

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

BETINA PAROLIN

**PROJETO ESTRUTURAL DE UMA TRELIÇA DE MADEIRA MACIÇA
DE ACORDO COM DIFERENTES SISTEMAS CONSTRUTIVOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2017

BETINA PAROLIN

**PROJETO ESTRUTURAL DE UMA TRELIÇA DE MADEIRA MACIÇA
DE ACORDO COM DIFERENTES SISTEMAS CONSTRUTIVOS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz Martinechen
Beghetto

Co-Orientadora: Prof^a. Dr^a. Elisabeth Penner

CURITIBA

2017



Ministério da Educação

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Campus Curitiba – Sede Ecoville

Departamento Acadêmico de Construção Civil

Curso de Engenharia Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

PROJETO ESTRUTURAL DE UMA TRELIÇA DE MADEIRA MACIÇA DE ACORDO COM DIFERENTES SISTEMAS CONSTRUTIVOS

Por

BETINA PAROLIN

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido no segundo semestre de 2017 e aprovado pela seguinte banca de avaliação:

Orientador – Fernando Luiz Martinechen Beghetto, Dr.
UTFPR

Co-Orientadora – Elisabeth Penner, Dr^a.
UTFPR

Cristofer Bernardi Scremim, M. Eng.
UTFPR

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

RESUMO

PAROLIN, Betina. **Projeto estrutural de uma treliça de madeira maciça de acordo com diferentes sistemas construtivos**. 2017. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

No presente trabalho, foi dimensionada uma estrutura de madeira maciça em forma de treliça para uma cobertura, visando a otimização do projeto e análise entre diferentes classes de resistência e sistemas construtivos. Os cálculos e detalhamentos foram executados conforme a NBR 7190/1997, utilizando oito classes de resistência, separadas ainda em quatro sistemas construtivos. Para melhor comparação entre os projetos, as características iniciais da estrutura e sua geometria foram padronizadas, além das dimensões de suas ligações. A partir dos resultados, observou-se a influência das classes da madeira no dimensionamento das seções das vigas, terças e das barras da treliça. A comparação entre as seções de cálculo e comerciais também se tornou importante ao existir um superdimensionamento no uso comercial, deixando de ser uma estrutura otimizada. As ligações são igualmente influenciadas pela classe, bem como pelo tipo de sistema construtivo, levando a quantidades excessivas de pinos no uso de materiais menos resistentes. Foi possível analisar quais situações são aceitáveis e quais são impraticáveis para construções reais. O estudo revela-se importante devido à falta de informações referentes ao uso da madeira na construção civil do Brasil, e sua característica sustentável relevante ao mercado atual e futuro.

Palavras-chave: Treliça. Estrutura de madeira. Otimização.

ABSTRACT

PAROLIN, Betina. **Structural design of a solid timber truss according to different construction systems**. 2017. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

In the present study, a solid timber truss for a roof was designed, aiming an optimization of the structure and analysis between different strength classes and constructive systems. The calculations and detailing were executed according to the NBR 7190/1997, using eight strength classes and four constructive systems. For better comparison between projects, the initial characteristics of the structure and its geometry were standardized, in addition to the dimensions of its connections. From the results, the influence of the wood classes was observed in the purlins sections dimensioning, as well as in the truss bars. It was also important the comparison between the calculated sections and commercial profiles of the wood, which showed an oversizing in the commercial use, no longer being an optimized structure. The connections are also influenced by the strength class, as well as by the type of constructive system, leading to excessive amounts of screws when using less resistant materials. It was possible to analyze which situations were acceptable and which are impracticable for real constructions. The study proves to be important due to the lack of information regarding the use of wood in construction in Brazil, and its sustainable characteristic relevant to the current and future market.

Keywords: Truss. Timber Structure. Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção transversal de um tronco de árvore.....	19
Figura 2 – Direções principais de uma peça de madeira.....	20
Figura 3 – Retração nas principais direções da madeira.....	21
Figura 4 – Possíveis tensões tangenciais na madeira.....	24
Figura 5 – Tipos de treliças de madeira para cobertura.	27
Figura 6 – Vigamento para cobertura com telhas cerâmicas.....	27
Figura 7 – Estrutura e suas dimensões em metros.	35
Figura 8 – Fluxograma de procedimentos.....	35
Figura 9 – Geometria e dimensões da treliça em metros.	37
Figura 10 – Esquema estático da treliça.	40
Figura 11 – Sistema construtivo 1.....	42
Figura 12 – Sistema construtivo 2.....	42
Figura 13 – Sistema construtivo 3.....	42
Figura 14 – Sistema construtivo 4.....	42
Figura 15 – Localização do nó mais solicitado da treliça.....	56
Figura 16 – Detalhamento em chapuz metálico.	58
Figura 17 – Detalhamento em chapuz de madeira.....	58
Figura 18 – Concepção final das treliças.	60
Figura 19 – Treliça em madeira C60, com barras unidas por chapuz metálico.	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Diagrama tensão x deformação específica para determinação da rigidez à compressão paralela às fibras.	23
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes de resistência das coníferas.	25
Quadro 2 – Classes de resistência das dicotiledôneas.	25
Quadro 3 – Coeficientes de majoração γ_f	30
Quadro 4 – Fatores de combinação e de utilização.	30
Quadro 5 – Relação f_k/f_m e coeficiente γ_w para cada esforço.	31
Quadro 6 – Valores dos coeficientes $k_{mod 1}$ e $k_{mod 2}$	31
Quadro 7 – Classes de umidade.	32
Quadro 8 – Valores do coeficiente $k_{mod 3}$	32
Quadro 9 – Dimensões comerciais de vigas de madeira serrada.	37
Quadro 10 – Valores de α_e	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cargas atuantes na estrutura.....	38
Tabela 2 – Otimização da viga terça para ST de cálculo.	46
Tabela 3 – Aproximação dos valores para ST comercial.	49
Tabela 4 – Cálculo do sistema construtivo 1 de treliça.....	53
Tabela 5 – Cálculo do sistema construtivo 2 de treliça.....	53
Tabela 6 – Cálculo do sistema construtivo 3 de treliça.....	54
Tabela 7 – Cálculo do sistema construtivo 4 de treliça.....	54
Tabela 8 – Dimensionamento das ligações de um nó da treliça.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ELU	Estado Limite Último
ELUti	Estado Limite de Utilização
Ftool	<i>Two-Dimensional Frame Analysis Tool</i>
NBR	Norma Brasileira
ST	Seção Transversal
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

b	Largura
d	Diâmetro do parafuso
f_{c0k}	Resistência característica à compressão paralela às fibras
f_{cd}	Tensão resistente de projeto à compressão paralela às fibras
f_{cnd}	Tensão resistente de projeto à compressão normal às fibras
f_d	Tensão resistente de projeto à ação paralela às fibras
$f_{e0,d}$	Resistência ao embutimento paralela às fibras
$f_{e90,d}$	Resistência ao embutimento normal às fibras
f_k	Resistência característica
f_m	Resistência média
f_{nd}	Tensão resistente de projeto à ação normal às fibras
f_{td}	Tensão resistente de projeto à tração paralela às fibras
f_{vd}	Cisalhamento resistente
f_{vk}	Resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras
f_{yd}	Resistência ao escoamento do aço
f_{yk}	Tensão característica do parafuso
$f_{\theta d}$	Tensão resistente à ação inclinada
h	Altura
k_M	Coefficiente de correção
q	Pressão dinâmica do vento
t	Espessura convencional da madeira
C 20	Classe com resistência de até 20 MPa
C 25	Classe com resistência de até 25 MPa
C 30	Classe com resistência de até 30 MPa

C_{40}	Classe com resistência de até 40 MPa
C_{50}	Classe com resistência de até 50 MPa
C_{60}	Classe com resistência de até 60 MPa
E_c	Valor médio do módulo de elasticidade
$E_{c0,m}$	Valor do módulo de elasticidade na condição padrão de umidade
$E_{c,ef}$	Valor do módulo de elasticidade efetivo
F_d	Valor de cálculo das ações no estado limite último
$F_{d,uti}$	Valor de cálculo das ações no estado limite de utilização
$F_{Gi,k}$	Valor característico de ações permanentes
$F_{Q,exc}$	Valor da ação transitória excepcional
$F_{Qj,k}$	Valor característico das demais ações variáveis
$F_{Q1,k}$	Valor característico de ação variável considerada como principal
G_i	Ação permanente
I	Momento de Inércia
K_{mod}	Coefficiente de modificação da resistência
K_{mod1}	Coefficiente parcial de modificação dependente do tipo de produto de madeira e tempo de duração da carga
K_{mod2}	Coefficiente parcial de modificação dependente do efeito da umidade
K_{mod3}	Coefficiente parcial de modificação dependente da classificação estrutural da madeira
L	Comprimento da viga terça
L_o	Comprimento da maior barra da treliça
M_d	Momento fletor máximo
$M_{d,x}$	Momento fletor máximo no eixo x
$M_{d,y}$	Momento fletor máximo no eixo y
N_d	Força normal atuante na barra da treliça

$P_{crítico}$	Carga crítica de flambagem ou carga de Euler
P_d	Peso atuante de uma pessoa
Q_j	Ação variável
Q_1	Ação variável considerada como principal
R	Reação de apoio da treliça
R_d	Valor de resistência de cálculo
R_k	Valor da resistência característica
$R_{vd,1}$	Resistência ao cisalhamento para uma seção de corte
S_d	Valor de solitação de cálculo
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator de rugosidade, dimensões da edificação e sua altura sobre o terreno
S_3	Fator baseado em conceitos probabilísticos
U	Umidade
U_{amb}	Umidade relativa do ambiente
V_d	Cisalhamento atuante
V_o	Velocidade básica do vento
V_k	Velocidade característica do vento
W_x	Módulo de resistência no eixo x
W_y	Módulo de resistência no eixo y
α_e	Coefficiente para diâmetro de parafuso
β	Parâmetro adimensional
β_{lim}	Parâmetro adimensional limite
θ	Ângulo da ação em relação às fibras
γ_g	Coefficiente de majoração de cargas permanentes
γ_{Gi}	Coefficiente de majoração de ações permanentes

γ_{ef}	Deslocamento efetivo
γ_{lim}	Deslocamento limite
γ_q	Coeficiente de majoração de cargas variáveis
γ_Q	Coeficiente de majoração de ações variáveis
γ_w	Coeficiente de minoração da resistência da madeira
γ_E	Coeficiente de majoração de cargas indiretas
π	Constante matemática pi
$\sigma_{atuante}$	Tensão máxima atuante na treliça
σ_{cd}	Tensão solicitante de projeto à compressão paralela às fibras
σ_{cnd}	Tensão solicitante de projeto à compressão normal às fibras
$\sigma_{Md, x}$	Tensão máxima de flexão no eixo x
$\sigma_{Md, y}$	Tensão máxima de flexão no eixo y
σ_{td}	Tensão solicitante de projeto à tração paralela às fibras
$\rho_{bas, m}$	Densidade básica na condição padrão de umidade
$\rho_{aparente}$	Densidade aparente
$\tau_{atuante}$	Cisalhamento atuante
ψ_k	Coeficiente de combinação das demais ações variáveis
ψ_n	Coeficiente de combinação de ação variável considerada como principal
ψ_{oj}	Coeficiente de combinação de ações normais (ELU)
$\psi_{oj, ef}$	Coeficiente de combinação de ações especiais ou de construção (ELU)
ψ_{2j}	Coeficiente de combinação de ações de longa duração (ELUti)
ψ_0	Fator de combinação
ψ_1	Fator de utilização frequente
ψ_2	Fator de utilização quase permanente
Σ	Soma

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.1.1 Objetivo Geral.....	16
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL	19
2.2 TRELIÇAS DE COBERTURA	25
2.3 ENQUADRAMENTO NORMATIVO	28
2.4 OTIMIZAÇÃO DA TRELIÇA DE COBERTURA EM MADEIRA	34
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 VIGAS TERÇAS	45
4.2 TRELIÇA.....	52
4.3 LIGAÇÕES	56
4.4 PROJETO FINAL.....	59
5 CONCLUSÃO	62
REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

O uso da madeira como material na construção de estruturas ocorre desde a antiguidade, devido à versatilidade e simplicidade de seu emprego. A utilização do material se destaca em soluções para coberturas, cimbramento, transposição de obstáculos, armazenamento, obras portuárias, entre outros. Por muito tempo foi o material mais importante a servir aos propósitos básicos de proteção contra intempéries e possuir praticidade de manuseio.

Thelandersson e Larsen (2003) afirmam que antes da emergência de materiais modernos como concreto e aço, a madeira era dominante na construção principalmente de pontes. Sua durabilidade se prova no fato das estruturas serem projetadas de maneira que um elemento com eventuais problemas possa ser substituído facilmente. Porém apesar de suas vantagens, o estudo do comportamento desse material deve ser ainda mais aprofundado.

Em virtude da abundância da madeira na natureza, novas técnicas estão sempre sendo desenvolvidas para o corte, colagem e ligação desse material com objetivo de utilizá-lo da maneira mais adequada em cada caso estrutural. Esses recursos revelam a alta competitividade com outras alternativas de execução disponíveis no mercado, pelo motivo de serem vantajosos ao meio ambiente e significativos em soluções arquitetônicas onde, por vez, são vistos como melhores alternativas (ALMEIDA, 2012).

O grande emprego da madeira em estruturas de cobertura começou após um período da história em que havia muita matéria prima e mão de obra de baixo custo relacionados a essa área. Muitos construtores projetavam segundo o que acreditavam e de acordo com sua experiência prática, sem nenhum fundamento técnico (PARTEL, 2000). Atualmente, especialmente na América Latina, o interesse dos profissionais no cálculo de estruturas em madeira para coberturas é reduzido se comparado a outros sistemas de construção.

Como a execução de elementos construtivos com madeira existe há milhares de anos, houve muito tempo para o desenvolvimento de diversos sistemas estruturais em consequência da descoberta dos produtos vindos desse material. Dentre todos esses sistemas, um dos mais usados tradicionalmente é o treliçado, conhecido sobretudo no emprego de coberturas residenciais ou industriais. A metodologia do seu uso leva em conta hipóteses e condições convencionadas há

muito tempo, para cálculos manuais. Atualmente é possível associar os conhecimentos antigos com a utilização de ferramentas correntes que facilitam o uso e verificações dos processos, garantindo maior confiabilidade às operações (RIBEIRO, 2008).

Para projetar uma estrutura de treliça empregando madeira, é necessário obter resultados que cumpram com as normas e requisitos específicos adotados. Porém, durante a concepção e realização do projeto, muitos fatores podem levar a soluções diferentes que mesmo com variações na metodologia de cálculo, ao final devem atender às diretrizes estabelecidas.

Ao conceber uma proposta de estrutura, é necessário, em primeiro lugar, conhecer as propriedades físicas e mecânicas do material usado, que são relevantes ao projeto pois interferem em todos os problemas em questão (ANDRADE et al., 2014). Em uma construção, essas propriedades, como umidade, densidade, resistência ao fogo e durabilidade natural, além de resistência à compressão e tração, podem mudar imensamente o resultado esperado. É necessário conhecer tais características para que se possa calcular uma estrutura da melhor maneira possível.

Nesse contexto, o cálculo de uma treliça de madeira para cobertura de telhado deve, além de satisfazer às normas, possuir a melhor eficiência quanto ao suporte de carregamentos, dimensionamento final e escolha do material. É importante levar em conta as propriedades da madeira e como ela pode ser utilizada para gerar o menor desperdício possível, tendo em vista não somente a treliça em si, mas também suas formações complementares e de ligação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Otimizar um projeto de uma estrutura de treliça de madeira maciça para uma cobertura de uma edificação de alvenaria não estrutural de 8 por 5 metros.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Dimensionar uma estrutura de treliça em madeira de acordo com as suas características adotadas e cargas existentes, conforme a ABNT NBR 7190/97 – Projeto de estruturas de madeira;
- Analisar a estrutura em quatro tipos de sistemas construtivos de treliça para todas as classes de resistência de coníferas e dicotiledôneas;
- Comparar os sistemas estruturais, identificando a situação mais viável em termos de benefício estrutural.

1.2 JUSTIFICATIVA

O mercado global vigente necessita de um aumento na utilização da madeira e seus subprodutos na construção, buscando melhores processos que possam gerar um produto final otimizado. Esse produto deve ser concebido de forma segura, durável, confortável e dentro das normas estabelecidas. Para Calil Júnior (2003), o uso desse material se deve ao aumento da conscientização de engenheiros quanto ao potencial da madeira e suas vantagens em relação a outros materiais estruturais.

O país deve procurar constantemente maneiras mais satisfatórias de construção, principalmente no que se trata de sistemas menos utilizados em comparação a outras nações (ZENID, 2001). O uso da madeira em coberturas treliçadas ainda ocorre com uma frequência muito grande, logo poderiam obter-se novas maneiras de implantação do mesmo processo, considerando que esse tipo de estrutura pode ser uma boa alternativa na cobertura de telhados por serem leves e de rápida e fácil execução.

Com o emprego de novas tecnologias, é possível construir sistemas mais realistas quanto ao comportamento de treliças, aprimorando as dimensões e aumentando a segurança das estruturas, além de reduzir os custos de fabricação (GUPTA et al., 2004). Em comparação com outros materiais de construções convencionais, a madeira apresenta uma variedade de propriedades que a tornam mais atraente, sendo essas a sua durabilidade, relação resistência/peso excepcional, conforto térmico e acústico, alta versatilidade de uso, baixo consumo de energia em

seu processo de realização, facilidade de extração, corte e emprego do material, além de possuir um sistema estrutural de ligações mais versátil.

Mesmo que a madeira esteja sujeita à degradação biológica e à ação do fogo, esses pontos prejudiciais podem ser naturalmente resolvidos com o uso de produtos específicos e tratados, com o objetivo de conservar sistemas estruturais por um longo período de tempo e ainda adequá-los a estéticas apazíveis (PFEIL, 2015). Atualmente, existem normas de tratamento do material que devem ser seguidas, além de ser possível a compra da madeira certificada e isenta de futuros ataques biológicos.

Além de todas as vantagens apresentadas, o principal aspecto que diferencia a madeira de outros materiais é a sua sustentabilidade ambiental, podendo também ser reconhecida economicamente. Para Calil Júnior (2003), o incentivo ao desenvolvimento de políticas no setor florestal é uma das alternativas para a abertura de atividades econômicas nos mercados interno e externo. A contribuição desse setor pode desenvolver o produto interno bruto do país e gerar uma expansão econômica relacionada à qualidade de vida.

Ainda, o uso de diferentes técnicas no material pode modificar a matéria prima de acordo com o que for especificado, sem a necessidade de destruição da cadeia renovável de produção. Esse tipo de desenvolvimento sustentado é baseado tanto na matéria prima quanto em outros bens gerados, como a melhora da qualidade do ar, manutenção da biodiversidade e redução de área erodidas (OLIVEIRA, 1997). O fato de que o Brasil possui uma capacidade florestal muito grande comprova o quanto esse fato é importante, pois para um país com alta riqueza de madeira é ainda mais compreensível o foco e aprimoramento da sua exploração.

As questões técnicas e científicas são o principal motivo da madeira ser um material favorável à construção, quando comparada à outras formas mais tradicionais utilizadas no país. O desenvolvimento de melhores instrumentos de cálculo e técnicas estruturais na área de coberturas em madeira pode gerar um aumento de interesse dos profissionais no uso desse material, visando abranger diferentes alternativas de construção fora da perspectiva habitual do Brasil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL

A madeira é uma estrutura biológica complexa, composta por químicas e tipos de células atuando em conjunto para servir às necessidades de uma planta viva. Todas as propriedades desse material – sejam física, mecânica, química, biológica ou tecnológica – existem primordialmente para manter vivo um vegetal. Porém, um pesquisador que entende as inter-relações entre forma e função pode inserir as utilidades da madeira em um contexto diferente do natural (WIEDENHOEFT, 2010). No caso da construção civil a madeira é adaptada para diversos sistemas estruturais devido à suas características naturais, que apesar de existirem com o objetivo de balancear a natureza, atendem em grande parte aos requisitos de uma construção.

Como apresentado por Scremim (2013), as madeiras utilizadas na construção são obtidas nos troncos das árvores, podendo ser duras (provenientes de árvores dicotiledôneas da classe *Angiospermæ*) ou macias (provenientes de árvores coníferas da classe *Gimnospermæ*). As principais diferenças entre essas categorias estão na estrutura celular dos troncos, porém as resistências também podem ser comparadas. As árvores que geram madeira de construção são exogênicas, ou seja, crescem pela adição de camadas externas sob a casca. A seção transversal de um tronco possui as camadas conforme mostrado na Figura 1.

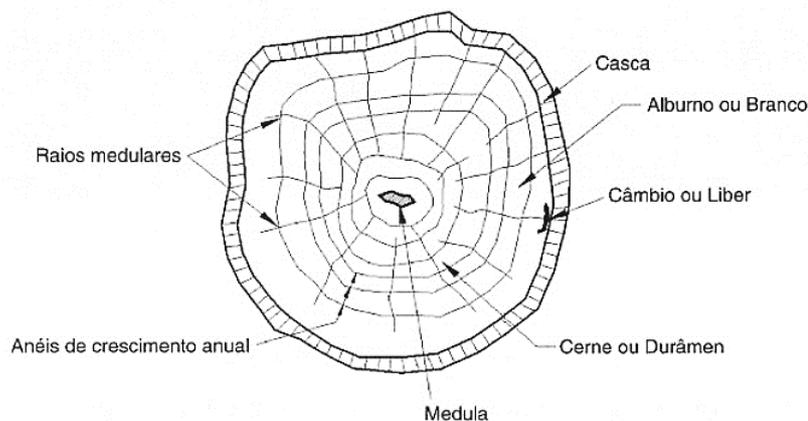


Figura 1 – Seção transversal de um tronco de árvore. Fonte: Pfeil (2015, p. 2).

Segundo Correia (2009), a casca é a camada mais externa da árvore e de espessura irregular, dividida em uma camada externa epidérmica, formada por células

mortas que protegem o lenho, e o líber, camada interna formada por células vivas que conduzem a seiva das folhas para as partes em crescimento.

O albarno é formado por células vivas que conduzem a seiva das raízes para as folhas. Com o crescimento, essas células perdem a atividade fisiológica e formam o cerne, camada de cor mais escura que sustenta o tronco. Já a medula é a parte central do caule, de tecido macio, sem resistência mecânica ou durabilidade (COSTA, 2001).

Pinheiro (2012) salienta que o material estrutural deve ser retirado do cerne, por ser a única parte com as características necessárias à construção e possuir melhor qualidade. Isso se comprova pois a camada já não possui atividade fisiológica, tem coloração mais escura e é responsável sobretudo pelo suporte da árvore.

A microestrutura da madeira é refletida pelas células em grande escala, contendo três componentes orgânicos: celulose, hemicelulose e lignina. A disposição das fibras de celulose é complexa, mas importante, pois explica em grande parte a anisotropia do material (MACKERLE, 2005).

Além de anisotrópica, a madeira também pode ser descrita como ortotrópica, explicada por Kretschmann (2010) como um material com três direções perpendiculares e preferenciais de elasticidade, como visto na Figura 2: longitudinal (eixo paralelo às fibras), radial (normal ao crescimento dos anéis – perpendicular às fibras na direção radial) e tangencial (eixo perpendicular às fibras e tangente ao crescimento dos anéis). As diferenças entre as direções radial e tangencial não possuem grande importância, sendo mais relevante a comparação entre as propriedades na direção das fibras longitudinais e na direção perpendicular às mesmas.

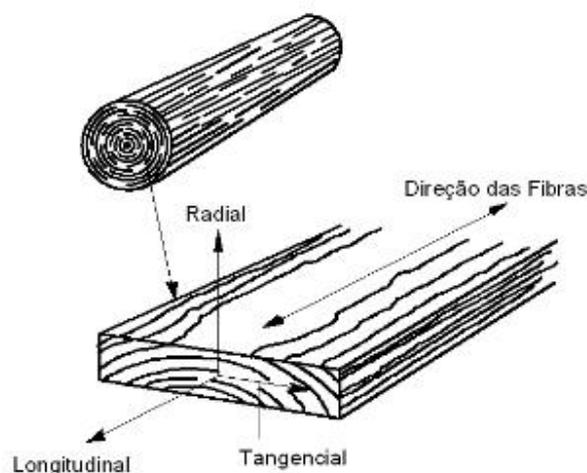


Figura 2 – Direções principais de uma peça de madeira. Fonte: Ritter (1990).

Dentre as principais propriedades físicas da madeira, destacam-se a umidade, densidade, retração, resistência ao fogo e durabilidade natural. Também são importantes suas características térmicas, elétricas e acústicas.

A madeira é um material higroscópico, ou seja, perde ou ganha umidade até alcançar o equilíbrio com o ambiente em que está inserido. Essa variação de teor de água pode influenciar na resistência e comportamento físico e mecânico do material (ALMEIDA, 2012). Ainda segundo Correia (2009), para a aplicação em construções, o teor de água na madeira deve se aproximar o máximo possível da umidade de equilíbrio higroscópico das condições de serviço, de forma a evitar altas alterações volumétricas. Assim, é estabelecido um valor de 12% de umidade relativa para a realização de ensaios relacionados a propriedade físicas que dependam desse teor, sendo feitas correções matemáticas quando necessário.

A densidade se relaciona diretamente com a resistência mecânica do material, porém é fortemente influenciada pelo teor de água, por ser a medida do peso da madeira por unidade de volume (Idem, 2009). Também pode ser considerada, como observado por Martins (2010), como um índice de compacidade das fibras da madeira, apresentando maior ou menor quantidade de fibras por unidade de volume.

Quanto à retração da madeira, Pfeil (2015) afirma que ocorre linearmente em virtude da variação da umidade entre 0% e o ponto de saturação das fibras (30%), podendo ser axial, tangencial ou radial, sendo a retração axial quase nula e a tangencial o dobro da radial, conforme a Figura 3.

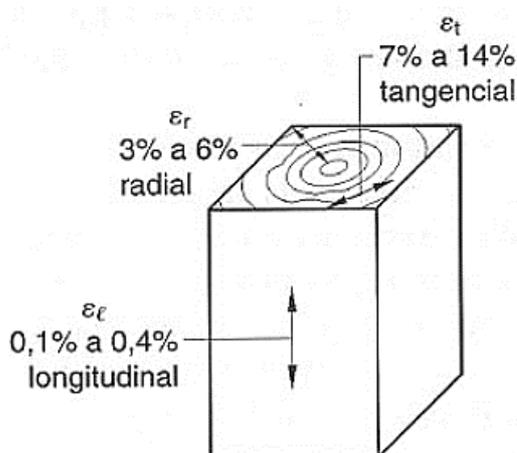


Figura 3 – Retração nas principais direções da madeira. Fonte: Pfeil (2015, p. 4).

A madeira é um material combustível, devido à presença de elementos orgânicos em sua composição, porém Martins (2010) afirma que estruturas de

madeira bem dimensionadas podem ter maior resistência ao fogo do que em estruturas globais de outros materiais. Quando submetidos ao fogo, os elementos estruturais da madeira queimam, porém continuam como isolantes térmicos e retardam o fluxo de calor para o interior da seção, dessa forma o núcleo continua inalterado e abrandam-se a velocidade da degradação térmica, retardando o avanço da carbonização (FIGUEROA; MORAES, 2009).

Para Correia (2009), a durabilidade natural do material em estudo varia de acordo com a espécie e características anatômicas da árvore, além de depender da região do tronco de onde a peça é extraída. A baixa durabilidade de certas espécies pode ser compensada por tratamentos que atingem resultados adequados para a aplicação em estruturas.

Dentro das suas propriedades acústicas, a capacidade da madeira em amortecer vibrações é a principal, gerando uma barreira de ruídos ideal em construções, em que a absorção sonora do material é essencialmente a mesma que a do plástico, tijolo e vidro, como visto em Almeida (2012) apud Faherty (1999). O uso da madeira como revestimento enfraquece a reverberação sonora e melhora a distribuição das ondas no ambiente. A grã da madeira – a orientação dos elementos celulares em relação ao eixo vertical da árvore – também influencia no condicionamento acústico do material (COSTA, 2001).

As propriedades mecânicas apresentadas pela madeira não podem ser analisadas do ponto de vista global, pois estas dependem da orientação das fibras (Idem, 2012). As solicitações de tração e compressão devem ser observadas no sentido paralelo e perpendicular às fibras, e a resistência à flexão e ao corte também devem ser analisadas.

De acordo com Faria e Negrão (2009), quanto à compressão, quando solicitado paralelamente às fibras o material possui maior resistência comparado à uma solicitação perpendicular, pois o crescimento natural das árvores exige uma maior resistência no sentido paralelo devido aos esforços atuantes no tronco.

No sentido axial, a compressão provoca a separação das fibras longitudinais, e está ligada diretamente ao teor de água, massa volumétrica e possíveis defeitos. O valor máximo de resistência ocorre quando a madeira está no estado anidro, e o mínimo quando supera o ponto de saturação de 30% de umidade. Em relação a massa volumétrica, quanto maior for, maior será a resistência à compressão axial (CORREIA, 2009). Já no sentido perpendicular às fibras, a

resistência à compressão depende da carga aplicada ao elemento, e se relaciona a resistência ao esmagamento, sendo aproximadamente 20% menor que a resistência na direção paralela.

No caso da tração ocorre a mesma relação entre sentido paralelo e perpendicular, em que a resistência perpendicular às fibras é menor que na direção paralela em aproximadamente 50 vezes (NIELSEN, 1996). Segundo Almeida (2012), a existência de fibras na madeira na direção transversal é muito pequena, levando a falta de ocorrência de ligações intercelulares nessa direção e diminuindo a resistência dos elementos.

O módulo de elasticidade da madeira é obtido do trecho linear do diagrama tensão x deformação específica, como mostrado no Gráfico 1 para tensão paralela às fibras.

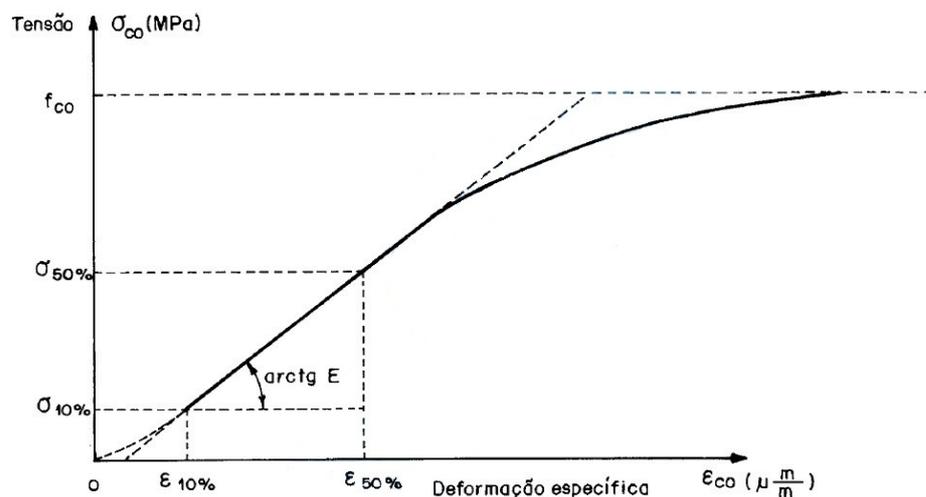


Gráfico 1 – Diagrama tensão x deformação específica para determinação da rigidez à compressão paralela às fibras. Fonte: NBR 7190 (1997, p. 51).

Também é essencial o estudo da resistência à flexão da madeira, levando em conta o fato de a mesma ser muito utilizada em vigas. A elevada resistência à flexão estática atinge valores próximos aos da tração paralela às fibras (CORREIA, 2009), e só está abaixo da resistência de metais neste quesito, apesar de ter como vantagem uma ótima relação resistência-peso.

Conforme Martins (2010), as tensões de corte ou escorregamento podem existir nos planos longitudinal e transversal, sendo que a resistência transversal é cerca de 3 vezes maior do que a axial. Em ambas as situações, a resistência é bastante influenciada pela existência de defeitos no material, como fendas e fissuras.

Também pode se considerar as tensões tangenciais chamadas de oblíquas às fibras, dessa forma a madeira sofre tensões tangenciais de corte, deslizamento e rotação, visto pela Figura 4.

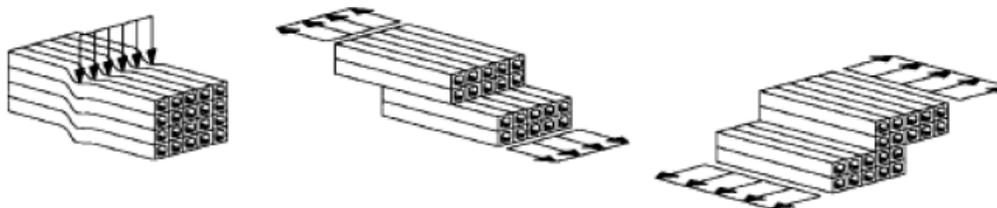


Figura 4 – Possíveis tensões tangenciais na madeira. Fonte: Ritter (1990, p. 92).

A elasticidade de um material revela que deformações geradas por baixas tensões podem ser revertidas, porém a partir de uma certa intensidade de forças podem ocorrer falhas e deformações plásticas (KRETSCHMANN, 2010). Almeida (2012) define fluência como a deformação que um material sofre ao longo do tempo sob cargas prolongadas, podendo ser condicionada pelo teor de água, em que valores superiores podem ser encontrados em madeiras com teores de água mais elevados. Uma das soluções para prevenção da fluência seria o emprego de contra flechas e cálculo com estimativas maiores de carga de forma a impedir a estrutura a entrar em regime plástico.

Dentre outras propriedades da madeira estão a resiliência, dureza e fendilhamento do material. A resiliência, ou resistência perante o impacto súbito de uma carga, é maior na madeira do que para cargas estáticas. A dureza depende muito da espécie de madeira utilizada, e está relacionada à resistência do material à abrasão, podendo interferir na escolha de ferramentas de corte. Já o fendilhamento ou clivagem se deve à aplicação de forças que separam facilmente os planos de uma peça, e é baixa no sentido axial, apesar de também variar de acordo com as espécies do material (MARTINS, 2010).

Por fim, a NBR 7190/97 constata que as classes de resistência das madeiras objetivam o seu emprego com propriedades padronizadas, de forma a orientar a escolha do material para elaboração de projetos estruturais. O enquadramento das classes é dividido entre coníferas e dicotiledôneas, como apresentado pelos Quadros 1 e 2, respectivamente.

Nesse caso as classes C20, C25, C30, C40, C50 e C60 (sendo a C50 apresentada somente na revisão da NBR 7190 de 2011) se referem às máximas resistências de 20, 25, 30, 40, 50 e 60 MPa, f_{c0k} a resistência à compressão paralela às fibras, f_{vk} a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, $E_{c0,m}$ o módulo de elasticidade na condição padrão de umidade, $\rho_{bas,m}$ a densidade básica na condição padrão de umidade, e $\rho_{aparente}$ a densidade aparente.

Coníferas (Valores na condição padrão de referência U = 12%)					
Classes	f_{c0k} MPa	f_{vk} MPa	$E_{c0,m}$ MPa	$\rho_{bas,m}$ kg/m ³	$\rho_{aparente}$ kg/m ³
C 20	20	4	3 500	400	500
C 25	25	5	8 500	450	550
C 30	30	6	14 500	500	600

Quadro 1 – Classes de resistência das coníferas. Fonte: NBR 7190 (1997, p. 16).

Dicotiledôneas (Valores na condição padrão de referência U = 12%)					
Classes	f_{c0k} MPa	f_{vk} MPa	$E_{c0,m}$ MPa	$\rho_{bas,m}$ kg/m ³	$\rho_{aparente}$ kg/m ³
C 20	20	4	9 500	500	650
C 30	30	5	14 500	650	800
C 40	40	6	19 500	750	950
C 50 *	50	7	22 000	-	970
C 60	60	8	24 500	800	1000

* Classe de resistência prevista no texto de revisão da NBR 7190/97, não possui valor de densidade básica

Quadro 2 – Classes de resistência das dicotiledôneas. Fonte: NBR 7190 (1997, p. 16).

2.2 TRELIÇAS DE COBERTURA

A madeira pode ser observada em uma grande variedade de sistemas estruturais que vêm evoluindo em função de sua industrialização. Dentre esses

sistemas, o treliçado é um dos mais tradicionais, usado em coberturas tanto residenciais quanto industriais e pontes. Para Premrov e Tajnik (2008), a aplicação de treliças de madeira se tornou frequente nas construções atuais e conhecida pela sua agradável aparência arquitetônica, projeto leve e fácil fabricação, se comparada a outros materiais como o aço, por exemplo.

Pode-se definir uma treliça como um sistema de barras situadas em um plano e articuladas umas às outras em suas extremidades, de forma a obter um elemento resistente (MOLITERNO, 2010). É um sistema em que são carregados somente os seus nós por ser baseado no equilíbrio de esforços nodais, gerando somente compressão e tração axial nas barras.

Existem vários tipos de sistemas treliçados (Figura 5), sendo que dentre os principais, a treliça Inglesa ou *Howe* é a mais tradicional para o uso em madeira em função de sua geometria e dos esforços atuantes para cargas de gravidade. Nesse modelo existe tração no montante e banzo inferior, e compressão na diagonal e no banzo superior. Na treliça *Pratt* ocorre o contrário, os esforços se invertem nos montantes e diagonais (PFEIL, 2015).

É importante ressaltar que a alternância dos esforços de tração e compressão axiais devido às inversões no sentido do carregamento não interfere no projeto, pois nesse caso a resistência à compressão paralela às fibras é igual à resistência à tração paralela às fibras.

Um outro modelo usado em coberturas de madeira é o *Bowstring*, comumente empregado para grandes vãos ou no uso industrial, pode ser muito econômico devido à simples simetria, de acordo com Calil Júnior (1997).

Além das treliças de duas águas, também são muito utilizados em coberturas os sistemas de meia água, como marquise, alpendre e *Shed*, também conhecidos como meia tesouras. Treliças de alpendre são em balanço e geralmente empregadas para a proteção da abertura de edificações, podendo ser executadas com vãos de aproximadamente 4,50 metros. Também podem ser utilizadas em locais onde há necessidade de uma boa iluminação natural, assim os painéis verticais são orientados no sentido norte de forma a garantir uma isolamento máxima.

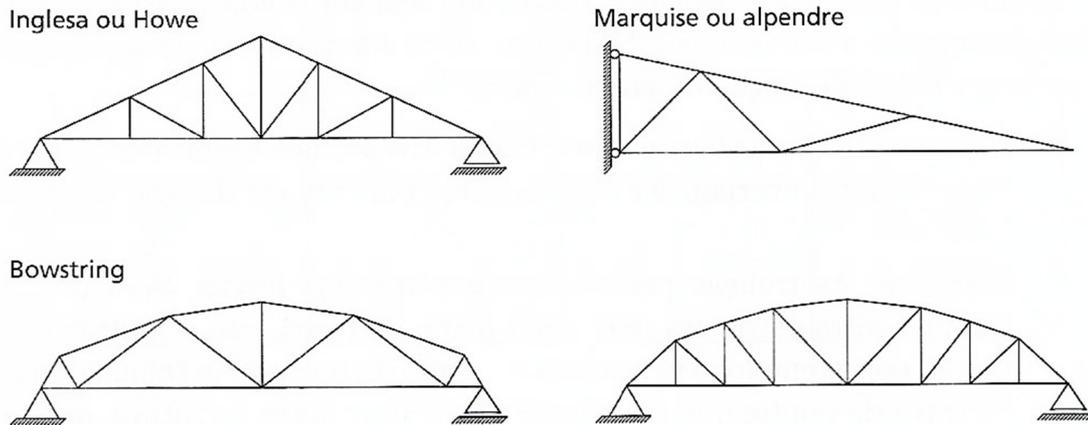


Figura 5 – Tipos de treliças de madeira para cobertura. Fonte: Moliterno (2010, p. 48).

As treliças de cobertura sustentam o telhamento e seu vigamento de apoio, composto basicamente de terças, caibros e ripas (trama) para o caso de telhas cerâmicas, como apresentado na Figura 6. Moliterno (2010) especifica a terça como a viga de madeira apoiada sobre as tesouras para a sustentação dos caibros, peças de madeira de pequena esquadria que sustentam as ripas. As ripas são peças de pequena esquadria pregadas sobre os caibros, para sustentação das telhas. Em execuções com chapas de fibrocimento, alumínio ou PVC, o emprego de ripas e caibros é dispensado, pois estes se apoiam diretamente sobre as terças.

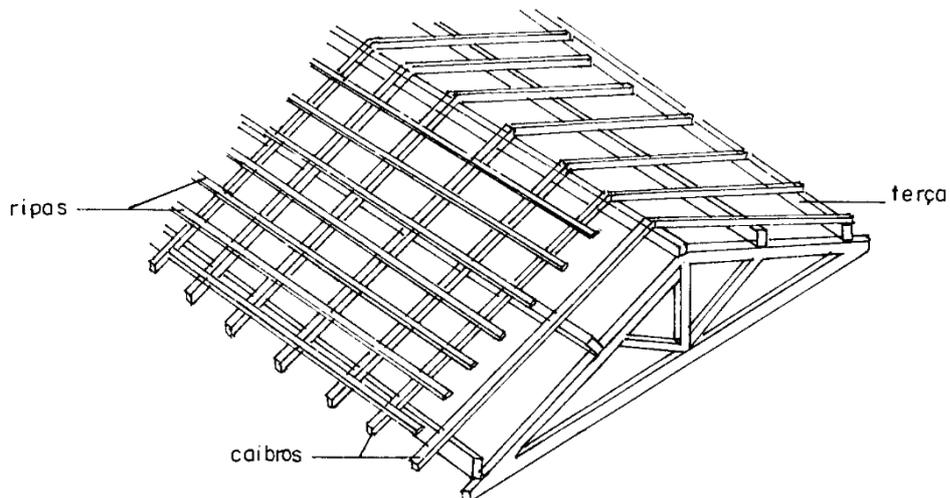


Figura 6 – Vigamento para cobertura com telhas cerâmicas. Fonte: Milito (2004, p. 105).

Para Tomczyk (2010), a principal característica das treliças é a alternância nas diversas barras que compõem a estrutura entre esforços de tração e compressão, variando de acordo com a disposição do carregamento da estrutura e o modelo de treliça adotado. Segundo Medeiros (2010), o contraventamento é parte indispensável

deste tipo de sistema estrutural, pois um modelo ideal simplificado de análise considera apenas os deslocamentos no plano da treliça. Assim, as estruturas podem apresentar imperfeições geométricas e heterogeneidade das propriedades físicas dos materiais que podem provocar deslocamentos fora do plano da estrutura, que devem ser previstos em projeto e combatidos pelo contraventamento.

Geralmente, o dimensionamento de treliças é realizado em função de variáveis como vinculação, dimensões e formas dos seus elementos componentes, magnitude e posição das forças aplicadas nos nós, e propriedades de resistência e de rigidez das espécies adotadas (CHRISTOFORO; LAHR, 2007). Além disso, segundo Silih et al. (2004), os principais parâmetros a serem considerados de forma a obter um projeto satisfatório são a configuração da treliça, a relação distância/profundidade, o número e tipo de membros intermediários (diagonais e verticais) e o tipo das ligações. Essas características influenciam na resistência, distribuição de forças, peso e custo de uma treliça.

Dentre as suas vantagens, as treliças apresentam grande versatilidade quanto à sua forma e disposição das barras, sendo possível obter estruturas apropriadas para cada caso, de forma a otimizar o funcionamento estrutural das barras. Também é interessante o fato desse tipo de estrutura ser susceptível a ajustes de acordo com as solicitações provenientes do carregamento (MARTINS, 2010).

2.3 ENQUADRAMENTO NORMATIVO

As normas são materiais de apoio elaborados com base em ensaios e métodos científicos, cujos resultados podem ser verificados, garantindo a autenticidade das informações (TOMCZYK, 2010). Tais dados são indispensáveis na elaboração de um projeto, por terem sido criados com a finalidade de garantir segurança, conforto e apresentar informações apropriadas a qualquer tipo de situação.

O projeto seguirá as diretrizes da norma NBR 7190/1997, que trata de projetos de estruturas de madeira. Como a norma europeia EUROCODE 5 (2008) utiliza o mesmo método que a norma brasileira quanto aos estados limites, também é possível analisar suas informações em relação à norma da ABNT.

Na NBR 7190 são utilizados os métodos dos estados limites, que podem ser divididos em estados limites últimos e de utilização. Os estados limites últimos são

aqueles que podem determinar a paralisação do uso da construção por sua simples ocorrência, sendo caracterizados por: perda de equilíbrio como corpo rígido, ruptura ou deformação plástica dos materiais, transformação da estrutura em sistema hipostático, instabilidade por deformação e ressonância. Já os estados limites de utilização são aqueles que causam efeitos estruturais que não respeitam as condições especificadas ou que comprometem a durabilidade da construção, podendo ser deformações ou vibrações excessivas que afetem a utilização normal da construção.

A segurança da estrutura quanto aos possíveis estados limites deve ser seguida de acordo com os requisitos da NBR 7190, obedecendo às condições analíticas expressas pela seguinte equação:

$$S_d \leq R_d \quad (1)$$

Em que S_d é a sollicitação de cálculo e R_d é a resistência de cálculo, determinadas em função de uma combinação de forças e valores básicos de segurança.

A NBR 7190 (1997) define ações como causas que provocam esforços ou deformações nas estruturas, e estas podem ser consideradas como permanentes, variáveis e excepcionais. Em estruturas de madeira são geralmente analisadas as cargas permanentes e acidentais verticais, e carga devida ao vento.

A carga permanente é constituída pelo peso próprio da estrutura e de suas partes fixas não estruturais, enquanto todas as outras cargas são parte de uma mesma ação variável. Por ser muito baixa a probabilidade de ocorrência simultânea das cargas acidentais verticais e ação do vento, estas são consideradas ações de naturezas diferentes (NBR 7190, 1997).

Para a obtenção das sollicitações normais de projeto é necessária uma combinação de ações no estado limite último, indicada pela NBR 7190 para ações últimas normais, constituída de ações permanentes e acidentais:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} F_{Gi,k} + \gamma_Q [F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} F_{Qj,k}] \quad (2)$$

Onde γ_{Gi} e γ_Q são coeficientes de ponderação, $F_{Gi,k}$ representa o valor característico de ações permanentes, $F_{Q1,k}$ o valor característico da ação variável considerada como principal para a combinação e $\psi_{0j} F_{Qj,k}$ os valores reduzidos de combinação das demais variáveis.

Ainda podem ser calculadas combinações últimas para ações especiais ou de construção e ações excepcionais, apresentadas respectivamente pelas equações 3 e 4:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} F_{Gi,k} + \gamma_Q [F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j,ef} F_{Qj,k}] \quad (3)$$

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} F_{Gi,k} + F_{Q,exc} + \gamma_Q \sum_{j=1}^n \Psi_{0j,ef} F_{Qj,k} \quad (4)$$

Em que os significados das parcelas são definidos da mesma maneira que os da combinação normal, e $F_{Q,exc}$ representando o valor da ação transitória excepcional. Os valores numéricos dos coeficientes γ_f encontram-se no Quadro 3 e os coeficientes de combinação ψ_0 e de utilização ψ_1 (frequente) e ψ_2 (quase permanente) no Quadro 4.

Combinações	Ações Permanentes			Ações Variáveis	
	Cargas Permanentes de Pequena Variabilidade (γ_g)	Cargas Permanentes de Grande Variabilidade (γ_g)	Cargas Permanentes Indiretas (γ_L)	Ações Variáveis em Geral, Incluídas as Cargas Acidentais Móveis (γ_q)	Ações Variáveis em Função da Temperatura Ambiente (γ_T)
Normais	1,3 (1,0)	1,4 (0,9)	1,2 (0)	1,4	1,2
Especiais ou de Construção	1,2 (1,0)	1,3 (0,9)	1,2 (0)	1,2	1,0
Excepcionais	1,1 (1,0)	1,2 (0,9)	0 (0)	1,0	0

- Os valores entre parênteses correspondem a ações permanentes favoráveis à segurança

Quadro 3 – Coeficientes de majoração γ_f . Fonte: Adaptado de NBR 7190 (1997, p. 12).

Descrição das Ações		ψ_0	ψ_1	ψ_2
Ações em Estruturas Correntes	- Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
	- Pressão dinâmica do vento	0,5	0,2	0
Cargas Acidentais em Edifícios	- Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos fixos, nem de elevadas concentrações de pessoas	0,4	0,3	0,2
	- Locais onde há predominância de pesos de equipamentos fixos, ou de elevadas concentrações de pessoas	0,7	0,6	0,4
	- Bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Cargas Móveis e Seus Efeitos Dinâmicos	- Pontes de pedestres	0,4	0,3	0,2
	- Pontes Rodoviárias	0,6	0,4	0,2
	- Pontes ferroviárias (ferrovias não especializadas)	0,8	0,6	0,4

Quadro 4 – Fatores de combinação e de utilização. Fonte: Adaptado de NBR 7190 (1997, p. 9).

Já a resistência de cálculo da madeira é calculada pela seguinte equação:

$$R_d = k_{mod} \frac{R_k}{\gamma_w} \quad (5)$$

A resistência característica da madeira R_k é obtida por meio de ensaios padronizados e o coeficiente de minoração γ_w é escolhido segundo o Quadro 5, em que f_k/f_m é a relação entre a resistência característica e a resistência média do material.

Esforço	f_k/f_m	γ_w
Compressão Paralela às Fibras	0,70	1,4
Tração Paralela às Fibras	0,70	1,8
Cisalhamento Paralelo às Fibras	0,54	1,8

Quadro 5 – Relação f_k/f_m e coeficiente γ_w para cada esforço. Fonte: NBR 7190 (1997, p. 21).

O coeficiente k_{mod} é obtido pelo produto de três fatores, que levam em conta o tipo de produto de madeira empregada e tempo de duração da carga ($k_{mod 1}$), efeito da umidade ($k_{mod 2}$), e classificação estrutural da madeira ($k_{mod 3}$):

$$k_{mod} = k_{mod 1} \times k_{mod 2} \times k_{mod 3} \quad (6)$$

Como apresentado no Quadro 6, para a obtenção do $k_{mod 1}$ é necessário definir a classe de carregamento do material, e para o coeficiente $k_{mod 2}$ deve-se encontrar as classes de umidade, caracterizadas de acordo com o Quadro 7.

Tipos de Madeira		Madeira Serrada Madeira Laminada Colada Madeira Compensada	Madeira Recompоста
CLASSES DE CARREGAMENTO	Permanente (vida útil da construção)	$k_{mod 1} = 0,60$	$k_{mod 1} = 0,30$
	Longa Duração (mais de 6 meses)	$k_{mod 1} = 0,70$	$k_{mod 1} = 0,45$
	Média Duração (1 semana a 6 meses)	$k_{mod 1} = 0,80$	$k_{mod 1} = 0,65$
	Curta Duração (menos de 1 semana)	$k_{mod 1} = 0,90$	$k_{mod 1} = 0,90$
	Duração Instantânea	$k_{mod 1} = 1,10$	$k_{mod 1} = 1,10$
CLASSES DE UMIDADE	1 e 2	$k_{mod 2} = 1,00$	$k_{mod 2} = 1,00$
	3 e 4	$k_{mod 2} = 0,80$	$k_{mod 2} = 0,90$

Quadro 6 – Valores dos coeficientes $k_{mod 1}$ e $k_{mod 2}$. Fonte: Adaptado de NBR 7190 (1997, p. 18).

Classe de Umidade	Umidade Relativa do Ambiente (U_{amb})	Grau de Umidade da Madeira
1 (padrão)	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$85\% < U_{amb}$ durante longos períodos	$\geq 25\%$

Quadro 7 – Classes de umidade. Fonte: NBR 7190 (1997, p. 14).

Por fim, o último coeficiente $k_{mod\ 3}$ ajusta os valores de resistência em função da categoria estrutural da madeira utilizada, como visto no Quadro 8.

Produto e Tipo de Madeira	Categoria	$k_{mod\ 3}$
Madeira Serrada Dicotiledônea	1ª Categoria	1,0
	2ª Categoria	0,8
Madeira Serrada Conífera	1ª ou 2ª	0,8
Madeira Laminada e Colada (laminada com espessura t e colada com raio de curvatura r)	1ª ou 2ª (peça curva)	$1,0 - 2000(r/t)^2$
	1ª ou 2ª (peça reta)	1,0

Quadro 8 – Valores do coeficiente $k_{mod\ 3}$. Fonte: Adaptado de NBR 7190 (1997, p. 17).

Em verificações de segurança, ainda nos estados limites últimos, em que os esforços solicitantes dependem da rigidez da madeira, o módulo de elasticidade paralelamente às fibras deve ser calculado a partir do valor médio de elasticidade E_c obtido em ensaios de compressão paralela às fibras:

$$E_{c,ef} = k_{mod\ 1} \times k_{mod\ 2} \times k_{mod\ 3} \times E_c \quad (7)$$

Além dos cálculos necessários no estado limite último, também devem ser feitas combinações e verificações no caso dos estados limites de utilização. Nessa situação, as ações são combinadas sem majoração, ou seja, γ_f é igual a 1, e os valores

características variáveis são multiplicados por fatores ψ_1 ou ψ_2 de forma a se obter valores frequentes ou quase permanentes.

As combinações de longa duração, adotadas usualmente para o controle de estruturas, são expressas de forma que as ações variáveis Q_j sejam combinadas com seus valores quase permanentes:

$$F_{d, uti} = \Sigma G_i + \Sigma \psi_{2j} Q_j \quad (8)$$

Nas combinações de média duração (frequente), curta duração (rara) e de duração instantânea, uma ação variável de base Q_1 é combinada às ações permanentes e às outras ações Q_j de acordo com:

$$F_{d, uti} = \Sigma G_i + \psi_n Q_1 + \Sigma \psi_k Q_j \quad (9)$$

Em que os fatores ψ_n e ψ_k são obtidos observando o mesmo quadro utilizado no estado de limite último (Quadro 4). Nesse caso o fator ψ_n é considerado como ψ_1 e o fator ψ_k como ψ_1 para curta duração e ψ_2 para duração média e instantânea.

A NBR 7190 apresenta os esforços resistentes das peças estruturais de forma a serem determinados pela hipótese de comportamento elastofrágil do material para tração paralela às fibras, e hipótese de comportamento elastoplástico para peças submetidas à flexocompressão.

Em peças submetidas à compressão axial, o critério de segurança é dado pela Equação 10, enquanto em peças submetidas à compressão normal às fibras, a segurança é garantida pela Equação 11. Em ambos os casos σ é a tensão solicitante de projeto e f a tensão resistente de projeto.

$$\sigma_{cd} \leq f_{cd} \quad (10)$$

$$\sigma_{cnd} < f_{cnd} \quad (11)$$

No caso de peças tracionadas paralelamente às fibras, a condição de segurança é dada por:

$$\sigma_{td} \leq f_{td} \quad (12)$$

A resistência da madeira à tração normal às fibras é considerada nula para fins de projeto estrutural. Caso ocorra compressão ou tração inclinada em relação às fibras, a tensão é dada pela fórmula empírica de Hankinson:

$$f_{\theta d} = \frac{f_d f_{nd}}{f_d \operatorname{sen}^2 \theta + f_{nd} \operatorname{cos}^2 \theta} \quad (13)$$

Onde f_d é a resistência paralela e f_{nd} a resistência normal às fibras, e θ o ângulo em relação à direção das fibras.

2.4 OTIMIZAÇÃO DA TRELIÇA DE COBERTURA EM MADEIRA

Otimizar é projetar um sistema com maior eficiência e menor custo. Deve-se encontrar os parâmetros de um sistema estrutural de modo que o seu rendimento esteja próximo do valor ótimo, baseado em um critério previamente analisado (SOUZA, 2005). O uso de estruturas de madeira para fins de cobertura existe há muito tempo na história da humanidade, porém apesar dessa tradição, o conhecimento aprofundado de técnicas e propriedades só começou a se desenvolver a partir do século XIX. Assim, com processos de cálculo mais apropriados foi possível realizar projetos estruturais mais elaborados ao passar dos anos (RIBEIRO, 2008).

Kripka et al. (2008) discutem a diversidade de soluções estaticamente possíveis em treliças de forma a se vencer um determinado vão ou suportar certo carregamento. Esse sistema estrutural apresenta um campo bastante aberto quanto ao emprego de técnicas de otimização em seu dimensionamento, com principais problemas de evolução na otimização de seções transversais, geometria e topologia.

Ao detalhar os possíveis problemas de otimização estrutural, Ribeiro (2008) apresenta a questão de uma estrutura submetida a vários carregamentos, com possíveis variações no sistema de apoios ou composta por vários tipos de materiais. Apesar das diversas opções de otimização de uma estrutura em treliça, esta também possui algumas restrições, dentre elas o deslocamento admissível, tensão máxima de flambagem e tensão normal máxima. Essas características, apesar de limitantes, podem não interferir em outras soluções se essas forem feitas de forma correta e de acordo com as normas e requisitos propostos.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo são apresentadas as etapas, ferramentas e métodos utilizados para o projeto de uma treliça em madeira para cobertura de telhado de uma edificação em alvenaria não estrutural de dimensões 8 por 5 metros (Figura 7) situado na cidade de Curitiba. Com o intuito de realizar o dimensionamento e análise da estrutura, os cálculos foram realizados conforme os requisitos da NBR 7190/1997 de projetos de estruturas de madeira.

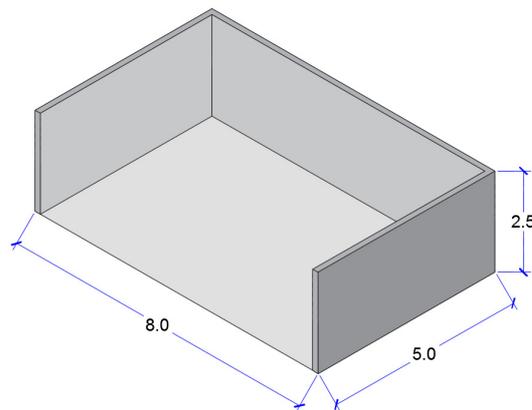


Figura 7 – Estrutura e suas dimensões em metros. Fonte: Acervo da autora (2017).

O projeto foi realizado com base nos procedimentos apresentados pelo fluxograma detalhado pela Figura 8.

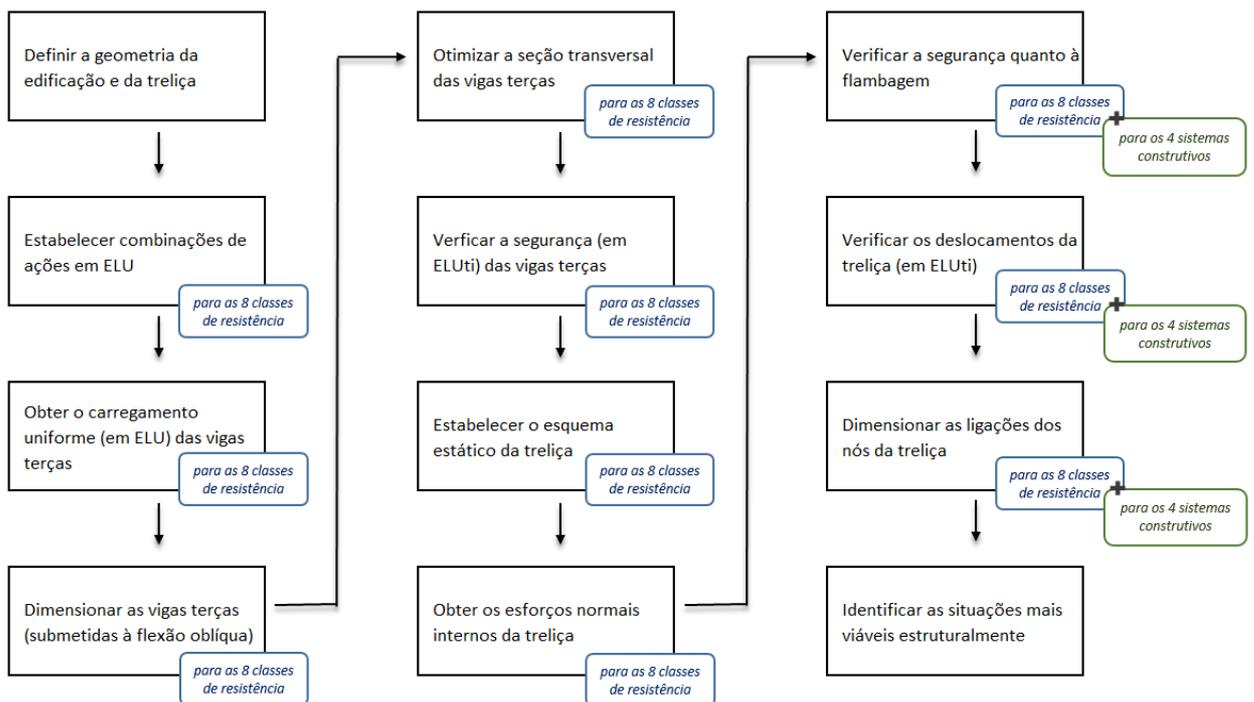


Figura 8 – Fluxograma de procedimentos. Fonte: Acervo da autora (2017).

Para a edificação em questão, foi definida a geometria da treliça de acordo com os parâmetros fixos, sendo estes o comprimento e espaçamento das vigas terças e as ações permanentes e acidentais, com exceção do peso próprio que muda de acordo com as classes de madeira utilizadas, de acordo com a seguinte equação:

$$\text{Peso Próprio (por metro linear)} = p_{\text{aparente}} b h \quad (14)$$

Em que b é a largura e h a altura da seção transversal das vigas terças, e p_{aparente} a densidade aparente da madeira.

Dentro das ações permanentes, o peso estimado para as ripas e caibros foi calculado com base em uma cobertura com caibros a cada 50 cm e ripas a cada 30 cm, usando madeira dicotiledônea de classe C30, ou seja, de peso aparente igual a 800 kg/m³. Dessa maneira, em um metro quadrado há o volume de 2 caibros de 5 por 10 cm e 3 ripas de 1,5 por 5 cm, que multiplicado pelo peso aparente de 800 kg/m³ gera um peso de 0,098 kN/m², utilizado como 0,1 kN/m² no dimensionamento.

O peso das telhas úmidas foi estabelecido de acordo com a telha cerâmica esmaltada *Terracotagres*, de no mínimo 35% de inclinação. Segundo os cálculos realizados a partir das informações do fabricante, a telha possui um peso de 20,85 kg/m² e absorção mínima de 7%. Dessa forma, chegou-se a um peso úmido de 22 kg/m², ou seja, 0,22 kN/m².

As ações acidentais de sobrecarga foram obtidas pela NBR 6120 (1980), a partir da tabela de valores mínimos das cargas verticais. Foi considerado um caso de terraço inacessível a pessoas, logo a sobrecarga foi de 0,5 kN/m², visando um resultado ainda mais otimizado. A força gerada pela ação do vento foi calculada conforme a NBR 6123 (1988), segundo as seguintes equações:

$$V_k = V_o S_1 S_2 S_3 \quad (15)$$

$$q = (0,613 V_k^2) / 1000 \quad (16)$$

Sendo a velocidade característica V_k obtida a partir da velocidade básica do vento V_o , e os fatores topográfico (S_1), de rugosidade (S_2) e probabilístico (S_3). Para uma velocidade básica de 42 m/s na cidade de Curitiba, e fatores iguais a 1 para S_1 , 0,79 para S_2 e 0,88 para S_3 , de acordo com as categorias da norma, a pressão dinâmica do vento q foi definida como 0,52 kN/m² para o dimensionamento.

Foi estabelecida uma treliça do tipo Howe, por ser um dos modelos mais tradicionais na construção civil, como apresentado pela Figura 9. O comprimento da viga terça foi definido para que não passasse de 6 metros, de forma a evitar emendas ou exageros nos vãos entre as treliças. Assim, o vão entre as treliças foi de 4 metros, com um espaçamento entre as vigas terças de 1,33 metros. O ângulo da treliça foi definido a partir da inclinação mínima das telhas, sendo a inclinação escolhida de 37%, ou seja, ângulo de 20° 18'.

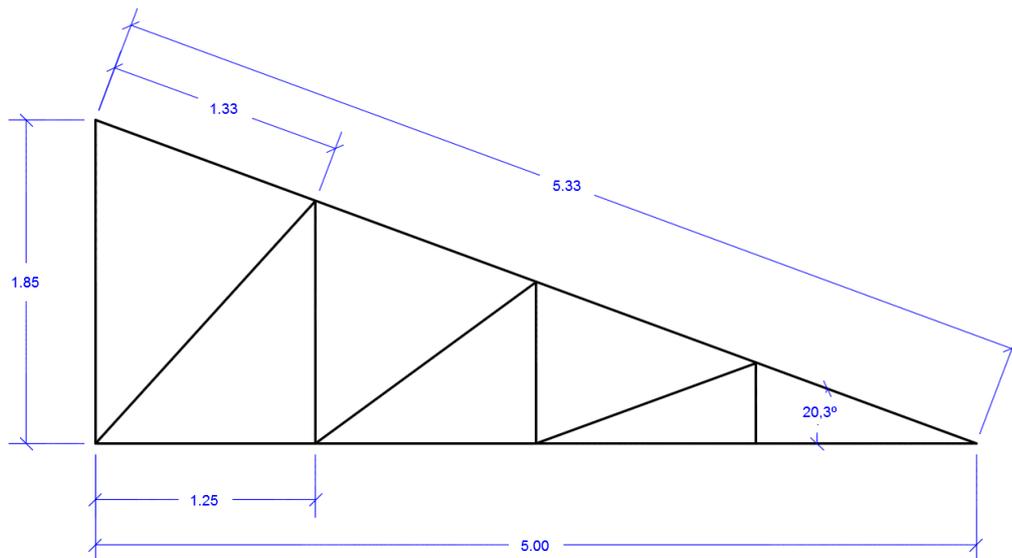


Figura 9 – Geometria e dimensões da treliça em metros. Fonte: Acervo da autora (2017).

Para cada classe de resistência, tanto para coníferas quanto dicotiledôneas, foram otimizadas as seções transversais da viga terça de duas maneiras: seguindo a relação de $\frac{1}{2}$ entre base e altura, e aproximando para perfis comerciais já existentes, apresentados pelo Quadro 9.

Dimensões Comerciais (cm)		
5,0 x 16,0	6,0 x 16,0	20,0 x 20,0
6,0 x 12,0	10,0 x 10,0	25,0 x 25,0
6,0 x 15,0	12,0 x 12,0	25,0 x 30,0

Quadro 9 – Dimensões comerciais de vigas de madeira serrada. Fonte: Pfeil (2015, p. 194).

Foram realizadas as combinações de ações em ELU e ELUti para vigas terças submetidas à flexão simples oblíqua. No caso do Estado Limite Último, o carregamento foi calculado segundo a Equação 2, a partir dos valores apresentados

pela Tabela 1 e os coeficientes γ_{Gi} , γ_Q e ψ_{0j} iguais a 1,3, 1,4 e 0,5, respectivamente. O cálculo de F_d para o Estado Limite de Utilização foi obtido a partir da Equação 8, para as mesmas cargas da Tabela 1 e com o coeficiente ψ_{2j} igual a 0,2 para a sobrecarga e 0 para a ação do vento.

Tabela 1 – Cargas atuantes na estrutura. Fonte: Acervo da autora (2017).

Ações Permanentes	
Peso Próprio	- variável de acordo com a classe -
Ripas e Caibros	0,10 kN/m ²
Telhas Úmidas	0,22 kN/m ²
Ações Acidentais	
Sobrecarga	0,50 kN/m ²
Ação do Vento	0,52 kN/m ²

Após a obtenção das combinações e carregamento na estrutura em ambos os Estados Limites, foram realizados os cálculos para as condições de segurança, considerando as barras solicitadas à flexão simples oblíqua.

No Estado Limite Último, calculou-se primeiramente o momento fletor máximo para os dois eixos, como apresentado a seguir:

$$M_d = \frac{F_d L^2}{8} \quad (17)$$

$$M_{d,x} = M_d \cos 20,3^\circ \quad (18)$$

$$M_{d,y} = M_d \sin 20,3^\circ \quad (19)$$

Também foram obtidos os módulos de resistência para ambos os eixos, a partir da seção transversal da viga terça:

$$W_x = \frac{b h^2}{6} \quad (20)$$

$$W_y = \frac{h b^2}{6} \quad (21)$$

Através do momento fletor e módulo de resistência foram encontradas as tensões para o eixo x e y da seção, de acordo com as equações:

$$\sigma_{M_{d,x}} = \frac{M_{d,x}}{W_x} \quad (22)$$

$$\sigma_{M_{d,y}} = \frac{M_{d,y}}{W_y} \quad (23)$$

O coeficiente k_{mod} foi identificado segundo a NBR 7190, para um carregamento de longa duração ($k_{mod1} = 0,7$), classe de umidade 1 para madeira tratada ($k_{mod2} = 1,0$) e de primeira categoria ($k_{mod3} = 1,0$). Assim, o produto dos coeficientes gerou um k_{mod} igual a 0,7.

A resistência de cálculo R_d foi obtida segundo a Equação 5, onde a resistência característica R_k foi variável para cada classe de madeira e o coeficiente de minoração γ_w igual a 1,4.

Na verificação de segurança em ELU, foram cumpridos os critérios apresentados pelas Equações 24 e 25, sendo o primeiro também usado para observar a otimização da viga terça, que é melhorada quando o resultado estiver o mais próximo de 1,0.

$$\frac{\sigma_{M_{d,x}}}{R_d} + k_M \frac{\sigma_{M_{d,y}}}{R_d} \leq 1 \quad (24)$$

$$k_M \frac{\sigma_{M_{d,x}}}{R_d} + \frac{\sigma_{M_{d,y}}}{R_d} \leq 1 \quad (25)$$

Em ambos os casos, o coeficiente de correção k_M foi de 0,5 devido ao fato da seção ser retangular, porém em outro tipo de seção o coeficiente seria igual a 1,0.

Também foi realizada a verificação das tensões de cisalhamento, em que o cisalhamento atuante deve ser menor ou igual ao cisalhamento resistente. O cisalhamento atuante V_d foi encontrado de acordo com as seguintes equações:

$$V_d = \frac{F_d L}{2} \quad (26)$$

$$\tau_{atuante} = \frac{3 V_d}{2 b h} \quad (27)$$

Já o cisalhamento resistente depende do coeficiente k_{mod} e da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras f_{vk} :

$$f_{vd} = k_{mod} \frac{f_{vk}}{1,8} \quad (28)$$

Em seguida, foi verificada a condição de segurança no Estado Limite de Utilização, que compara o deslocamento limite γ_{lim} e efetivo γ_{ef} . O deslocamento limite foi encontrado pela seguinte relação, em que L é o comprimento da viga terça:

$$\gamma_{lim} = \frac{L}{300} \quad (29)$$

Enquanto o deslocamento efetivo foi calculado pela Equação 30, sendo a sua segunda parcela calculada para o peso (P_d) de uma pessoa de 80 kg. O módulo de elasticidade $E_{c, ef}$ foi obtido pelo produto do k_{mod} com o módulo $E_{c0, m}$, e o momento de inércia I foi calculado em relação ao eixo inclinado, por ser referente à flexão simples oblíqua. Para que a condição se verifique, o deslocamento efetivo deve ser menor que o deslocamento limite.

$$\gamma_{ef} = \frac{5 F_{d, uti} L^4}{384 E_{c, ef} I} + \frac{P_d L^3}{48 E_{c, ef} I} \quad (30)$$

Todos os cálculos foram realizados e as seções transversais otimizadas segundo as normas para as oito classes de madeira, de coníferas e dicotiledôneas. Assim, para cada classe foram obtidos os carregamentos em cada nó e estabelecido o esquema estático da treliça como mostrado pela Figura 10.

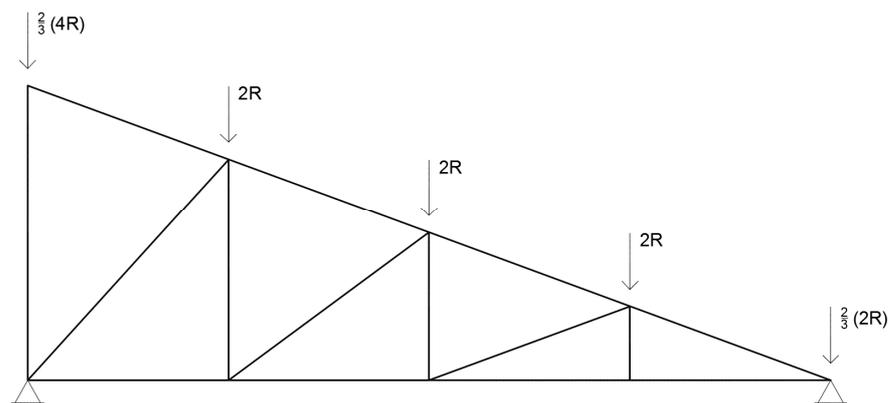


Figura 10 – Esquema estático da treliça. Fonte: Acervo da autora (2017).

Sendo R a reação de apoio da treliça, calculada por:

$$R = \frac{F_d L}{2} \quad (31)$$

Após o cálculo do esquema estático, foram obtidos os esforços normais da estrutura através do Ftool, programa idealizado por Luiz Fernando Martha. Para o

cálculo da verificação de segurança, encontrou-se o esforço normal máximo da treliça para a obtenção da tensão atuante, calculada com a área da seção transversal das barras da treliça:

$$\sigma_{atuante} = \frac{\text{Esforço normal máximo}}{b h} \quad (32)$$

A segurança se verifica quando a tensão atuante é menor ou igual à resistência de cálculo R_d . Para a definição da seção transversal das barras, foi estipulado um limite de 3 a 6 cm para a largura (b) e de 15 a 30 cm para a altura (h). Não foi escolhida uma seção com menos de 15 cm de altura devido à mudança de equações para o cálculo caso a mesma fosse menor, além do espaço ter sido necessário para as ligações com parafusos.

Também foi necessário verificar a segurança da estrutura quanto à flambagem. Para isso, procurou-se uma situação hipotética com base na correspondência entre o esforço normal máximo em módulo e o maior comprimento de barra da treliça. Com isso calculou-se a carga crítica de flambagem, também conhecida como carga de Euler, que deve ser maior ou igual ao esforço normal máximo encontrado nas barras da treliça:

$$P_{crítico} = \frac{\pi^2 E_{c0, ef} I}{L_0^2} \quad (33)$$

Sendo que $E_{c0, ef}$ foi obtido pelo produto do k_{mod} com o módulo de elasticidade $E_{c0, m}$, I é o momento de inércia mínimo e L_0 o maior comprimento de barra. Nesse caso a NBR 7190 exige que o cálculo seja feito com o momento de inércia I mínimo, de forma a evitar o colapso por compressão ao longo da vida útil da treliça, pois quando a flambagem ocorre, esta toma a direção de menor inércia:

$$I = \frac{h b^3}{12} \quad (34)$$

Além dos cálculos realizados para cada classe de resistência da madeira, as treliças foram feitas com quatro sistemas construtivos distintos. O primeiro modelo é em barras simples contidas em um só plano e unidas por chapuz metálico (Figura 11), o segundo também é em barras simples em um só plano, porém estas são unidas por chapuz de madeira (Figura 12). O terceiro sistema é formado por banzos duplos

com os montantes e diagonais em um plano interno (Figura 13) e o quarto modelo são os banzos simples com os montantes e diagonais em um plano externo (Figura 14).

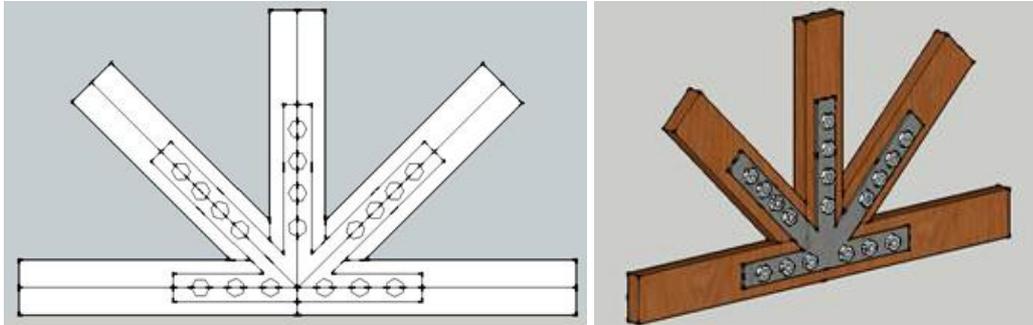


Figura 11 – Sistema construtivo 1. Fonte: Penner (2017).

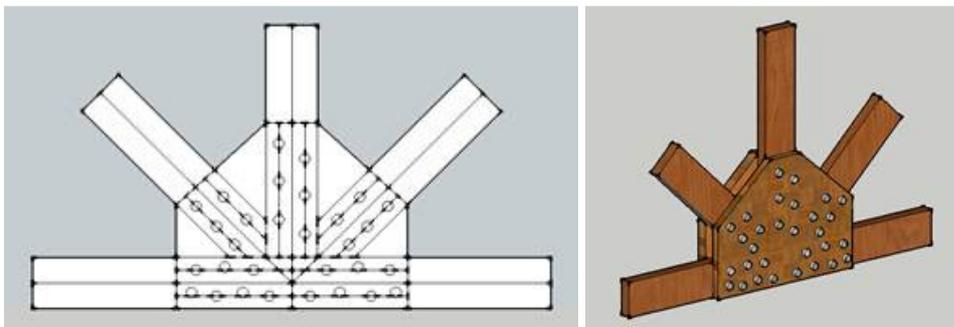


Figura 12 – Sistema construtivo 2. Fonte: Penner (2017).

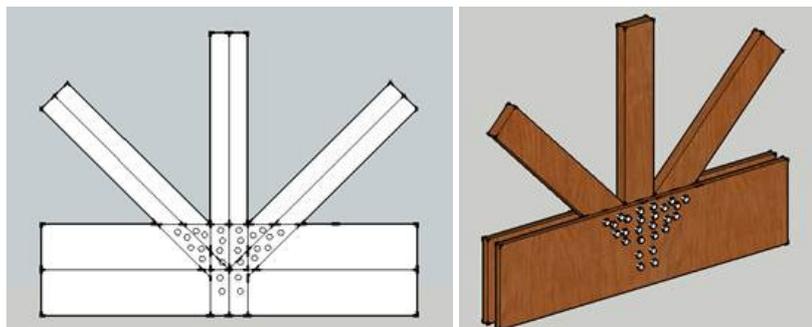


Figura 13 – Sistema construtivo 3. Fonte: Penner (2017).

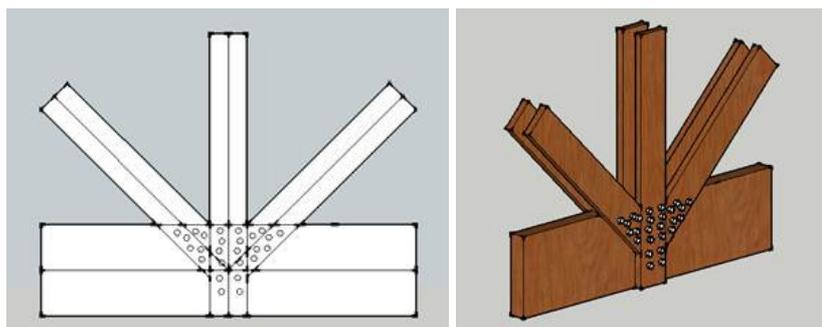


Figura 14 – Sistema construtivo 4. Fonte: Penner (2017).

No cálculo de verificação de flambagem da treliça, para o quarto sistema construtivo a carga crítica de flambagem é diferente dos outros sistemas devido ao seu momento de inércia, que é maior em razão da duplicidade da maior barra em comprimento.

Com as barras da treliça dimensionadas, foram calculadas as ligações para cada sistema construtivo, fundamentais para a segurança da estrutura. Adotou-se o uso de parafusos estruturais por estes possuírem um diâmetro mínimo de 10 mm, enquanto o mínimo dos pregos é de somente 3 mm, segundo a NBR 7190. Além disso, não é possível o uso de pregos com chapuz metálico (sistema construtivo 1), logo a comparação do dimensionamento com parafusos é mais plausível.

Primeiramente foi calculado o parâmetro adimensional β , que é a razão entre a espessura convencional da madeira (t) e o diâmetro do parafuso (d). A espessura convencional foi encontrada comparando a menor e metade da maior espessura, adotando-se o menor valor. O diâmetro do parafuso adotado em todos os casos foi de 25 mm, por ser a melhor opção ao se comparar todas as classes de resistência.

Também foi obtido o parâmetro β_{lim} , representado pela seguinte equação:

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \quad (35)$$

Em que a resistência ao escoamento do aço f_{yd} foi calculada pela divisão da tensão característica do parafuso f_{yk} de 240 MPa com o coeficiente γ_s de 1,1. A resistência ao embutimento da madeira f_{ed} é a resistência de cálculo R_d .

A partir dos parâmetros obtidos, foi feita uma comparação para determinar o método de dimensionamento a ser utilizado. Caso β fosse maior que β_{lim} o cálculo seria feito pela flexão do pino, se β fosse menor ou igual ao β_{lim} , o dimensionamento seria por embutimento na madeira. A resistência ao cisalhamento para uma seção de corte é representada pelas seguintes equações, respectivamente para cálculo por flexão e por embutimento:

$$R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{yd} \quad (36)$$

$$R_{vd,1} = 0,4 \frac{t^2}{\beta} f_{ed} \quad (37)$$

Para o sistema construtivo 1 foi utilizada a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras f_{e0d} , enquanto que nos outros três sistemas foi necessário o cálculo com a resistência da direção normal às fibras f_{e90d} , obtido da seguinte maneira:

$$f_{e90d} = 0,25 f_{e0d} \alpha_e \quad (38)$$

Sendo o coeficiente α_e em função do diâmetro do parafuso e obtido pela norma de projeto de estruturas de madeira, de acordo com o Quadro 10. Como o diâmetro adotado foi de 25 mm, o coeficiente para todas as classes foi de 1,27.

Diâmetro do pino (cm)	≤ 0,62	0,95	1,25	1,6	1,9	2,2
Coeficiente α_e	2,5	1,95	1,68	1,52	1,41	1,33
Diâmetro do pino (cm)	2,5	3,1	3,8	4,4	5,0	≥ 7,5
Coeficiente α_e	1,27	1,19	1,14	1,1	1,07	1,0

Quadro 10 – Valores de α_e . Fonte: NBR 7190 (1997, p. 21).

O número de parafusos foi calculado para corte duplo nos quatro tipos de sistemas construtivos (Equação 39), sendo a força normal atuante em cada barra N_d obtida com a ajuda do software de análise estrutural Ftool. Para o dimensionamento das ligações foi escolhido somente o nó mais solicitado de cada treliça, ou seja, aquele com a maior soma de tensões das barras que o formam.

$$\text{Número de parafusos} = \frac{N_d}{2 R_{vd,1}} \quad (39)$$

As ligações foram detalhadas respeitando os espaçamentos mínimos da NBR 7190 e pré-furação com diâmetro não maior que o diâmetro do parafuso, acrescido de 0,5 mm, para que a ligação fosse considerada rígida. Além disso, observou-se a resistência total dos pinos, de forma a obter detalhamentos com no máximo oito pinos em linha paralelamente ao esforço a ser transmitido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados do dimensionamento das treliças em oito classes de resistência existentes entre coníferas e dicotiledôneas, e para os quatro sistemas construtivos já apresentados. Para melhor análise, os resultados foram divididos pelo dimensionamento das vigas terças, treliças e ligações.

4.1 VIGAS TERÇAS

No dimensionamento das vigas terças, foram obtidos os resultados com seção transversal de cálculo para otimização (Tabela 2) e também sua aproximação para a utilização de perfis comerciais da madeira (Tabela 3). São apresentados o valor de cálculo das ações em ELU, a seção transversal da viga terça, e as reações e esforços normais internos das barras da treliça para cada situação.

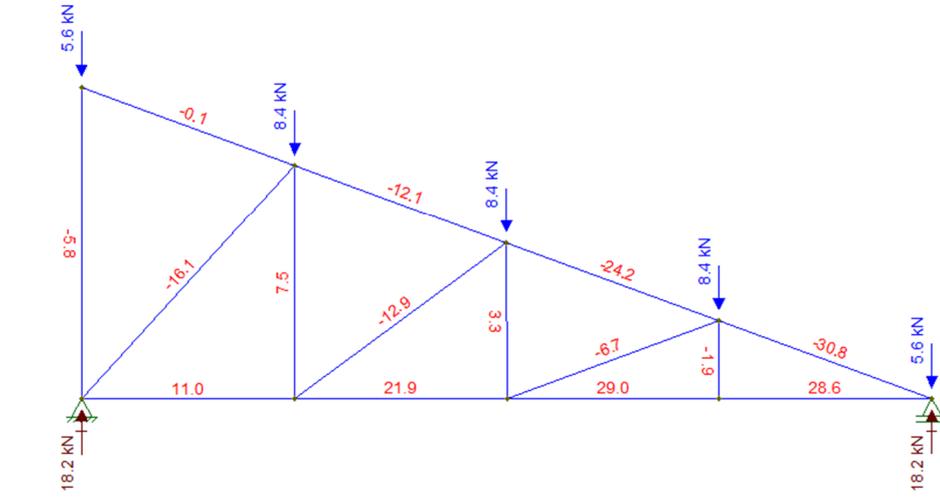
Na Tabela 2 ainda é mostrado os valores das verificações quanto à flexão simples oblíqua (relação de tensões atuantes pelas resistentes) que deve se aproximar de 1,0 para que o cálculo seja otimizado, e na Tabela 3, o quanto de perdeu dessa otimização com o uso de um perfil comercial.

Tabela 2 – Otimização da viga terço para ST de cálculo. Fonte: Acervo da autora (2017)

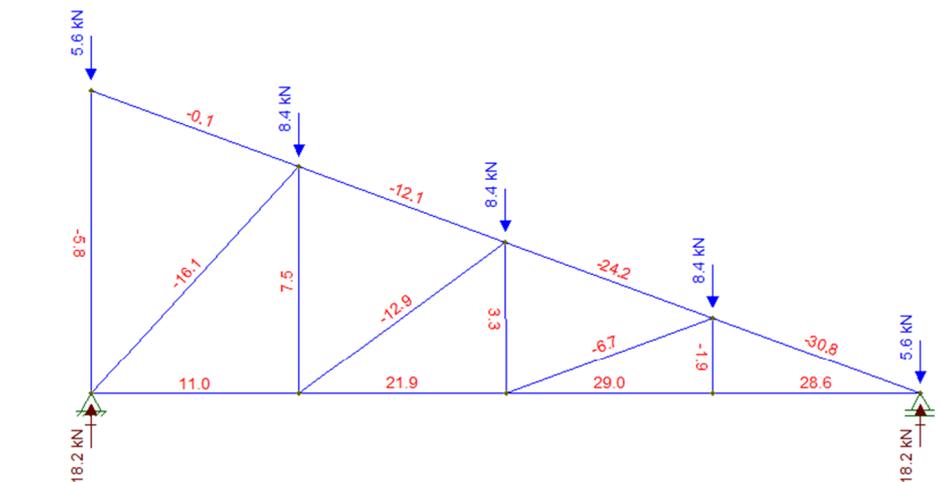
Classificação	Classe	Fd (kN/m)	b x h (cm)	Verificação		Reação de Apoio (kN)	
				Eixo x	Eixo y		
CONÍFERAS	C20	2,10	10,1 x 20,2	0,78	0,71	18,2	
	C25	2,07	8,7 x 17,4	0,97	0,88	17,9	
C30	2,07	8,1 x 16,2	1,00	0,90	17,9		

Classificação	Classe	Fd (kN/m)	b x h (cm)	Verificação		Reação de Apoio (kN)
				Eixo x	Eixo y	

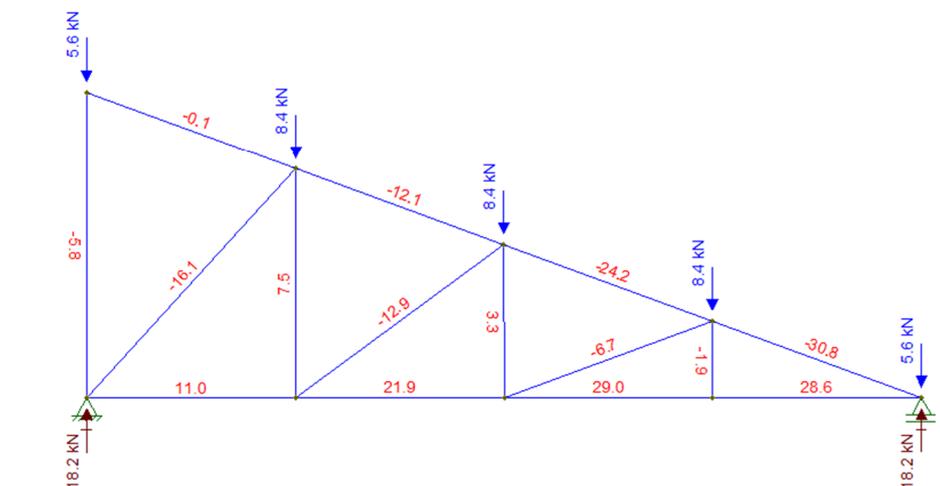
C20	2,11	9,4 x 18,8	0,98	0,89	18,2
-----	------	------------	------	------	------



C30	2,10	8,2 x 16,4	0,98	0,89	18,2
-----	------	------------	------	------	------



C40	2,10	7,4 x 14,8	1,00	0,90	18,2
-----	------	------------	------	------	------

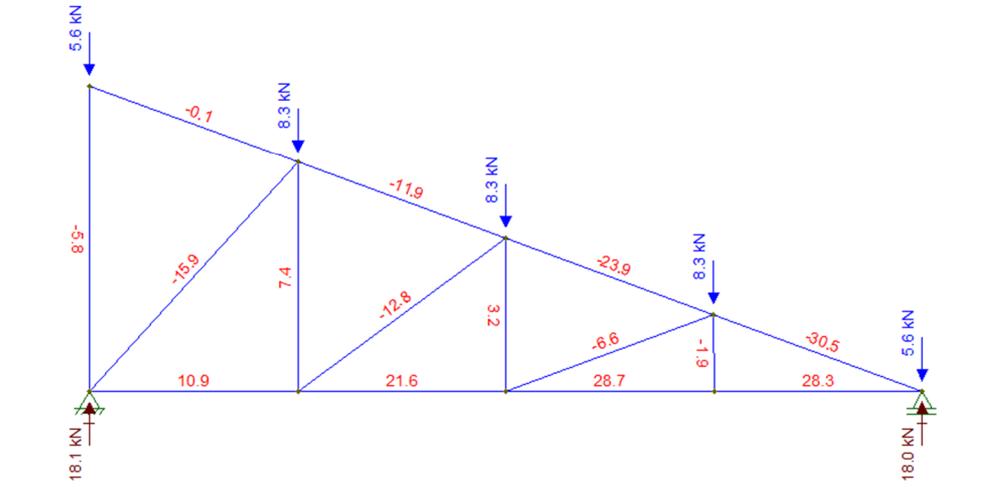


DICOTILEDÔNEAS

DICOTILEDÔNEAS

Classificação	Classe	Fd (kN/m)	b x h (cm)	Verificação		Reação de Apoio (kN)
				Eixo x	Eixo y	

	C50	2,08	6,9 x 13,8	0,98	0,89	18,0
--	-----	------	------------	------	------	------



	C60	2,07	6,5 x 13,0	0,97	0,88	17,9
--	-----	------	------------	------	------	------

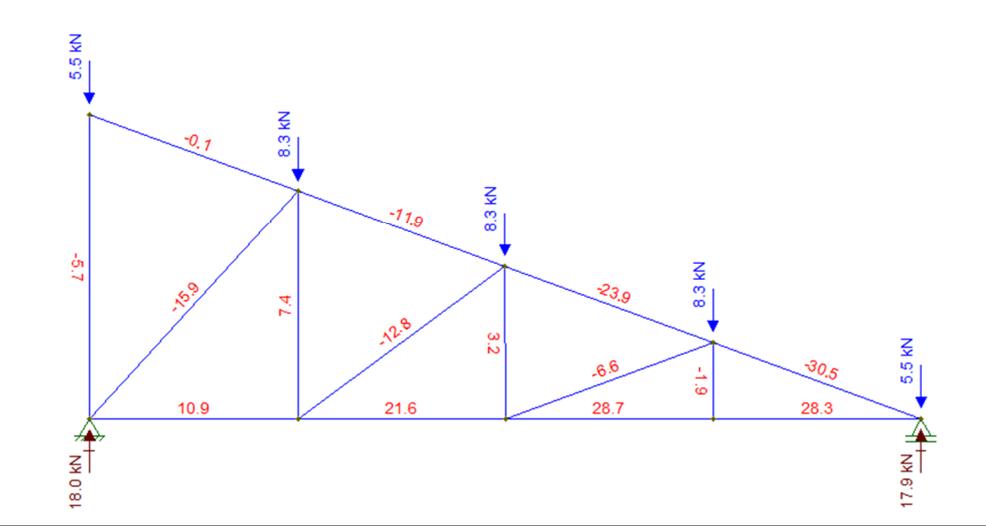
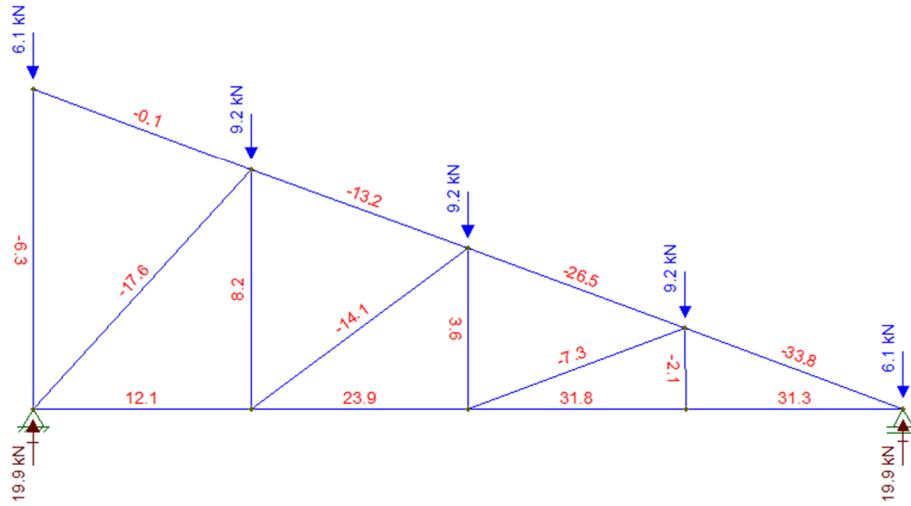


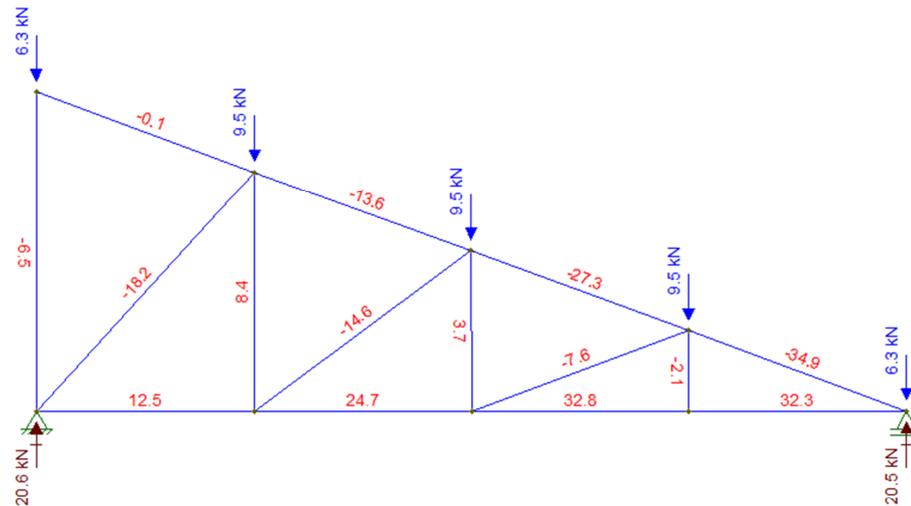
Tabela 3 – Aproximação dos valores para ST comercial. Fonte: Acervo da autora (2017).

Classificação	Classe	Fd (kN/m)	b x h (cm)	Verificação		Perda na otimização	Reação de Apoio (kN)	
				Eixo x	Eixo y			
CONÍFERAS	C20	2,22	20,0 x 20,0	0,37	0,27	53%	19,2	
	C25	2,25	20,0 x 20,0	0,30	0,22	69%	19,5	
C30	2,27	20,0 x 20,0	0,25	0,19	75%	19,7		

Classificação	Classe	Fd (kN/m)	b x h (cm)	Verificação		Perda na otimização	Reação de Apoio (kN)
				Eixo x	Eixo y		

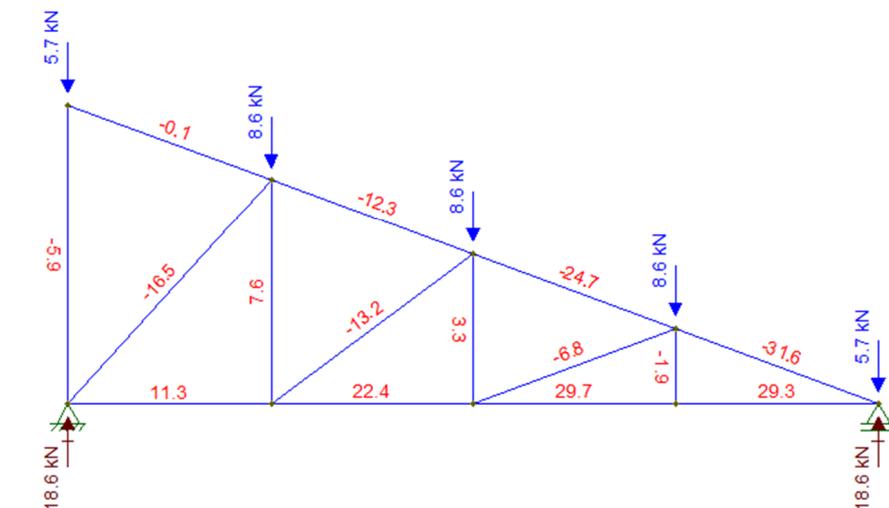


C20	2,30	20,0 x 20,0	0,38	0,28	61%	19,9
-----	------	-------------	------	------	-----	------

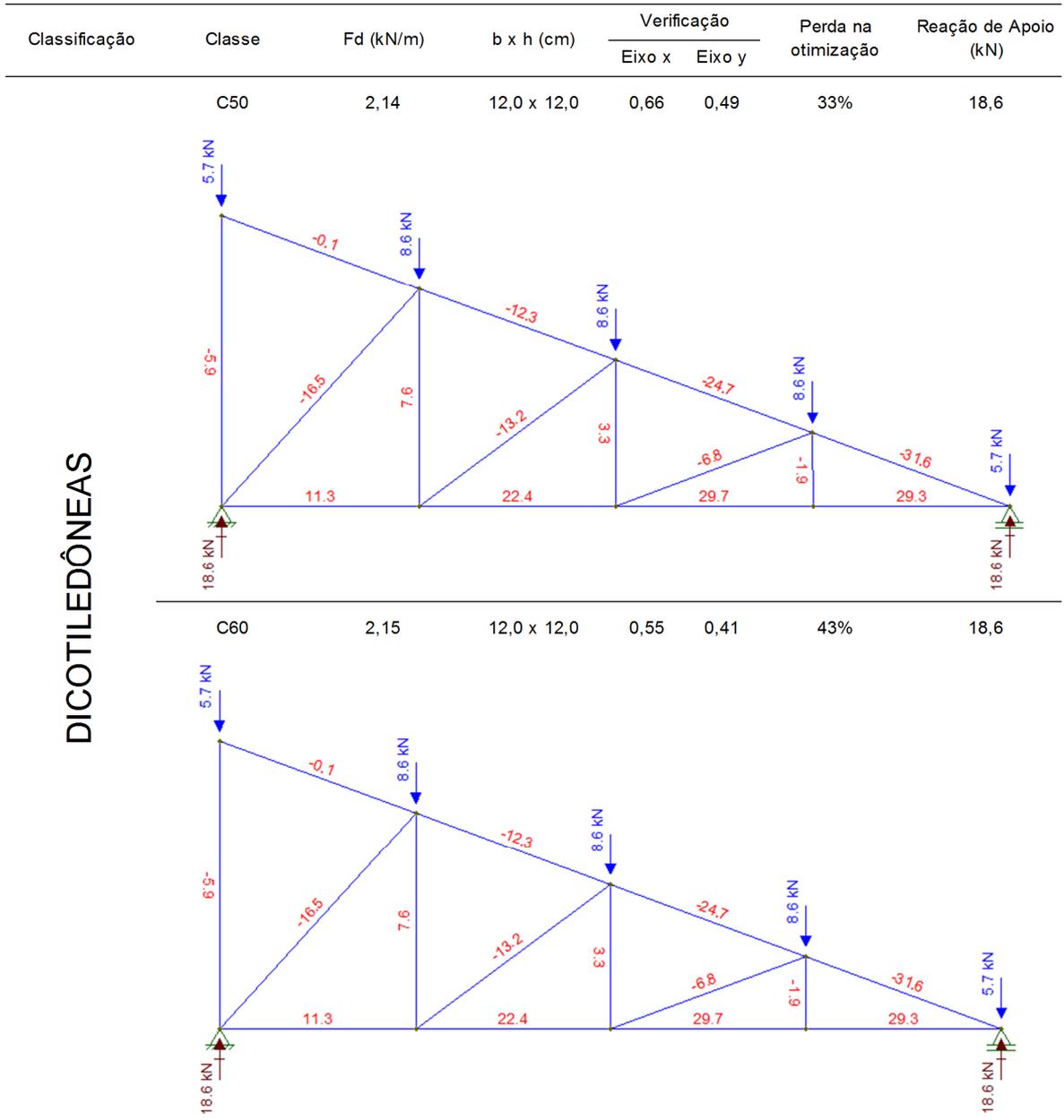


C30	2,37	20,0 x 20,0	0,26	0,19	73%	20,5
-----	------	-------------	------	------	-----	------

DICOTILEDÔNEAS



C40	2,14	12,0 x 12,0	0,83	0,61	17%	18,6
-----	------	-------------	------	------	-----	------



Primeiramente, observa-se que a combinação de forças, por depender principalmente do peso próprio da viga terça, é influenciada fortemente pela seção transversal, mesmo que a densidade do material diminua. Dessa forma, não há uma diferença notável de peso entre a mais resistente dicotiledônea (C 60) com a conífera com resistência mais fraca (C 20). Para que a segurança seja alcançada, o material mais leve deve ser compensado com maior área de seção, aumentando a quantidade de material em relação aos outros tipos de madeira.

Entre as cinco classes de dicotiledôneas, constata-se um aumento de 109% na área da seção transversal da viga terça, da classe C60 para a C20, onde a diferença de peso próprio chega a ser de 38%. Para as coníferas, o aumento da área

entre as três classes é de 55%, apesar do peso próprio entre elas ser muito semelhante. Também é importante constatar a relação do peso com as reações de apoio, pois após a distribuição de esforços nas barras da treliça, a reação muda pouco entre os tipos de madeira.

Os resultados são igualmente essenciais para a análise dos perfis comerciais da madeira em comparação com os perfis de cálculo. Como visto na Tabela 3, ao utilizar materiais existentes no mercado, a seção transversal aumenta em relação à de cálculo, além de não haver diferença entre as classes de resistência. Dessa forma, não é possível verificar efetivamente as características de cada situação, e suas consequências para o resto da estrutura.

A partir dos critérios de segurança, relacionados às tensões atuantes e resistentes e usados para identificar a otimização da estrutura, é possível analisar o quanto o projeto é superdimensionado ao usar perfis comerciais. Na Tabela 2 o objetivo foi alcançado, pois a maior parte dos números se aproximam de 1,0 para melhor otimização, tendo no máximo uma perda de 22% no componente x. Com exceção da conífera C20, os valores são aceitáveis pois estão abaixo de 20%, contudo a perda é muito maior com o uso das seções comerciais. Na tabela 3 pode-se observar que as situações não foram otimizadas, com uma perda mínima em relação às seções de cálculo de 17%, ao utilizar uma classe C40, e máxima de 81%.

É evidente a vantagem do uso de um perfil comercial se relacionado à facilidade de obtenção do material e praticidade de cálculo, contudo a otimização da estrutura leva a uma economia de material e custo, além de gerar um produto final leve e de maior beleza arquitetônica. É importante levar em conta os detalhes de cálculo que geralmente são esquecidos, mesmo que a execução final seja mais trabalhosa, pois assim se cultiva o uso potencializado de material na construção.

4.2 TRELIÇA

Com os resultados do perfil de cálculo das vigas terças obteve-se o dimensionamento das treliças para cada classe de resistência e sistema construtivo. São apresentados os valores da carga crítica de flambagem, o maior esforço normal da treliça e a seção transversal otimizada para o sistema em barras simples unidas por chapuz metálico (Tabela 4), barras simples unidas por chapuz de madeira (Tabela

5), banzos duplos em plano externo (Tabela 6) e banzos simples em plano interno (Tabela 7).

Tabela 4 – Cálculo do sistema construtivo 1 de treliça. Fonte: Acervo da autora (2017).

Classificação	Classe	P crítico (kN)	Maior esforço na treliça (kN)	b x h (cm)
Coníferas	C20	31,12	30,80	6 x 25
	C25	31,49	30,50	5 x 18
	C30	44,76	30,50	5 x 15
Dicotiledôneas	C20	31,28	30,80	5 x 16
	C30	44,76	30,80	5 x 15
	C40	30,82	30,80	4 x 15
	C50	34,77	30,50	4 x 15
	C60	38,72	30,50	4 x 15

Tabela 5 – Cálculo do sistema construtivo 2 de treliça. Fonte: Acervo da autora (2017).

Classificação	Classe	P crítico (kN)	Maior esforço na treliça (kN)	b x h (cm)
Coníferas	C20	31,12	30,80	6 x 25
	C25	31,49	30,50	5 x 18
	C30	44,76	30,50	5 x 15
Dicotiledôneas	C20	31,28	30,80	5 x 16
	C30	44,76	30,80	5 x 15
	C40	30,82	30,80	4 x 15
	C50	34,77	30,50	4 x 15
	C60	38,72	30,50	4 x 15

Tabela 6 – Cálculo do sistema construtivo 3 de treliça. Fonte: Acervo da autora (2017).

Classificação	Classe	P crítico (kN)	Maior esforço na treliça (kN)	b x h (cm)
Coníferas	C20	31,12	30,80	6 x 25
	C25	31,49	30,50	5 x 18
	C30	44,76	30,50	5 x 15
Dicotiledôneas	C20	31,28	30,80	5 x 16
	C30	44,76	30,80	5 x 15
	C40	30,82	30,80	4 x 15
	C50	34,77	30,50	4 x 15
	C60	38,72	30,50	4 x 15

Tabela 7 – Cálculo do sistema construtivo 4 de treliça. Fonte: Acervo da autora (2017).

Classificação	Classe	P crítico (kN)	Maior esforço na treliça (kN)	b x h (cm)
Coníferas	C20	37,34	30,80	6 x 15
	C25	52,48	30,50	5 x 15
	C30	45,84	30,50	4 x 15
Dicotiledôneas	C20	58,65	30,80	5 x 15
	C30	45,84	30,80	4 x 15
	C40	61,64	30,80	4 x 15
	C50	69,54	30,50	4 x 15
	C60	32,67	30,50	3 x 15

A partir do maior esforço de cada treliça, encontrado pelo esquema estático exposto na Tabela 2, é possível analisar a carga crítica de flambagem e a seção transversal das barras nos quatro tipos esquemas construtivos.

Nesse momento do dimensionamento, percebe-se que o cálculo é igual entre os três primeiros sistemas construtivos, diferenciando somente no quarto tipo, pois neste o cálculo da inércia é dobrado devido a utilização dupla da barra de maior

comprimento. Por este motivo, observa-se uma mudança significativa na carga crítica de flambagem, que depende diretamente do momento de inércia das barras, permitindo a otimização de seções com menores dimensões.

A existência de várias seções de com 15 cm de altura se justifica pelo fato de que foi estabelecido esse valor mínimo inicialmente. Caso não houvesse esse limite a seção poderia ser ainda menor de forma a verificar a segurança da estrutura, porém os cálculos seriam mais complexos.

Em todos os sistemas construtivos, a seção da classe C20 de coníferas foi maior em suas dimensões em relação às outras situações, tendo sido aumentada a largura de forma a evitar um aumento muito grande na altura. Isso gerou uma seção mais adequada, apesar de ainda não estar dentro de dimensões comerciais conhecidas, porém não havia como mudar os parâmetros pré-estabelecidos.

Uma das razões para o tamanho excessivo dessas seções é o uso do momento de inércia mínimo no cálculo de verificação de flambagem, pois as barras podem inverter a solicitação ao longo de sua vida útil e flambar. Por serem solicitadas à compressão centrada, ao ocorrer a flambagem a instabilidade toma a direção de menor inércia automaticamente, em razão disso a segurança deve ser garantida pela possibilidade da pior situação.

Nesses casos, para um resultado mais autêntico a solução seria realizar um dimensionamento específico, que não foi feito neste trabalho pois diferenciaria os parâmetros de análise durante a comparação das classes. Uma das opções seria o aumento do número de vigas terças, modificando a geometria da treliça e todas as suas características iniciais, assim o peso seria melhor distribuído e as seções poderiam diminuir. Outra maneira, não muito prática, seria o dimensionamento separado de montantes, diagonais, banzos superiores e inferiores. Assim, em cada conjunto de barras o maior esforço e maior comprimento mudariam, influenciando no momento de inércia mínimo e nas seções transversais, que não seriam homogêneas em toda a treliça, o que poderia interferir na estética da estrutura.

Com exceção dos casos citados, as outras classes de resistência tiveram barras com seções transversais usuais, podendo ser encontradas facilmente como perfis comerciais em casos onde o resultado foi de 5 cm x 15 cm, porém, com as seções mais otimizadas das classes mais resistentes, seria necessário o uso de peças sob medida.

4.3 LIGAÇÕES

Com todas as seções da treliça calculadas, foram obtidos os resultados do dimensionamento das ligações em cada situação construtiva, ou seja, sua quantidade e disposição, de forma a garantir a segurança da estrutura. O número de parafusos calculado é referente ao nó mais solicitado, igual para todas as classes, representado pela Figura 15.

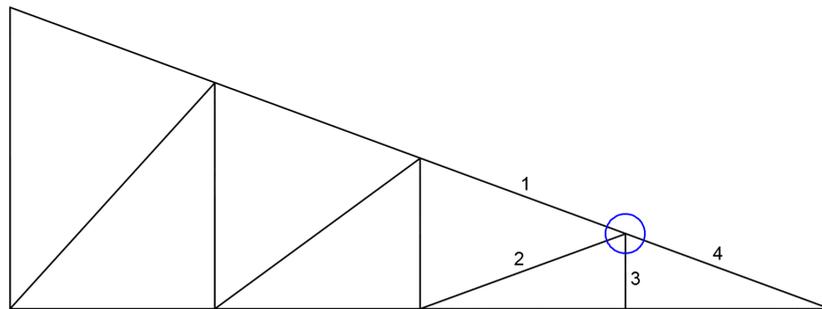


Figura 15 – Localização do nó mais solicitado da treliça. Fonte: Acervo da autora (2017).

Na Tabela 8 é apresentada a quantidade de parafusos necessária para a ligação mais solicitada de cada treliça, de acordo com cada sistema construtivo, dividida segundo as barras indicadas pela Figura 15.

Tabela 8 – Dimensionamento das ligações de um nó da treliça. Fonte: Acervo da autora (2017).

Sistema Construtivo	Classificação	Classe	Número de Parafusos				Total de Parafusos
			Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	
1	Coníferas	C20	5	4	4	6	19
		C25	4	4	4	5	17
		C30	4	4	4	5	17
	Dicotiledôneas	C20	5	4	4	7	20
		C30	4	4	4	5	17
		C40	4	4	4	4	16
		C50	4	4	4	4	16
		C60	4	4	4	4	16

Sistema Construtivo	Classificação	Classe	Número de Parafusos				Total de Parafusos	
			Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4		
2	Coníferas	C20	13	4	4	17	38	
		C25	13	4	4	16	37	
		C30	11	4	4	13	32	
	Dicotiledôneas	C20	16	5	4	20	45	
		C30	11	4	4	13	32	
		C40	10	4	4	13	31	
		C50	8	4	4	10	26	
		C60	7	4	4	9	24	
		C20	13	4	4	17	38	
	3	Coníferas	C25	13	4	4	16	37
			C30	11	4	4	13	32
			C20	16	5	4	20	45
Dicotiledôneas		C30	11	4	4	13	32	
		C40	10	4	4	13	31	
		C50	8	4	4	10	26	
		C60	7	4	4	9	24	
		C20	13	4	4	17	38	
		4	Coníferas	C25	13	4	4	16
C30				13	4	4	17	38
C20				16	5	4	20	45
Dicotiledôneas			C30	13	4	4	17	38
	C40		10	4	4	13	31	
	C50		8	4	4	10	26	
	C60		9	4	4	11	28	
	C20		13	4	4	17	38	

O detalhamento e disposição dos parafusos são exemplificados pelas Figuras 16 e 17, no caso de barras unidas por chapuz metálico e por chapuz madeira, respectivamente, ambos referentes a uma dicotiledônea de classe C40.

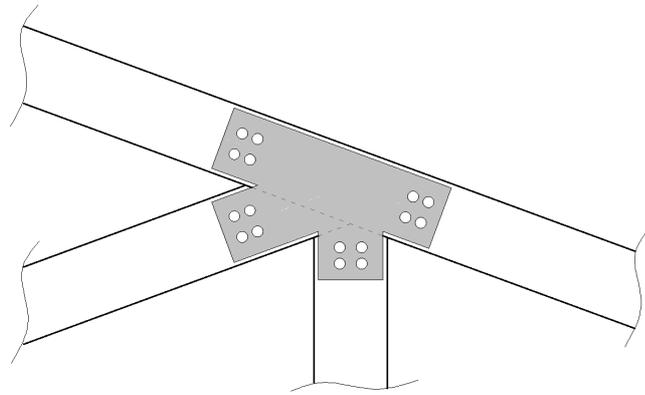


Figura 16 – Detalhamento em chapuz metálico. Fonte: Acervo da autora (2017).

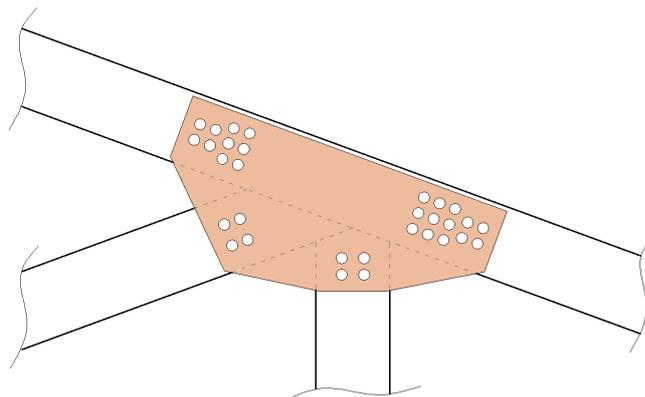


Figura 17 – Detalhamento em chapuz de madeira. Fonte: Acervo da autora (2017).

Para melhor análise e comparação, foi utilizado um parafuso de diâmetro de 25 mm, apesar deste poder ser menor em madeiras com maiores classes de resistência. Como foi escolhida a dimensão a partir das classes mais fracas, no caso de classes mais resistentes o número de parafusos foi pequeno, visto que ele depende diretamente da força atuante em cada barra.

A diferença do dimensionamento entre os quatro sistemas construtivos é visível somente no caso de chapuz metálico (sistema 1) e quando os banzos são simples e diagonais duplas (sistema 4). No primeiro caso o número de parafusos foi menor pois o cálculo foi feito com uma resistência ao embutimento na direção paralela às fibras, enquanto que nos outros três sistemas foi usada a resistência na direção normal, que é maior, devido ao uso único de madeira na ligação.

No sistema construtivo 4 foram dimensionados ainda mais parafusos para certas classes, devido à redução da espessura convencional no cálculo. Como as seções transversais das barras foram diferentes neste último caso, o dimensionamento também foi influenciado, levando a valores maiores da quantidade de parafusos. Dessa forma, o número de ligações aumentou em média 91% do sistema 1 para os sistemas 2 e 3, e destes aumentou somente 7% para o sistema 4.

Entre as classes de resistência, há uma distinção considerável na quantidade de parafusos entre as menores classes de dicotiledôneas C20 e C30, causadas possivelmente pela grande disparidade entre as seções transversais. Nos sistemas construtivos 2 e 3 estão as maiores diferenças, de até 29% entre as classes.

No detalhamento das ligações, deve-se ressaltar que o mínimo de parafusos em uma barra deve ser sempre 4, mesmo que o cálculo resulte em valores menores. Isso se demonstrou em grande parte nas barras menos solicitadas, e principalmente nas ligações utilizando chapuz metálico, levando a uma consideração da importância dos limites mínimos expressos em norma, que asseguram a preservação das estruturas.

No caso de pré furação paralela às fibras, a norma também apresenta a execução com uma leve alternância dos pinos de modo que não haja fendilhamento na estrutura. Também se evidencia a necessidade de um detalhamento com o máximo de oito fileiras a fim de não interferir nas resistências calculadas, além dos aspectos na norma relacionados ao espaçamento, importantes desde o cálculo até a execução, de forma a certificar a segurança da treliça.

4.4 PROJETO FINAL

A partir dos cálculos realizados e seus resultados, é possível admitir uma estrutura otimizada com base nas análises já apresentadas. Quanto às classes de resistência, a melhor solução estrutural e visando a economia de material seria a classe C60 de uma madeira dicotiledônea, por proporcionar uma estrutura agradável visualmente e demandar um número menor de parafusos em sua ligação. Logo, a seção transversal seria de 4 cm x 15 cm. Nesse caso, a treliça poderia ser construída por espécies como Champagne, Jatobá e Sucupira, por possuírem resistências mínimas de 60 MPa.

Também pela quantidade de pinos, o melhor sistema a ser usado seria aquele com barras em um só plano e unidas por chapuz metálico, por solicitar menos a estrutura. Caso esta fosse realizada pelos outros tipos de sistema, o número de parafusos aumentaria devido às menores resistências ao cisalhamento causadas pelo uso da madeira ao invés do aço. Além disso, no quarto sistema construtivo a quantidade de material usada seria maior principalmente nas ligações.

Evidentemente, o projeto final depende de diversos fatores, incluindo o objetivo final da estrutura. É possível visar a economia de material ou de custo, a resistência estrutural ou a arquitetura final, conforme cada caso. No projeto em questão foi selecionada a estrutura com melhores características estruturais e menor uso de material, resultando em uma treliça com um total de 120 parafusos e quantidade aproximada de 0,12 m³ de madeira.

A concepção final na edificação previamente apresentada é exposta na Figura 18, demonstrando a disposição das treliças e vigas terças e sua relação com a construção. O projeto final da treliça é apresentado pela Figura 19, contendo o detalhamento das ligações.

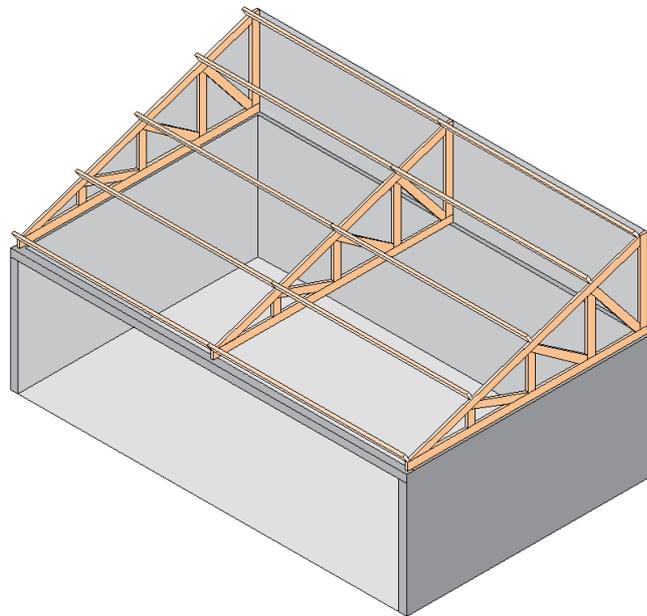


Figura 18 – Concepção final das treliças. Fonte: Acervo da autora (2017).

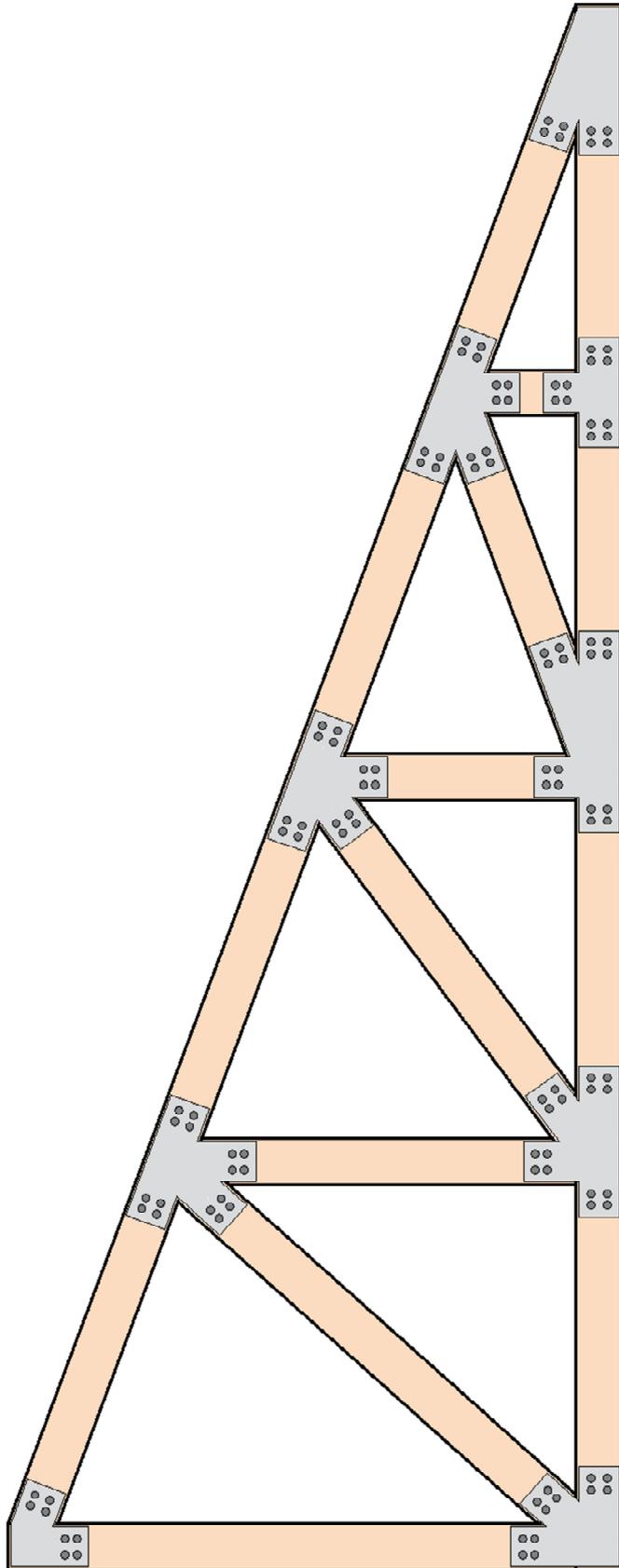


Figura 19 – Treliça em madeira C60, com barras unidas por chapuz metálico. Fonte: Acervo da autora (2017).

5 CONCLUSÃO

O principal objetivo do presente trabalho consistiu no dimensionamento e otimização de um projeto estrutural de madeira maciça para uma cobertura, tendo como base as normas atuais. Foram calculadas e analisadas diversas situações estruturais, diferenciadas pelo tipo de classe de madeira e sistema construtivo utilizado.

A partir dos resultados do dimensionamento das três classes de resistências de coníferas e cinco classes de dicotiledôneas, apresentadas sob quatro formas diferentes de ligação, foi possível comparar suas capacidades estruturais. Foi observado que a seção de cálculo das vigas terças é amplamente influenciada pelo peso da estrutura, relacionado à classe escolhida. Ao usar perfis comerciais de madeira, não há diferença no resultado final, porém as estruturas geradas não são otimizadas.

No dimensionamento da treliça em si, percebeu-se a relevância da carga crítica de flambagem nas dimensões das barras, que apesar de terem sido iguais em vários casos, não seguiram o limite estabelecido para as classes menos resistentes. Concluiu-se que o uso das classes mais resistentes, principalmente de dicotiledôneas, pode ser a melhor solução mesmo em casos de estruturas menores, pois a quantidade de material é economizada e a apresentação arquitetônica mais agradável.

No cálculo das ligações, deve-se considerar que o diâmetro dos parafusos escolhido poderia ser diferente entre as classes de forma a produzir uma estrutura com melhores proporções, sobretudo nos casos de classes resistentes. Porém, com o diâmetro de 25 mm verificou-se o quanto uma ligação e seus detalhes de norma atuam na segurança de uma construção.

O estudo revelou-se importante para a área de construções em madeira ao apresentar os resultados de diversas situações de resistência e composição estrutural, todas possíveis de ocorrerem na construção civil atualmente. Também complementou o conhecimento existente sobre esse tipo de material no país, que ainda é carente de informações e pesquisas.

Os objetivos propostos foram atingidos, tendo sido dimensionadas, analisadas e comparadas as estruturas em questão, a partir de aspectos como segurança, durabilidade e conforto. Sugere-se ainda, para futuros estudos, a análise quantitativa detalhada e de custo para a realização das estruturas dimensionadas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. A. L. **A madeira como material estrutural – projeto da estrutura da cobertura de um edifício**. Porto. 2012. 310 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- ANDRADE, J. R.; ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; STAMATO, G. C.; LAHR, F. A. R. **Avaliação das estruturas de cobertura em madeira de um galpão de estoque de produtos químicos**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 75-85, jul./set. 2014. ISSN 1678-8621.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro. 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro. 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro. 1997.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **EUROCODE 5: Calcul des structures en bois**. Paris. 2008.
- CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A. **Utilização da madeira em construções rurais**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 1, p. 71-77, 1997.
- CALIL JÚNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. 1. Ed. Barueri: Manole, 2003. 152 p. ISBN 85-204-1515-6.
- CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. **Determinação do módulo de elasticidade longitudinal em estruturas planas de madeira do tipo treliça**. Minerva Pesquisa e Tecnologia, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 217-224, jul./dez. 2007.
- CORREIA, E. A. S. **Análise e dimensionamento de estruturas de madeira**. Porto. 2009. 163 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- COSTA, A. **Coletâneas de anatomia da madeira**. 2001. 42 p.
- FARIA, A.; NEGRÃO, J. **Projecto de estruturas de madeira**. Porto: Publindústria, 2009. 247 p. ISBN 978-972-8953-36-2.
- FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. **Comportamento da madeira a temperaturas elevadas**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157-174, out./dez. 2009. ISSN 1678-8621.
- GUPTA, R.; MILLER, T. H.; DUNG, D. **Practical solution to wood truss assembly design problems**. Corvallis, v. 9, n. 1, p. 54-60, fev. 2004. ISSN 1084-0680.

KRETSCHMANN, D. E. **Mechanical properties of wood**. Wood handbook: wood as an engineering material. Madison: Forest Products Laboratory, 2010. 508 p.

KRIPKA, M.; DIAS, M. M.; MEDEIROS, G. F. **Otimização de geometria e de seção em treliças: validação experimental como emprego de estruturas espaguete**. Educação e Tecnologia, Belo Horizonte, v. 13, n. 1, p. 62-68, jan./abr. 2008.

MACKERLE, J. **Finite element analyses in wood research: a bibliography**. Wood Science and Technology, Linköping, n. 39, p. 579-600, set. 2005.

MARTINS, T. F. R. M. **Dimensionamento de estruturas em madeira: coberturas e pavimentos**. Lisboa. 2010. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa.

MEDEIROS, R. C. **Forças em peças de contraventamento de treliças de madeira**. São Carlos. 2010. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Estruturas) – Universidade de São Paulo.

MILITO, J. A. **Técnicas de construção civil e construção de edifícios**. São Paulo. 2004. 296 p.

MOLITERNO, A. **Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeira**. 4. Ed. São Paulo: Blucher, 2010. 268 p. ISBN 978-85-212-0554-8.

NIELSEN, L. F. **Lifetime and residual strength of wood subjected to static and variable load**. Kongens Lyngby: Tekst & Tryk, 1996. ISBN 87-7740-185-9.

OLIVEIRA, J. T. S. **Características da madeira de eucalipto para a construção civil**. São Paulo. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo.

PARTEL, H. **Sistema informatizado para projeto de estruturas industrializadas de madeiras para telhados**. São Carlos. 2000. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Estruturas) – Universidade de São Paulo.

PENNER, E. **Notas de aula da disciplina CC79E no curso de engenharia civil**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 224 p. ISBN 978-85-216-1385-5.

PINHEIRO, V. H. M. **Projeto em estruturas de madeira**. Porto. 2012. 170 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

PREMROV, M.; TAJNIK, M. **Planar timber structures**. Maribor: Leonardo da Vinci Pilot Project, 2008. 254 p.

RIBEIRO, L. M. P. **Otimização e dimensionamento de treliças planas de madeira empregando o método dos algoritmos genéticos**. Uberlândia. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia.

RITTER, M, A. **Timber bridges: design, construction, inspection and maintenance**. Washington: Forest Service, 1990. 944 p.

SCREMIM, C. B. **Avaliação sobre a diferença de propriedades mecânicas do cerne e do alburno de mesmas espécies de madeira**. Curitiba. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SILIH, S.; PREMROV, M.; KRAVANJA, S. **Optimum design of plane timber trusses considering joint flexibility**. Engineering Structures, Maribor, v. 27, n. 1, p. 145-154, jan. 2005.

SMITH, W. F. **Principles of materials science and engineering**. 3. Ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1995. ISBN 978-00-705-9241-4.

SOUZA, D. A. **Otimização pelo método dos algoritmos genéticos e dimensionamento de estruturas tubulares metálicas espaciais com barras cruzadas para coberturas**. Uberlândia. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia.

THELANDERSSON, S.; LARSEN, H. J. **Timber engineering**. Londres: John Wiley and Sons, 2003. 446 p. ISBN 0-470-84469-8.

TOMCZYK, O. F. **Dimensionamento de treliças de madeira para coberturas a partir de critérios técnicos comparado a métodos empíricos**. União da Vitória. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Universitário de União da Vitória.

WIEDENHOEFT, A. **Structure and function of wood**. Wood handbook: wood as an engineering material. Madison: Forest Products Laboratory, 2010. 508 p.

ZENID, G. J. **Qualificação de produtos de madeira para a construção civil**. In: SEMINÁRIO DE INDUSTRIALIZAÇÃO E USOS DE MADEIRA DE REFLORESTAMENTO, 2., 2001, Caxias do Sul. Anais Seminário de Industrialização e Usos de Madeira de Reflorestamento, Caxias do Sul: UCS, 2001. p. 61-76.