8 m

| Aço Laminado | Perfil | Comprimento total (m) | Peso linear (kg/m) | Peso (kg) | Preço por metro (R\$/m) | Preço por peso (R\$/kg) | Preço (R\$) | |
|----------------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------|-------------------|
| Terça | U 76 x 6,11 | 14 | 6,11 | 97,76 | 30,32 | – | 424,48 | |
| Banzo Superior | U 102 x 9,3 | 8,63 | 9,3 | 80,26 | 51,58 | – | 445,13 | |
| Banzo Inferior | U 102 x 9,3 | 8 | 9,3 | 74,4 | 51,58 | – | 412,64 | |
| Diagonal | Cantoneira 38,1 x 38,1 x 1,83 | 7,63 | 1,83 | 13,97 | – | 4,27 | 56,65 | |
| Montante | Cantoneira 38,1 x 38,1 x 1,83 | 4,86 | 1,83 | 8,9 | – | 4,27 | 38,0 | |
| Total | | | | | | | | <u>R\$ 1376,9</u> |

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 20 – Cálculo do consumo de aço dobrado: vão de 8 m

| Aço Dobrado | Perfil | Comprimento total (m) | Peso linear (kg/m) | Peso (kg) | Preço por metro (R\$/m) | Preço por peso (R\$/kg) | Preço (R\$) | |
|----------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------|--------------------------|
| Terça | Ue 75 x 40 x 15 x 2,0 | 14 | 2,7 | 43,2 | 13,49 | – | 188,86 | |
| Banzo Superior | U 100 x 40 x 2,65 | 8,63 | 3,56 | 30,7 | 17,91 | – | 154,56 | |
| Banzo Inferior | U 100 x 40 x 2,65 | 8 | 3,56 | 28,48 | 17,91 | – | 143,28 | |
| Diagonal | U 75 x 40 x 2,65 | 7,63 | 3,04 | 23,2 | – | 6,3 | 146,16 | |
| Montante | U 75 x 40 x 2,65 | 4,86 | 3,04 | 14,78 | – | 6,3 | 93,11 | |
| Total | | | | | | | | <u>R\$ 725,97</u> |

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2 Vão de 15 m

As tabelas 21, 22 e 23 mostram o consumo de material, para madeira, aço laminado e aço dobrado, respectivamente, além do preço por peça e o total do preço da estrutura.

Tabela 21 – Cálculo do consumo de madeira: vão de 15 m

| Madeira | Seção (cm x cm) | Comprimento total (m) | Peso linear (kg/m) | Peso (kg) | Preço por metro (R\$/m) | Preço (R\$) |
|----------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|-------------------------------|--------------------|
| Terça | 6 x 16 | 27 | 7,68 | 207,36 | 19,24 | 519,48 |
| Banzo Superior | 2 x 6 x 12 | 15,52 | 5,76 | 89,4 | 14,13 | 438,6 |
| Banzo Inferior | 2 x 6 x 12 | 15 | 5,76 | 86,4 | 14,13 | 423,9 |
| Diagonal | 2 x 6 x 12 | 12,93 | 5,76 | 74,48 | 14,13 | 365,40 |
| Montante | 2 x 6 x 12 | 8,0 | 5,76 | 46,08 | 14,13 | 226,08 |
| Total | | | | | | <u>R\$ 1973,46</u> |

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 22 – Cálculo do consumo de aço laminado: vão de 15 m

| Aço Laminado | Perfil | Comprimento total (m) | Peso linear (kg/m) | Peso (kg) | Preço por metro (R\$/m) | Preço por peso (R\$/kg) | Preço (R\$) |
|----------------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------|-----------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Terça | U 76 x 6,11 | 27 | 6,11 | 164,97 | 30,32 | – | 818,64 |
| Banzo Superior | U 102 x 9,3 | 15,52 | 9,3 | 144,33 | 51,58 | – | 800,52 |
| Banzo Inferior | U 102 x 9,3 | 15 | 9,3 | 139,5 | 51,58 | – | 773,7 |
| Diagonal | Cantoneira 38,1 x 38,1 x 1,83 | 14,56 | 1,83 | 26,64 | – | 4,27 | 113,75 |
| Montante | Cantoneira 38,1 x 38,1 x 1,83 | 8,0 | 1,83 | 14,64 | – | 4,27 | 62,51 |
| Total | | | | | | | <u>R\$</u> <u>2569,12</u> |

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 23 – Cálculo do consumo de aço dobrado: vão de 15 m

| Aço Dobrado | Perfil | Comprimento total (m) | Peso linear (kg/m) | Peso (kg) | Preço por metro (R\$/m) | Preço por peso (R\$/kg) | Preço (R\$) | |
|----------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------|---------------------------|
| Terça | Ue 75 x 40 x 15 x 2,0 | 27 | 2,7 | 43,2 | 13,49 | – | 364,23 | |
| Banzo Superior | U 100 x 40 x 2,65 | 15,52 | 3,56 | 30,7 | 17,91 | – | 277,96 | |
| Banzo Inferior | U 100 x 40 x 2,65 | 15 | 3,56 | 28,48 | 17,91 | – | 268,65 | |
| Diagonal | U 75 x 40 x 2,65 | 14,56 | 3,04 | 44,26 | – | 6,3 | 278,84 | |
| Montante | U 75 x 40 x 2,65 | 8,0 | 3,04 | 24,32 | – | 6,3 | 153,21 | |
| Total | | | | | | | | <u>R\$ 1342,09</u> |

Fonte: Autoria própria (2019).

5.3 Vão de 20 m

As tabelas 24, 25 e 26 mostram o consumo de material, para madeira, aço laminado e aço dobrado, respectivamente, além do preço por peça e o total do preço da estrutura.

Tabela 24 – Cálculo do consumo de madeira: vão de 20 m

| Madeira | Seção (cm x cm) | Comprimento total (m) | Peso linear (kg/m) | Peso (kg) | Preço por metro (R\$/m) | Preço (R\$) |
|----------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|-------------------------------|--------------------------|
| Terça | 6 x 16 | 44 | 7,68 | 337,92 | 19,24 | 846,56 |
| Banzo Superior | 2 x 6 x 12 | 20,7 | 5,76 | 119,23 | 14,13 | 584,98 |
| Banzo Inferior | 2 x 6 x 12 | 20 | 5,76 | 115,2 | 14,13 | 565,2 |
| Diagonal | 2 x 6 x 12 | 19,67 | 5,76 | 113,3 | 14,13 | 555,87 |
| Montante | 2 x 6 x 12 | 13,4 | 5,76 | 77,18 | 14,13 | 378,68 |
| Total | | | | | | <u>R\$ 2931,3</u> |

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 25 – Cálculo do consumo de aço laminado: vão de 20 m

| Aço Laminado | Perfil | Comprimento total (m) | Peso linear (kg/m) | Peso (kg) | Preço por metro (R\$/m) | Preço por peso (R\$/kg) | Preço (R\$) |
|----------------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------|------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Terça | U 102 x 9,3 | 44 | 9,3 | 409,2 | 51,58 | – | 2269,5 |
| Banzo Superior | U 102 x 9,3 | 20,7 | 9,3 | 192,5 1 | 51,58 | – | 1067,7 |
| Banzo Inferior | U 102 x 9,3 | 20 | 9,3 | 186 | 51,58 | – | 1031,6 |
| Diagonal | Cantoneira 38,1 x 38,1 x 1,83 | 22,23 | 1,83 | 40,68 | – | 4,27 | 173,7 |
| Montante | Cantoneira 38,1 x 38,1 x 1,83 | 13,4 | 1,83 | 24,52 | – | 4,27 | 104,7 |
| Total | | | | | | | <u>R\$</u> <u>4647,2</u> |

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 26 – Cálculo do consumo de aço dobrado: vão de 20 m

| Aço Dobrado | Perfil | Comprimento total (m) | Peso linear (kg/m) | Peso (kg) | Preço por metro (R\$/m) | Preço por peso (R\$/kg) | Preço (R\$) | |
|----------------|------------------------|-----------------------|--------------------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------|---------------------------|
| Terça | Ue 150 x 60 x 20 x 3,0 | 44 | 4,7 | 206,8 | – | 6,3 | 1302,84 | |
| Banzo Superior | U 100 x 50 x 3,0 | 20,7 | 4,48 | 92,74 | 24,18 | – | 500,52 | |
| Banzo Inferior | U 100 x 50 x 3,0 | 20 | 4,48 | 89,6 | 24,18 | – | 483,6 | |
| Diagonal | U 75 x 40 x 2,65 | 22,23 | 3,04 | 67,58 | – | 6,3 | 425,75 | |
| Montante | U 75 x 40 x 2,65 | 13,4 | 3,04 | 40,74 | – | 6,3 | 256,66 | |
| Total | | | | | | | | <u>R\$ 2969,37</u> |

Fonte: Autoria própria (2019).

5.4 Resumo de materiais

A tabela 27 mostra o resumo do preço total dos materiais para os três vãos considerados.

Tabela 27 – Resumo de preço de material por vão

| | 8 m | 15 m | 20 m |
|--------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Madeira | <u>R\$ 629,72</u> | <u>R\$ 1973,46</u> | <u>R\$ 2931,3</u> |
| Aço Laminado | <u>R\$ 1376,9</u> | <u>R\$ 2569,12</u> | <u>R\$ 4647,2</u> |
| Aço Dobrado | <u>R\$ 725,97</u> | <u>R\$ 1342,09</u> | <u>R\$ 2969,37</u> |

Fonte: Autoria própria (2019).

6 CONCLUSÃO

Portanto, nota-se que os estudos apresentados foram satisfatórios para o correto dimensionamento das estruturas estudadas. As terças e treliças apresentadas mostram-se adequadas para os vãos considerados, suportando os esforços calculados e apresentados pelos softwares utilizados.

Dessa forma, com o resumo do preço do material de cada estrutura, é possível fazer a análise comparativa. Examinando a tabela 27 percebe-se que as estruturas de aço laminado são as mais caras para os três vãos, enquanto as estruturas de aço dobrado e as de madeira possuem preço similar para o vão de 8 metros e 20 metros, havendo uma diferença maior para o vão de 15 metros.

Para o vão de 8 metros, a estrutura de madeira, de preço R\$ 629,72, mostrou-se a mais barata, sendo 15,28% mais barata que a estrutura de aço dobrado, de preço R\$ 725,97, e 118,65% mais barata que a estrutura de aço laminado, de preço R\$ 1376,9.

Mas também, para o vão de 15 metros, a estrutura de aço dobrado, de preço R\$ 1342,09, mostrou-se a mais barata, sendo 47,04% mais barata que a estrutura de madeira, de preço R\$ 1973,46, e 91,42% mais barata que a estrutura de aço laminado, de preço R\$ 2569,12.

Além disso, para o vão de 20 metros, a estrutura de madeira, de preço R\$ 2931,3, mostrou-se a mais barata, sendo 1,3% mais barata que a estrutura de aço dobrado, de preço R\$ 2969,37, e 58,53% mais barata que a estrutura de aço laminado, de preço R\$ 4647,2.

E por fim, é importante ressaltar que a escolha do material para a estrutura de coberturas depende de diversos fatores, como custo de mão de obra, disponibilidade de fornecimento de material, conhecimento técnico, etc. Portanto, o presente trabalho não pretende indicar o material indicado para cada vão estudado, mas apresentar dados que possam contribuir na análise de estruturas semelhantes.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.
- ABNT _____. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações: procedimento. Rio de Janeiro, 1988.
- ABNT _____. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT _____. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas: procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT _____. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- ABNT _____. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.
- BELLEI, I.H. **Edifícios industriais em aço**. 6.ed. São Paulo: PINI, 2010.
- JUNIOR, C. C; MOLINA, J. C. **Coberturas em estruturas de madeira**: exemplos de cálculo. São Paulo: Pini, 2010.
- CENTRO TECNOLÓGICO DA CERÂMICA E DO VIDRO (Coord.). **Manual de aplicação de telhas cerâmicas**. Coimbra: Associação Portuguesa dos Industriais da Cerâmica de Construção, 1998.
- CHAMBERLAIN, Z.M.; FICANHA R.; FABEANE, R. **Projeto e cálculo de estruturas de aço: Edifício industrial detalhado**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- DIAS, L. A. de M. **Estruturas de aço**: conceito, técnicas e linguagem. São Paulo: Zigurate, 2002.
- FLACH, R. S. **Estruturas para telhados: análise técnica de soluções**. 2012. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- GUINZELLI, A. J. **Projeto estrutural de uma edificação residencial com estrutura metálica**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Dimensionamento de perfis formados a frio conforme NBR 14762 e NBR 6355**. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2008.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Galpões para usos gerais**. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2010.

JUNIOR, C. C.; MOLINA, J. C. **Coberturas em estruturas de madeira**: exemplos de cálculo. São Paulo: Pini, 2010.

LOGSDON, N. B. **Estruturas de madeira para coberturas, sob a ótica da NBR 7190/1997**. Faculdade de Engenharia Florestal. Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2002.

MOLITERNO, A. **Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeira**. Revisão de Reyolando Manoel L.R. da Fonseca Brasil. 4. ed. rev. São Paulo: Blucher, 2010.

PFEIL, W; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**: dimensionamento segundo a norma brasileira NBR 7190:1997 e critérios da das normas Norte-americana NDS e Européia EUROCODE 5 . 6. Ed. rev. atual. e ampliada. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PFEIL, W; PFEIL, M. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático segundo a NBR 8800:2008. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

REIS, F. S. B. dos; SOUZA, U. E. L. de. **Coberturas com telhados**: definições, características gerais e visão analítica. São Paulo: EPUSP, 2007. Boletim Técnico PCC 456.

SILVA, V.P.; PANNONI, F.D. **Estruturas de aço para edifícios**. São Paulo: Blucher, 2010.

SILVA, R. E. R. da. **Projeto de galpão em estrutura metálica: consumo de aço em soluções com perfis laminados e conformados a frio**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

