

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**INFLUÊNCIA DO VALOR MÉDIO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À
COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS NO PROJETO DE TRELIÇAS
EM MADEIRA**

ARTHUR FILIPE FREIRE GOMES

São Carlos

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**INFLUÊNCIA DO VALOR MÉDIO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À
COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS NO PROJETO DE TRELIÇAS
EM MADEIRA**

ARTHUR FILIPE FREIRE GOMES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. André Luis Christoforo

São Carlos
2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Arthur Filipe Freire Gomes, realizada em 18/12/2020.

André Luis Christoforo

Prof. Dr. André Luis Christoforo

André Luis Christoforo

p/ Profa. Dra. Cristiane Inácio de Campos

André Luis Christoforo

p/ Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância dos membros Cristiane Inácio de Campos e Fernando Menezes de Almeida Filho e, depois das arguições e deliberações, os participantes à distância estão de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

André Luis Christoforo

Prof. Dr. André Luis Christoforo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família pelo apoio, suporte e incentivo em mais esta etapa da minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Luis Christoforo pela atenção, conhecimento compartilhado e esforço durante toda a pesquisa.

A Profa. Dra. Cristiane Inácio de Campos e ao Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho por participarem das bancas de avaliação deste trabalho, contribuindo de maneira significativa.

A todos meus professores da graduação e da pós-graduação cujo ensinamentos contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

GOMES, A. F. F. **Influência do valor médio do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras no projeto de treliças em madeira.** 2020. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

Na avaliação do estado limite de serviço, a norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) preconiza a adoção do valor médio do módulo de elasticidade à compressão na direção paralela às fibras ($E_{c0,m}$) para todas as barras da estrutura. Em razão da variabilidade da madeira, tal metodologia pode gerar deslocamentos verticais superiores ao limite estabelecido pela normativa ($L(\text{vão})/200$), podendo provocar manifestações patológicas na estrutura. Com o objetivo de avaliar a influência da adoção do $E_{c0,m}$ para todas as barras da treliça no cálculo dos deslocamentos, propriedades mecânicas das espécies Angelim Ferro (*Hymenolobium sp*) e Angelim Pedra (*Hymenolobium petraeum* Ducke) foram obtidas através de ensaios experimentais, segundo as especificações normativas da ABNT NBR 7190 (1997). Com o auxílio de modelos numéricos desenvolvidos no software ABAQUS® e dos valores experimentais das propriedades mecânicas, foram analisadas 10 tipologias (Alpendre, Banzos Inclinados, Banzo Superior Inclinado, Banzos Paralelos, Bowstring, Fink, Howe, K Truss, Pratt, Scissor), 3 vãos (5, 10 e 20 metros) e 2 espécies (Angelim Pedra e Angelim Ferro). Inicialmente, adotando o $E_{c0,m}$ experimental para todas as barras e realizando uma análise linear, os carregamentos para gerar um deslocamento de $L/200$ para cada combinação de parâmetros foram determinados. Na etapa seguinte, utilizando os carregamentos definidos anteriormente, foram atribuídos valores experimentais aleatórios de rigidez para cada elemento da treliça e, por meio de análises não lineares geométricas, os deslocamentos máximos de cada modelo foram obtidos. Com base nos resultados de 1260 simulações numéricas, foram obtidos deslocamentos superiores ao valor de referência ($L/200$) em 17,32%, 30,18% e 34,80% para vãos de 5, 10 e 20 metros, respectivamente, sugerindo que a metodologia proposta pela normativa pode gerar deslocamentos excessivos. Estes deslocamentos excessivos podem provocar manifestações patológicas na estrutura, reduzindo sua vida útil. Tal problemática pode ser contornada com a utilização de métodos não destrutivos na pré-classificação das barras da estrutura, posicionando os elementos racionalmente nas regiões de maior solicitação.

Palavras-chave: Simulação numérica, treliças, comportamento estrutural.

ABSTRACT

GOMES, A. F. F. **Influência do valor médio do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras no projeto de treliças em madeira.** 2020. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

In the evaluation of the service limit state, the Brazilian standard ABNT NBR 7190 (1997) recommends the adoption of the mean value of the elasticity module to compression in the direction parallel to grain ($E_{c0,m}$) for all the members of the structure. Due to the variability of the wood, this methodology can generate vertical displacements higher than the limit established by the regulations (L (span) / 200), which can cause pathological manifestations in the structure. In order to evaluate the influence of the adoption of $E_{c0, m}$ for all the truss bars in the calculation of displacements, mechanical properties of the species Angelim Ferro (*Hymenolobium* sp) and Angelim Pedra (*Hymenolobium petraeum* Ducke) were obtained through experimental tests, according to the normative specifications of ABNT NBR 7190 (1997). With the aid of numerical models developed in ABAQUS® and the experimental values of the mechanical properties, 10 typologies were analyzed (Porch, Inclined Banzos, Upper Inclined Banzo, Parallel Banzos, Bowstring, Fink, Howe, K Truss, Pratt, Scissor), 3 spans (5, 10 and 20 meters) and 2 species (Angelim Pedra and Angelim Ferro). Initially, adopting the $E_{c0,}$ experimental for all bars and performing a linear analysis, the loads to generate a displacement of $L/200$ for each combination of parameters were determined. In the next step, using the loads previously defined, random experimental values of stiffness were assigned to each element of the truss and, through geometric nonlinear analyzes, the maximum displacements of each model were obtained. Based on the results of 1260 numerical simulations, displacements greater than the reference value ($L/200$) were obtained in 17.32%, 30.18% and 34.80% for spans of 5, 10 and 20 meters, respectively, suggesting that the methodology proposed by the standard may generate excessive displacements. These excessive displacements can cause pathological manifestations in the structure, reducing its useful life. This problem can be overcome with the use of non-destructive methods in the pre-classification of the structure bars, positioning the elements rationally in the regions of greatest demand.

Keywords: Numerical simulation, trusses, structural behavior

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	a) Face tangencial, b) face radial.....	23
Figura 2.2 -	Corte longitudinal.....	24
Figura 2.3 -	Ensaio nas peças de madeira: a) e b) detalhes dos acelerômetros, c) e d) detalhes dos aparatos utilizados.....	25
Figura 2.4 -	Equipamento de ultrassom Steikamp , modelo BP 5: a) e b) obtenção da leitura do tempo.....	27
Figura 2.5 -	Ensaio de vibração transversal.....	28
Figura 2.6 -	Resistógrafo.....	29
Figura 3.1 -	Máquina universal AMSLER.....	31
Figura 3.2 -	Diagrama tensão x deformação específica para determinação de E_{c0}	32
Figura 3.3 -	Diagrama de carregamento para determinação de E_{c0} e E_{t0}	33
Figura 3.4 -	Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de compressão paralela às fibras.....	33
Figura 3.5 -	Fixação dos relógios comparadores nos corpos de prova de compressão paralela às fibras.....	34
Figura 3.6 -	Posicionamento do corpo de prova e dos relógios comparadores na máquina de ensaio para o ensaio de compressão paralela às fibras.....	34
Figura 3.7 -	Diagrama tensão x deformação específica para determinação de E_{t0}	35
Figura 3.8 -	Vistas do corpo de prova para o ensaio de tração paralela às fibras, (a) vista frontal e (b) vista lateral.....	36
Figura 3.9 -	Fluxograma da análise numérica.....	37
Figura 3.10 -	Tipologias, pontos de carregamentos e apoios.....	38
Figura 3.11 -	Fluxograma para definição do carregamento e da seção transversal.....	40
Figura 3.12 -	Fluxograma de modelagem no ABAQUS®.....	42
Figura 3.13 -	Criação das barras das treliças (Howe, 5 metros).....	43
Figura 3.14 -	Aplicação das propriedades às barras da treliça (Howe, 5 metros).....	43
Figura 3.15 -	Definição do carregamento (Howe, 5 metros).....	44
Figura 3.16 -	Definição do a) apoio fixo e b) móvel (Howe, 5 metros).....	44
Figura 3.17 -	Definição do tipo de análise (Howe, 5 metros).....	45

Figura 3.18 -	Definição do tamanho da malha de elementos finitos (Howe, 5 metros).....	46
Figura 4.1 -	Resultados dos testes de normalidade (a) e de homogeneidade de variâncias (b) dos resíduos referente a comparação dos módulos de elasticidade E_{c0} e E_{t0} - Angelim Pedra.....	51
Figura 4.2 -	Resultados dos testes de normalidade (a) e de homogeneidade de variâncias (b) dos resíduos referente a comparação dos módulos de elasticidade E_{c0} e E_{t0} - Angelim Ferro.....	51
Figura 4.3 -	Tensão nas barras (MPa): K Truss ($E_{c0,m}$) - 10 metros - Angelim Ferro.....	54
Figura 4.4 -	Tensão nas barras (MPa): Banzo Inclinado ($E_{c0,m}$) - 10 metros - Angelim Pedra.....	55
Figura 4.5 -	Deslocamento vertical (mm): Scissor ($E_{aleatório}$) - 5 metros - Angelim.....	62
Figura 4.6 -	Tensão nas barras (MPa): Scissor ($E_{aleatório}$) - 5 metros - Angelim Ferro.....	62
Figura 4.7 -	Deslocamento vertical (mm): Bowstring ($E_{aleatório}$) - 10 metros - Angelim Ferro.....	62
Figura 4.8 -	Tensão nas barras (MPa): Bowstring ($E_{aleatório}$) - 10 metros - Angelim Ferro	63
Figura 4.9 -	Deslocamento vertical (mm): Alpendre ($E_{aleatório}$) - 20 metros - Angelim Ferro	63
Figura 4.10 -	Tensão nas barras (MPa): Alpendre ($E_{aleatório}$) - 20 metros - Angelim Ferro	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Resumo das atividades publicadas pelo EBRAMEM até 2014.....	18
Tabela 2.2 -	Propriedades mecânicas da espécie Angelim Pedra.....	23
Tabela 2.3 -	Propriedades mecânicas da espécie Angelim Ferro.....	24
Tabela 3.1 -	Fatores analisados.....	37
Tabela 3.2 -	Exemplo da disposição das propriedades mecânicas experimentais – Angelim Pedra.....	41
Tabela 3.3 -	Exemplo da definição das propriedades mecânicas de cada barra – Angelim Pedra.....	41
Tabela 4.1 -	Resultados das propriedades referentes às duas espécies de madeira consideradas.....	49
Tabela 4.2 -	Resultados das propriedades obtidas por diferentes autores – Angelim Pedra.....	49
Tabela 4.3 -	Resultados das propriedades obtidas por diferentes autores – Angelim Ferro.....	49
Tabela 4.4 -	Resultados da ANOVA para a comparação entre E_{c0} e E_{t0} - Angelim Pedra.	50
Tabela 4.5 -	Resultados da ANOVA para a comparação entre E_{c0} e E_{t0} – Angelim Ferro.	50
Tabela 4.6 -	Resultados das seções e carregamentos obtidos para as treliças planas com vão de 5 m – Angelim Pedra.....	52
Tabela 4.7 -	Resultados das seções e carregamentos obtidos para as treliças planas com vão de 5 m – Angelim Ferro.....	52
Tabela 4.8 -	Resultados das seções e carregamentos obtidos para as treliças planas com vão de 10 m – Angelim Pedra.....	52
Tabela 4.9 -	Resultados das seções e carregamentos obtidos para as treliças planas com vão de 10 m – Angelim Ferro.....	53
Tabela 4.10 -	Resultados das seções e carregamentos obtidos para as treliças planas com vão de 20 m – Angelim Pedra.....	53
Tabela 4.11 -	Resultados das seções e carregamentos obtidos para as treliças planas com vão de 20 m – Angelim Ferro.....	53
Tabela 4.12 -	Maiores valores de compressão e tração para as treliças planas com vão de 5 m – Angelim Pedra ($F_{c0} = 55,78$ MPa; $f_{t0} = 71,64$ MPa).....	55
Tabela 4.13 -	Maiores valores de compressão e tração para as treliças planas com vão de 5 m – Angelim Ferro ($F_{c0} = 77,24$ MPa; $f_{t0} = 115,58$ MPa)	55

Tabela 4.14 -	Maiores valores de compressão e tração para as treliças planas com vão de 10 m – Angelim Pedra ($F_{c0} = 55,78$ MPa; $f_{t0} = 71,64$ MPa).....	56
Tabela 4.15 -	Maiores valores de compressão e tração para as treliças planas com vão de 10 m – Angelim Ferro ($F_{c0} = 77,24$ MPa; $f_{t0} = 115,58$ MPa)	56
Tabela 4.16 -	Maiores valores de compressão e tração para as treliças planas com vão de 20 m – Angelim Pedra ($F_{c0} = 55,78$ MPa; $f_{t0} = 71,64$ MPa).....	56
Tabela 4.17 -	Maiores valores de compressão e tração para as treliças planas com vão de 20 m – Angelim Ferro ($F_{c0} = 77,24$ MPa; $f_{t0} = 115,58$ MPa)	57
Tabela 4.18 -	Resultados dos deslocamentos obtidos para as treliças planas com vão de 5 m – Angelim Pedra.....	57
Tabela 4.19 -	Resultados dos deslocamentos obtidos para as treliças planas com vão de 5 m - Angelim Ferro.....	58
Tabela 4.20 -	Resultados dos deslocamentos obtidos para as treliças planas com vão de 10 m – Angelim Pedra.....	58
Tabela 4.21 -	Resultados dos deslocamentos obtidos para as treliças planas com vão de 10 m - Angelim Ferro.....	58
Tabela 4.22 -	Resultados dos deslocamentos obtidos para as treliças planas com vão de 20 m – Angelim Pedra.....	59
Tabela 4.23 -	Resultados dos deslocamentos obtidos para as treliças planas com vão de 20 m - Angelim Ferro.....	59

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Objetivos da Pesquisa.....	14
1.2. Justificativa.....	14
1.3. Discussão sucinta dos capítulos.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. Manifestações Patologias em Estruturas de Cobertura.....	16
2.2. Simulação Numérica em Estruturas de Cobertura de Madeira.....	20
2.3. Espécies Utilizadas	22
2.3.1. Angelim-Pedra (<i>Hymenolobium petraeum</i> Ducke).....	22
2.3.2. Angelim-Ferro (<i>Hymenolobium sp</i>).....	23
2.4 Ensaio Não Destrutivos de Caracterização.....	24
2.4.1. Ensaio Não Destrutivos – Ondas de Tensão.....	24
2.4.2. Ensaio Não Destrutivos – Ultrassom.....	26
2.4.3. Ensaio Não Destrutivos – Vibração Transversal e Longitudinal.....	27
2.4.4. Ensaio Não Destrutivos – Resistógrafo.....	29
2.4.5. Considerações Finais	29
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1. Caracterização da Madeira	31
3.2. Considerações Gerais dos Modelos	36
3.3. Geometria e Carregamento.....	38
3.4. Definição das Propriedades Mecânicas das Barras da Treliça.....	40
3.5. Modelagem Numérica.....	42
3.6. Análise Estatística.....	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4.1. Propriedades da Madeira.....	48
4.2. Carregamento e Seções Transversais.....	51
4.3. Resultados das Simulações.....	57
5. CONCLUSÕES.....	66
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

1. INTRODUÇÃO

Notavelmente, assim como a pedra e a argila, a madeira tem sido utilizada há milhares de anos como material de construção. É difícil imaginar estruturas como castelos e catedrais bem como diversos edifícios modernos sem elementos de madeira. O uso da madeira acontece há milhares de anos, sendo motivada por sua abundância e facilidade de manuseio com ferramentas simples e rústicas (ALMEIDA et al., 2016b; CAVALHEIRO et al., 2016; ZANGIÁCOMO; CHRISTOFORO; LAHR, 2016). Além de ser um material renovável, a madeira demanda baixo consumo de energia no seu processamento, possuindo grande potencial de uso na construção civil (MATOS et al., 2012; TER STEEGE et al., 2016; TUISIMA-CORAL et al., 2017). Além disso, a principal causa de colapsos em estruturas de madeira é erro humano (DIETSCH, 2011) e não falha do material, evidenciando sua qualidade.

Assim como os demais materiais estruturais, é necessário o conhecimento das propriedades mecânicas das espécies (TREVISAN et al., 2007). Para projetar estruturas seguras, reparáveis e eficientes, projetistas devem ser capazes de caracterizar com precisão as propriedades dos materiais a serem utilizados na construção (BUKAUSKAS et al., 2019). Portanto, para o dimensionamento e análise de elementos estruturais de madeira é necessária a realização de ensaios de caracterização das propriedades físicas e mecânicas.

Além de tratar sobre disposições dos elementos estruturais, ações atuantes, modelos de análise, detalhamento e tipos de ligações, por exemplo, a ABNT NBR 7190 (1997) sugere métodos específicos para a obtenção das características físicas e mecânicas da madeira. Dentre as propriedades mecânicas, o módulo de elasticidade (E) e a resistência à compressão na direção paralela às fibras (f_{c0}) são imprescindíveis para elaboração de projetos estruturais (SCANAVACA JÚNIOR, GARCIA, 2004; YANG, EVANS, 2003).

Apesar da madeira apresentar resistências compatíveis com aço e concreto (ALMEIDA, et al., 2016a) e ter procedimentos de dimensionamento bem definidos pelas normas, é comum estruturas de madeira de cobertura apresentarem patologias que comprometem o seu uso e sua segurança, como abordado nas pesquisas de Andrade Júnior et al. (2012), Andrade Júnior et al. (2014) e Palludo et al. (2017).

No Brasil, o uso de peças de madeira como elemento estrutural é regulamentado pela NBR 7190 (1997) “Projeto de Estruturas de Madeira”, da Associação Brasileira de Normas Técnicas. A ABNT NBR 7190 (1997) utiliza de métodos probabilísticos, o Método dos Estados Limites Último, que avalia a capacidade resistente à ruptura e à instabilidade em toda ou em parte da estrutura e o Método dos Estados Limites de Utilização, que avalia a deformação excessiva e a durabilidade no todo ou em parte da estrutura.

Dentre as recomendações fornecidas, se encontra a adoção do módulo de elasticidade médio à compressão na direção paralela às fibras ($E_{c0,m}$) para todos os elementos estruturais visando avaliar o deslocamento excessivo. De acordo com a normativa, na avaliação do estado limite de serviço, o deslocamento máximo de estruturas de madeira é limitado ao valor do vão (L)/200. É fundamental que os deslocamentos das estruturas sejam limitados para que a qualidade da mesma seja garantida. Os possíveis efeitos dos deslocamentos excessivos são:

- Efeitos visuais desconfortáveis;
- Vibrações excessivas;
- Patologias em elementos estruturais (por exemplo, excesso de fissuras em pilares, vigas e lajes);
- Patologias em elementos não estruturais (por exemplo, excesso de fissuras em paredes de alvenaria, revestimentos e empenamento de esquadrias).

As patologias em elementos estruturais e não estruturais podem impedir a utilização adequada da edificação. Além disso, as manifestações patológicas, quando não devidamente tratadas, podem reduzir a vida útil da edificação ou mesmo interromper seu funcionamento. Os casos mais comuns de patologias são umidade, fissuras e deslocamentos excessivos.

A madeira pode ser encontrada como diversos elementos estruturais, especialmente em coberturas. Nas últimas duas décadas, a diversidade e sofisticação das técnicas de construção de estruturas têm aumentado significativamente (BUKAUSKAS et al., 2019). Dentre os possíveis sistemas estruturais de coberturas, destacam-se os arcos, as vigas e as treliças (CARNIELLE, 2011). A treliça é uma estrutura constituída por barras dispostas em diversos planos onde não há transferência de momento entre os elementos. Usualmente, a treliça é um sistema estrutural relativamente leve, sendo uma alternativa para superar grandes vãos ou cargas elevadas.

Nas treliças de cobertura em madeira, uma decorrência de manifestações patológicas consiste nos deslocamentos exagerados (ANDRADE JÚNIOR et al., 2014), que podem ser causados pela perda de rigidez e resistência das barras pelo ataque de agentes xilófagos, dentre outros. Além disso, uma possível causa de deslocamentos excessivos pode ser pela adoção do $E_{c0,m}$ para todos os elementos da treliça como sendo o valor a ser considerado na verificação dos estados limites de serviço (deslocamento máximo de $L(\text{vão})/200$), assim como preconiza a ABNT NBR 7190 (1997).

Em razão da variabilidade da madeira, as propriedades físicas e mecânicas podem variar consideravelmente dentro de uma mesma espécie de madeira, até mesmo entre peças de um mesmo lote. Portanto, na situação real de projeto, diversas barras da treliça podem apresentar valores de rigidez inferiores ao valor médio, podendo acarretar deslocamentos e deformações

excessivas na estrutura. Tais deslocamentos podem ser superiores aos valores de referência estabelecidos para a condição de estado limite de serviço, podendo comprometer o uso e desempenho do sistema estrutural e até mesmo da edificação.

Para avaliar a influência da adoção do $E_{c0,m}$ foi realizado um estudo numérico de 10 tipologias (Alpendre, Banzos Inclinados, Banzo Superior Inclinado, Banzos Paralelos, Bowstring, Fink, Howe, K Truss, Pratt, Scissor) e 3 vãos (5, 10 e 20 metros) e 2 espécies de madeira (Angelim Pedra e Angelim Ferro). Adotando o $E_{c0,m}$ para todas as barras, como preconiza a norma ABNT NBR 7190 (1997), e por meio de uma análise linear, foram determinadas as cargas máximas para um deslocamento de $L/200$. Na etapa seguinte, foram atribuídos valores experimentais de rigidez aleatoriamente para cada elemento da treliça, sendo medido o deslocamento máximo de cada modelo calculado através de uma análise não linear geométrica. A seção transversal foi definida de modo que o índice de esbeltez (λ) das peças comprimidas fosse menor que 80, sendo a seção mantida constante para todas as barras. Posteriormente, os valores de deslocamentos foram comparados e a influência da adoção do mesmo valor de rigidez nos deslocamentos da estrutura foi avaliado.

1.1. Objetivos da Pesquisa

Como objetivo geral, teve-se:

- avaliar a adoção do $E_{c0,m}$ para todas as barras como possível causa de deslocamentos excessivos em treliças de madeira.

Como objetivos específicos, teve-se:

- avaliar a adoção do $E_{c0,m}$ como possível causa de instabilidades locais (flambagem de barras da treliça);
- propor uma prática alternativa para a montagem de treliças de madeira.

1.2. Justificativa

Atualmente, é usual o uso da madeira na construção de sistemas estruturais de cobertura, principalmente treliças. Tais estruturas podem superar grandes vãos e carregamentos, dentre outros fatores, devido às propriedades mecânicas da madeira e ao peso relativamente baixo da estrutura. Apesar da madeira ser considerada um ótimo material estrutural, é recorrente estruturas de madeira apresentarem manifestações patológicas durante a sua vida útil. Tais manifestações podem ser oriundas, dentre outros fatores, de má execução e manutenção ou mau dimensionamento.

Tais estruturas são regulamentadas pela ABNT NBR 7190 (1997). Para a verificação do Estado Limite de Serviço, o qual preconiza que o deslocamento máximo na estrutura não deve ultrapassar $L/200$, a norma sugere adotar o $E_{c0,m}$ para todos os elementos da treliça. Como se trata de um material natural, onde a idade, o ambiente de cultivo, o método de colheita, secagem e armazenamento são fundamentais na qualidade da madeira, suas propriedades mecânicas podem sofrer variações dentro da mesma espécie ou até mesmo no mesmo lote. Desse modo, peças de madeira com módulo de elasticidade inferior ao médio podem ser alocados nas posições mais solicitadas ou como elementos mais esbeltos, podendo gerar deslocamentos excessivos ou até mesmo acima do limite estabelecido por norma.

Com os avanços tecnológicos é possível realizar a pré-classificação da madeira através de métodos não destrutivos. Assim, é possível alocar as barras mais rígidas nas posições mais solicitadas, evitando deslocamentos excessivos e outras possíveis patologias.

1.3. Discussão sucinta dos capítulos

Para alcançar o objetivo proposto por este trabalho, o mesmo foi dividido em capítulos. A seguir apresenta-se brevemente o conteúdo de cada capítulo.

- Capítulo 2 [Revisão Bibliográfica]: realiza-se uma revisão dos assuntos abordados durante o trabalho. São apresentados trabalhos da literatura técnica e científica a respeito de patologias em estruturas de cobertura, assim como estudos relacionados a simulações numéricas em estruturas de madeira, as espécies adotadas nesta pesquisa e a determinação de propriedades mecânicas e físicas por meio de ensaios não destrutivos. Por último, é evidenciada a contribuição do presente trabalho.

- Capítulo 3 [Material e Métodos]: apresenta-se a metodologia experimental para obter as propriedades mecânicas das espécies de madeira, apresentada na ABNT NBR 7190 (1997). Além disso, são discutidos os fatores e as considerações feitas na análise numérica, assim como a forma de análise estatística a ser utilizada.

- Capítulo 4 [Resultados e Discussão]: neste capítulo apresenta-se o intervalo de valores de flecha máxima encontrado através de uma análise estatística dos resultados numéricos. Ainda, foi discutida a comparação dos esforços nas barras comprimidas com a carga de Euler.

- Capítulo 5 [Conclusões]: neste capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tendo em vista a falta de trabalhos relacionados à adoção do $E_{c0,m}$ para todas as barras da estrutura de madeira no cálculo dos deslocamentos, e possíveis deslocamentos excessivos que tal método pode provocar, a revisão bibliográfica pautou-se na busca de trabalhos que reportassem diferentes aspectos da temática abordada neste estudo. Primeiramente, foram apresentados trabalhos relacionados às principais patologias encontradas em estruturas de madeira, evidenciando suas principais causas e efeitos. Na sequência, são apresentadas pesquisas cuja temática é a análise de estrutura de cobertura em madeira com auxílio de simulações numéricas, destacando as vantagens e eficiência de tal abordagem. Posteriormente, são discutidas as características gerais das duas espécies abordadas neste trabalho (*Angelim Ferro - Hymenolobium sp* e *Angelim Pedra - Hymenolobium petraeum Ducke*). Por último, são discutidos quatro ensaios não destrutivos de caracterização da madeira. Tais ensaios podem ser utilizados na pré-classificação das peças de madeira, possibilitando a escolha de peças de qualidade superior em posições críticas da treliça. Como mecanismo de busca utilizou-se: Portal Periódicos CAPES, Scielo, Science.gov, Google Scholar e Science Direct, além do site do Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

2.1. Manifestações Patológicas em Estruturas de Cobertura

A madeira não é deteriorada pelo processo de envelhecimento (HIGHLEY, SCHEFFER, 1989), assim como não ocorre a diminuição das propriedades (CRUZ, 2001). Segundo Abramyan e Ishmametov (2016), estruturas de madeira tendem a diminuir o rendimento durante a vida útil. Segundo Brito (2014) a deterioração da madeira é causada por agentes biológicos, físicos, químicos ou mecânicos aos quais o material fica exposto. Além disso, a deterioração da madeira pode afetar consideravelmente as suas características (CALIL JÚNIOR et al., 2006). Ainda, a madeira é um material heterogêneo e com alta variabilidade das propriedades físicas e mecânicas, além de poder apresentar nós, o que requer um cuidado no seu processo de secagem, transporte e armazenamento. Entretanto, a partir de um controle de qualidade destes processos, é possível garantir a integridade do material, que pode apresentar resistência superior à do concreto.

A madeira vem sendo utilizada como elemento estrutural há vários anos por sua disponibilidade e versatilidade. Com o decorrer dos séculos, principalmente no século XX e XXI, diversos avanços tecnológicos ocorreram, aumentando as novas potencialidades e eficiência de uso. Assim como todo material aplicado em construções, espera-se satisfatório desempenho durante a vida útil do elemento estrutural. Para atingir tal objetivo, é necessário que o elemento apresente desempenho que atenda os valores mínimos preestabelecidos nas condições previstas

de uso (CALIL JÚNIOR et al., 2006). Entretanto, diversos fatores podem reduzir o desempenho da estrutura ao longo do tempo, especialmente da madeira. Tais fatores podem ser (BRITO, 2014; OLIVEIRA et al., 2019; PINHEIRO et al., 2016):

- Defeitos naturais da madeira;
- Degradação biológica;
- Fogo;
- Agentes atmosféricos, biológicos e ambientais, em particular a variação de umidade;
- Projeto inicial, execução, manutenção ou erros de intervenção;
- Cargas superiores às de projeto.

Tais fatores podem gerar manifestações patológicas, que podem ser definidas pelas formas de manifestação, decorrência e mecanismos de colapsos ou degeneração da estrutura ou de seus elementos (SOUZA, RIPPER, 1998). Para a melhoria do desempenho de elementos estruturais é essencial a prevenção e o controle de patologias, visando aumentar a vida útil da estrutura. Para isso são necessárias pesquisas relacionadas as mais diversas causas e efeitos das patologias. Como indicativo do avanço e inovação de um determinado tópico, podem ser analisadas as publicações em simpósios e congressos científicos, que podem representar uma tendência dos temas sendo desenvolvidos pelo meio científico. No ramo de Engenharia Civil, na área de estruturas, o congresso mais renomado no Brasil é o Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira – EBRAMEM. Baseado nos princípios sugeridos por Freitas (2009), a Tabela 2.1 mostra o número de artigos publicados nos EBRAMEM realizados até 2014, comparando o número de artigos publicados relacionados a manifestações patológicas e durabilidade da madeira. Pela Tabela 2.1 observa-se pouca atividade científica relacionada a patologias em estruturas de madeira no Brasil se comparada aos outros temas do congresso. Tal confirmação é sustentada por Freitas (2009) e Brito (2014), demonstrando a falta de pesquisa sobre a causa e os efeitos de patologias em estruturas de madeira. Alguns estudos nacionais foram feitos relacionados a manifestações patológicas, sendo alguns citados abaixo.

Tabela 2.1. Resumo das atividades publicadas pelo EBRAMEM até 2014

Ano	Áreas Temáticas	Publicações Gerais	Patologia, Recuperação de Estruturas e Durabilidade da Madeira
1983	6	47	0
1986	7	60	1
1989	9	61	0
1992	11	106	3
1995	10	100	0
1998	9	144	1
2000	9	140	2
2002	13	202	8
2004	17	225	6
2006	14	223	11
2008	4	245	5
2010	20	420	9
2012	5	342	10
2014	11	322	18

Fonte: EBRAMEM 2014.

Andrade Júnior et al. (2012) realizaram vistorias em um telhado construído com madeira nativa brasileira Piquiarana visando analisar o surgimento de manifestações patológicas após uma década de utilização, além de determinar propriedades de resistência e densidade de amostras da estrutura. Foram realizadas análises visuais para avaliar a presença de patologias e possíveis causas. Além disso, foram realizados ensaios laboratoriais de amostras para determinação de propriedades mecânicas da madeira. Os principais problemas encontrados foram relacionados ao projeto e execução da obra. Não foram encontradas manifestações patológicas, possivelmente pelo uso de madeira de alta durabilidade e ausência de contato direto com água.

Pinheiro et al. (2016) analisaram uma treliça de madeira de cobertura por meio de vistoria para identificar patologias, assim como apontar possíveis causas e soluções para as mesmas. As medidas e a espécie de madeira utilizadas foram avaliadas “in loco”, assim como a inspeção das condições dos elementos da estrutura como os detalhes de montagem, estabilidade e deformação dos elementos, deterioração das condições de uso da estrutura, entre outros. Foram encontradas manifestações patológicas como deterioração da estrutura, ruptura e instabilidade de barras e conexões, instabilidade global e deslocamento vertical excessivo. A deterioração por agentes biológicos, erros de projeto e execução foram as principais causas, sendo recomendado a manutenção preventiva a cada 3 e 5 anos.

Martins e Fioriti (2016) investigaram as manifestações patológicas presentes no sistema estrutural de um edifício. Foram realizadas vistorias e o levantamento histórico do edifício,

seguido de catalogação das patologias, assim como possíveis causas e soluções. As principais manifestações patológicas foram deterioração das peças, atuação de agentes bióticos, irregularidades geométricas, uniões deficientes em cavilhas, fissuras e reparos deficientes. Foi observado que as manifestações patológicas poderiam ser evitadas com maior controle do processo construtivo e manutenção periódica.

Andrade Júnior et al. (2014) avaliaram a integridade da estrutura de cobertura de um galpão destinado a estoque de produtos químicos. Foram feitas vistorias para avaliar possíveis patologias nos elementos da estrutura e nas ligações. Além disso, em razão da falta de projetos, foram retiradas amostras da estrutura, da determinação da densidade aparente e algumas propriedades aparentes. Os principais problemas foram umidade, deterioração da madeira, cavilhas mal colocadas, falta de contraventamentos e deterioração de pregos. A principal causa foi a falta de manutenção da estrutura.

Bertolini-Cestari et al. (2013) analisaram possíveis manifestações patológicas de um domo de madeira utilizando modelos computacionais 3D. O modelo foi gerado a partir de pontos obtidos por um scanner e imagens fotográficas. Com o modelo computacional foi possível observar diversas deformações e deslocamentos, assim como inferir possíveis causas. De acordo com os modelos computacionais, os tirantes localizados na região externa não estavam alongados, indicando que eles não estavam sendo tracionados. Com isso, deslocamentos excessivos foram observados na região.

Macchioni e Mannucci (2018) descreveram as principais características de treliças italianas e as principais manifestações patológicas. Após a investigação de diversas estruturas, os problemas foram divididos em três categorias: falhas nas ligações, normalmente relacionadas à sobrecarga ou decaimento das propriedades mecânicas; falhas nas barras, possivelmente causadas pela falta de qualidade da madeira ou erro de dimensionamento; e decaimento das propriedades devido a ataques de agentes bióticos. Foi observado que as falhas em treliças foram acompanhadas de deslocamentos excessivos da estrutura.

Pode se observar pelos trabalhos disponíveis na literatura que deslocamentos excessivos estão entre as causas mais comuns de manifestações patológicas. Uma das principais causas foi o carregamento excessivo, sendo necessário a correção com manutenções adequadas (ARRIAGA et al., 2002; CALIL JÚNIOR et al., 2006; ALVIM et al., 2011; BRANCO et al., 2012). Tais deslocamentos excessivos podem comprometer o funcionamento da própria estrutura ou outras partes da edificação, sendo essencial a compreensão das causas para garantir o tempo de vida útil da edificação.

2.2. Simulação Numérica em Estruturas de Cobertura de Madeira

Em geral, para avaliar o comportamento de elementos estruturais são necessários ensaios em protótipos reais, que requerem uma estrutura com equipamentos específicos, material e funcionários qualificados que, em diversos casos, inviabiliza a realização desses testes. Dessa forma, com o avanço computacional, as simulações numéricas surgem como alternativa. Dentre os métodos numéricos, destaca-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), que consiste em discretizar o domínio e analisar cada um nos subdomínios separadamente. Tendo em vista que um modelo calibrado pode simular o comportamento de diversas estruturas com diferentes parâmetros, a um custo relativamente inferior ao estudo experimental, tal ferramenta tem sido adotada por diversos pesquisadores.

Bassier et al. (2016) investigaram a criação de objetos BIM realistas de telhados de madeira de edifícios históricos para, posteriormente, gerar modelos geométricos como entrada de uma análise estrutural. A estrutura foi digitalizada com auxílio da ferramenta TLS (*Terrestrial Laser Scanning*), gerando uma nuvem densa de pontos da geometria da estrutura. Os dados foram tratados, sendo exportados com formato IFC 2x3, sendo compatível com plataformas BIM. Além disso, com base na geometria gerada, a análise estrutural é realizada com auxílio do software ANSYS®, fundamentada pelo Método dos Elementos Finitos. A metodologia apresentou volumes e área mais precisos, além de ser capaz de representar geometrias complexas e não lineares.

Branco et al. (2016) avaliaram o comportamento de treliças de madeira existentes com auxílio de modelos numéricos visando auxiliar nas definições de restaurações de tais estruturas. Uma caracterização precisa da geometria e das condições biológicas dos elementos de madeira foram feitas com auxílio de testes não destrutivos. O modelo numérico foi comparado com um ensaio de carregamento em condição de serviço de uma das treliças. Foi observado que a modelagem das ligações foi essencial para reproduzir o comportamento da estrutura.

Satheeskumar et al. (2017) propuseram um modelo tridimensional de elementos finitos de parte de uma casa com estrutura de treliças de madeira para avaliar a distribuição de cargas de acordo com diferentes carregamentos. Um modelo numérico é validado com base em resultados experimentais. O modelo numérico apresentou variação máxima de aproximadamente 15% dos valores experimentais, sendo capaz de reproduzir a distribuição e os esforços dos diversos elementos da estrutura.

Sejkot et al. (2020) analisaram como a rigidez do sistema de contraventamento contribui para a instabilidade fora do plano de treliças de cobertura. Foi realizado um estudo paramétrico com auxílio do software ABAQUS®, sendo valores comparados com resultados analíticos. Forças de compressão significativas foram observadas em ligações do banzo superior de treliças com

elevados vãos, sendo a consideração dessas forças especialmente importante no dimensionamento das ligações da estrutura.

Parisi et al. (2012) investigaram o efeito da morfologia estrutural na resposta sísmica de treliças de cobertura em madeira. Vistorias das estruturas em análise modal e análise de espectro de resposta foram realizadas. A metodologia adotada foi considerada correta, concluindo que o esquema de treliças paralelas de madeira é uma solução eficiente para diversas variedades de parâmetros geométricos.

Stevenson et al. (2019) compararam diferentes tipos de falhas de treliças de cobertura em madeira submetidas a cargas de vento extremas. Um estudo numérico com auxílio do software SAP2000® foi desenvolvido, buscando analisar os esforços internos dos membros da treliça submetidos a ventos com pressão interna. Observou-se que o ponto mais susceptível à falha é a ligação da treliça de cobertura com a parede, sendo a ligação do banzo superior o segundo ponto mais vulnerável da estrutura. Tais resultados foram observados por Wolfe e McCarthy (1989).

Gocál et al. (2014) apresentaram a análise geométrica e estática de uma treliça de cobertura em madeira, dimensionada em 1409, avaliando a estrutura segundo alguns aspectos da norma europeia STN EN, de 1995. A estrutura foi modelada no software SCIA Engineer®, baseado no Método dos Elementos Finitos. Os esforços dos resultados numéricos não excederam os valores propostos pela norma europeia, mostrando que o método de dimensionamento utilizado no século XV atende os princípios da norma europeia.

Liu (2012) investigou os esforços, deformações e deslocamentos de uma treliça espacial submetida a diferentes tipos de carregamentos. Os resultados numéricos, obtidos com auxílio do software ANSYS®, foram comparados a valores teóricos. O modelo numérico apresentou resultados satisfatórios, indicando grande estabilidade global e distribuição de esforço, indicando a eficiência do uso de treliças com diferentes condições de carregamento.

Os modelos numéricos têm apresentado resultados cada vez mais próximos dos modelos reais em virtude das significativas melhorias dos computadores nos últimos anos. Dentre as vantagens de uso de computadores está a possibilidade de consideração das não linearidades no cálculo das estruturas. Como pode-se observar, a capacidade de carga de determinada estrutura decresce com o aumento do carregamento, sendo a redução da capacidade de carga ocasionada pelas não linearidades. Em estruturas esbeltas, a necessidade de modelos não lineares é bem pronunciada por causa dos efeitos de segunda ordem na estrutura. Dentre as não linearidades, pode-se citar a geométrica e a física.

Não linearidade geométrica são alterações nos esforços da estrutura provocadas por mudanças na sua geometria. Portanto, a consideração da não linearidade geométrica é indicada

em caso de grandes deslocamentos, rotações ou deformações. A não linearidade física é ocasionada pela perda de rigidez do material. Conforme as tensões ultrapassam o limite de proporcionalidade do material, a rigidez do material diminui, acarretando um decréscimo na capacidade portante da estrutura.

Segundo Tabiei e Wu (2000), o comportamento linear do material da madeira é geralmente observado nas tensões longitudinal e transversal. Entretanto, os efeitos oriundos da não linearidade física em peças comprimidas são consideravelmente inferiores em elementos submetidos a tensões substancialmente abaixo da tensão resistente do material. O valor limite da tensão em que a influência da linearidade é proeminente depende do tipo de carregamento (HUNT, 1989). De acordo com trabalhos disponíveis na literatura, a não linearidade em elementos de madeira submetidos a compressão tem início em tensões de 70% a 81% da tensão última do material (KINGSTON; BUDGEN, 1972; KEITH, 1972).

Estudos numéricos vêm se tornando cada vez mais utilizados em análises estruturais pela não necessidade de diversos aparelhos específicos e mão de obra. Foram encontrados diversos trabalhos na literatura, sendo alguns citados acima, onde análises baseadas nos elementos finitos foram utilizadas para avaliar estruturas existentes. Entretanto, são necessários mais estudos para avaliar deslocamentos excessivos em estruturas de madeira, o que pode acarretar manifestações patológicas na estrutura e nos demais componentes da edificação, reduzindo a vida útil da edificação.

2.3. Espécies utilizadas

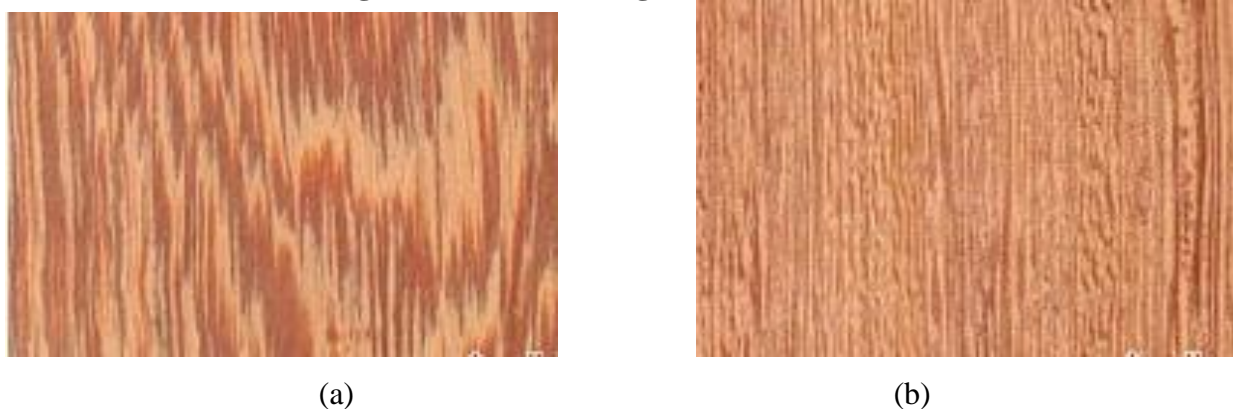
Em razão do crescente uso de madeira como material estrutural, a demanda por novas espécies de madeira se torna necessária. A exploração seletiva de determinadas espécies de madeira tem se tornado predatória, reduzindo a procura e receptividade das empresas e construtores para novas espécies cujas propriedades ainda não são completamente conhecidas (SOUZA, 1997). Neste estudo foram analisadas duas madeiras disponíveis no território brasileiro e que podem ser utilizados como material estrutural. Suas respectivas características são apresentadas abaixo.

2.3.1 Angelim-Pedra (*Hymenolobium petraeum* Ducke)

O Angelim-Pedra pertence à família Leguminosae, conhecido como angelim, angelim amarelo, angelim da mata, angelim do Pará, angelim macho e mirarema. As árvores podem alcançar 50 metros de altura e até 2 metros de diâmetro, sendo uma das maiores da Amazônia. Sendo uma espécie amazônica, ela pode ser encontrada no Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia. O cerne e alburno podem ser distintos pela cor, sendo o cerne castanho-

avermelhado claro ou escuro (Figura 2.1), com manchas castanhas mais escuras e o alburno apresenta cor castanho-pálido. A madeira não possui brilho, assim como não possui cheiro nem gosto. Apresenta densidade média e dura ao corte, sendo utilizada principalmente na construção civil e naval, marcenaria, dormentes, tacos, estacas, vigamentos e carpintaria (LORENZI, 2008). É uma madeira que apresenta densidade média, dura ao corte, com resistência natural muito alta em relação a fungos, sendo moderadamente resistente a brocas marinhas e resistente a cupins de madeira seca. Além disso, possui boa trabalhabilidade, sendo o acabamento realizado com a plaina, torno ou broca. É uma madeira com fácil processo de aplainamento e serragem, simples de pregar e parafusar, permitindo acabamento satisfatório (IBAMA, 1997; SUDAM/IPT, 1981). Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), a espécie é classificada como C30. Outras propriedades mecânicas propostas pela normativa são apresentadas na Tabela 2.

Figura 2.1. a) Face tangencial b) face radial



Fonte: Instituto de Pesquisa de São Paulo (IPT) (1981).

Tabela 2.2. Propriedades mecânicas da espécie Angelim Pedra

ρ_{ap} (12%) (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{c0} (MPa)
694	59,8	75,5	3,5	8,8	12912

Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

2.3.2 Angelim-Ferro (*Hymenolobium sp*)

Angelim-Ferro é da família Leguminosae, podendo ser encontrada nos estados de Amazonas, Pará e Roraima. A altura comercial da árvore é de 13,5 metros de tronco retilíneo. A madeira apresenta cerne e alburno distintos, cerne de cor castanho a marrom-avermelhado claro, sendo o alburno de cor marrom pálido (Figura 2.2). É considerada uma madeira muito pesada e durável, de cor marrom-amarelo claro e textura grossa, com bom acabamento, sem apresentar brilho ou cheiro. Apresenta alta durabilidade em relação a fungos e cupins de madeira seca, sendo moderadamente resistente à brocas marinhas. É frequentemente utilizada na carpintaria,

marcenaria, dormentes, estacas, tacos de assoalhos, vigamentos, ripas e construção naval (HIRAMATSU, 2008). Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), a espécie é classificada como C40. Outras propriedades mecânicas propostas pela normativa são apresentadas na Tabela 2.3.

Figura 2.2. Corte longitudinal



Fonte: Grobério (2000).

Tabela 2.3. Propriedades mecânicas da espécie Angelim Ferro

ρ_{ap} (12%) (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{c0} (MPa)
1170	79,5	117,8	3,7	11,8	20827

Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

2.4. Ensaios Não Destrutivos de Caracterização

O teste não destrutivo inclui várias técnicas altamente eficientes para avaliar o desempenho físico, sendo possível estimar propriedades físicas e mecânicas da madeira estrutural. Tais métodos são alternativas eficazes para investigar a integridade dos materiais (SILVA, 2019). Barbosa et al. (2013) afirmam que são ensaios que não comprometem a capacidade da madeira, sendo de simples execução, rápidos e relativamente de baixo custo. Todavia, as amostras utilizadas em testes mecânicos normalmente não são reaproveitadas (VIALA; PLACET; COGAN, 2020).

2.4.1 Ensaios Não Destrutivos – Ondas de Tensão

Alguns ensaios não destrutivos são relatados na literatura, sendo alguns deles utilizados para estimar as propriedades mecânicas dos elementos de madeira, dentre eles, o método de inspeção por ondas de tensão, que consiste em analisar a variação da velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida no material (CANDIAN e SALES, 2009). A velocidade de propagação apresenta relações com a massa específica e com o módulo de elasticidade, sendo possível realizar uma correlação. Além de estimar as propriedades mecânicas, o método

possibilita avaliar o grau de ataque biológico e classificar as peças de madeira (DEL MENEZZI et al., 2012).

Existem diversos equipamentos disponíveis para realizar o teste de ondas de tensão. Para exemplificar o funcionamento básico, foi escolhido o modelo 239A, marca Metriguard. A peça de madeira é apoiada em dois pontos. A aplicação da onda de tensão é realizada pelo impacto de um martelo instrumentado com um acelerômetro em uma extremidade da peça de madeira. Na extremidade oposta, em posição simétrica, é fixado o acelerômetro que faz a leitura da chegada da onda. A montagem de um teste não destrutivo de ondas de tensão é apresentada na Figura 2.3.

Figura 2.3. Ensaio nas peças de madeira: a) e b) detalhes dos acelerômetros c) e d) detalhes dos aparatos utilizados



Fonte: Ballarin e Palma (2009).

O teste não destrutivo de ondas de tensão é um importante teste para analisar a estrutura de materiais, inclusive a madeira. Diversos autores têm desenvolvido pesquisas buscando analisar as correlações entre a velocidade da onda de tensão e propriedades físicas e mecânicas de diferentes espécies de madeira. Diversos autores comprovaram a eficiência do método avaliando diversas espécies (BALLARIN, PALMA, HELLMEISTER, 2010; PAULA et al., 2016; ROSA et al., 2014; CHEN, GUO, 2016; RIBEIRO et al., 2016; YANG et al., 2017; GARCIA et al., 2012). Como mencionado anteriormente, testes não destrutivos de onda de tensão podem ser uma boa alternativa para determinar propriedades mecânicas de diferentes madeiras.

2.4.2 Ensaios Não Destrutivos – Ultrassom

No Brasil, a técnica de ultrassom é uma das mais utilizadas. Uma alternativa de ensaios não destrutivos são os ensaios de ultrassons, que analisa as variações ao longo do material de ondas repetitivas geradas por um emissor de impulsos (PEREIRA, 2015), sendo possível estimar o módulo de elasticidade dinâmico da madeira. Chauhan e Sethy (2016) propuseram equações que correlacionam os módulos de elasticidade dinâmico e estático, com R^2 superior 96% em determinados casos. O seu desenvolvimento ocorreu no Reino Unido, na década de 1960 (BUCUR, 2006). Alguns autores têm desenvolvido pesquisas relacionando testes de ondas ultrassom com propriedades de diversas espécies de madeira. Nogueira e Ballarin (2003) compararam o módulo de elasticidade estático da madeira *Pinus Taeda* nas três direções com valores obtidos pela técnica de ultrassom. As direções longitudinal e radial, com valores de coeficiente de determinação das regressões lineares de $R^2 = 97\%$ e 82% , respectivamente, enquanto o valor foi de 42% na direção tangencial.

Oliveira et al. (2006) avaliaram a dimensão do corpo de prova na velocidade ultrassônica em madeiras de *Pinus Caribaea* (*Pinus caribaea* var. *caribaea*), Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*), Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis*) e Jatobá (*Hymenaea* sp). Foi observado que é necessário ajustar a frequência do transdutor com a dimensão longitudinal com corpo de prova para utilizar a correta velocidade de onda. Tal conclusão foi obtida por Bucur (1995).

Feio et al. (2004) avaliaram os coeficientes de determinação do módulo de elasticidade e a resistência à compressão normal às fibras, por método ultrassônico, para as madeiras de *Castanea satina* Mill. Os valores de R^2 para a correlação $E_{\text{Dinâmico}}$ e $E_{\text{Estático}}$ foi de 86% para as direções tangencial e radial, e de 74% para a direção paralela às fibras.

Stangerlin et al. (2008) testaram o método de ultrassom para obter módulo de elasticidade em madeiras de Guajuvira (*Patagonula americana*) e Pinheiro-do-Paraná (*Araucaria angustifolia*). Os valores dos testes não destrutivos foram comparados com os valores obtidos pelo ensaio destrutivo de compressão paralela às fibras. Os valores de módulo de elasticidade apresentaram um coeficiente de determinação de 84% e 88% entre o dinâmico e estático, para a madeira juvenil e adulta de Guajuvira, respectivamente. Para a madeira de Pinheiro-do-Paraná esses valores foram 91% e 95% , para madeiras juvenis e adultas, respectivamente.

Para a realização do teste ultrassom é utilizado dois transdutores para a emissão e recepção das ondas ultrassônicas. Um dos equipamentos disponíveis é da marca Steinkamp, modelo BP-5 Figura 2.4, sendo calibrado no início de cada série de ensaios. É colocado uma camada fina de gel nos transdutores para aumentar a precisão das leituras da velocidade de propagação da onda ultrassônica, utilizada na determinação da constante dinâmica CLL.

Figura 2.4. Equipamento de ultrassom Steinkamp, modelo BP 5: a) e b) obtenção da leitura do tempo



Fonte: Ballarin e Nogueira (2005).

Tais ensaios foram avaliados e utilizados por diversos autores (BRANCO, SOUZA, TSAKANIKAKA, 2017; STANGERLIN et al., 2010; STANGERLIN et al., 2011; VIVIAN et al., 2012; HAINES, LEBAN, HERBE, 1996; GONÇALVES, BARTHOLOMEU, 2000; MORI et al., 2016), sendo uma ferramenta útil da estimativa do módulo de elasticidade.

2.4.3 Ensaios Não Destrutivos – Vibração Transversal e Longitudinal

Outra metodologia utilizada é a vibração transversal e a vibração longitudinal, sendo associadas à rigidez na flexão (CARREIRA, CANDIAN, 2008; PITER, ZERBINO, BLAB, 2004). Os ensaios de vibração apresentam valores muito próximos de rigidez quando comparados a métodos consolidados, como o ensaio de flexão estática. Valores dos módulos de elasticidade obtidos por meio de vibração longitudinal, transversal e flexão estática podem apresentar correlação significativa a 1% de probabilidade (SEGUNDINHO et al., 2012). A obtenção de características a partir de vibrações vem sendo estudada por mais de um século, sendo Pellerin (1965) o primeiro pesquisador a estimar propriedades elásticas de peças de madeira serrada por meio de vibrações naturais. Segundo Santos (2019), o ensaio de vibração longitudinal pode ser mais prático, com menor tempo de ensaio e evitando tempo de calibração. ASTM E 1876 (2007) e ASTM C 215 (2008) são padrões normativos utilizados para a realização dos ensaios.

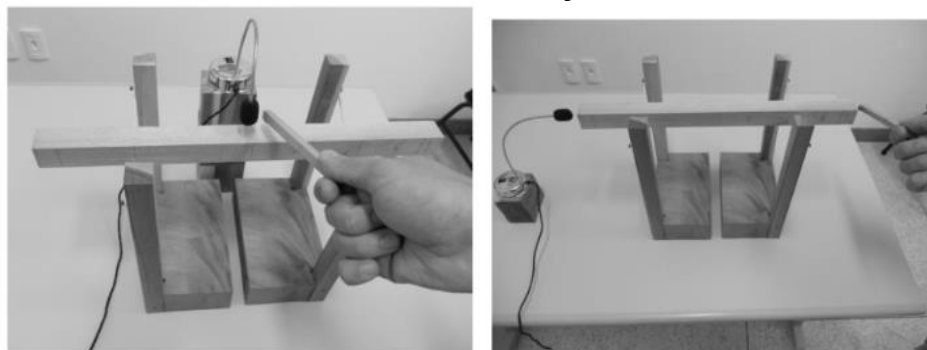
Segundinho et al. (2013) compararam os valores de módulo de elasticidade de peças de Madeira Laminada Colada (MLC) obtidos por meio de ensaio de vibração transversal livre e do ensaio de flexão estática. Foram analisadas 54 peças de madeira Teca (*Tectona grandis*), Pinus Oocarpa (*Pinus oocarpa shiede*) e Lyptus. Foi possível estimar os módulos de elasticidade com ótima precisão, sendo significativa ($P < 0,05$), para todos os resultados de regressão linear simples. Foram observados coeficientes R^2 que variam de 0,85 a 0,99, resultados semelhantes aos encontrados por Carreira et al. (2010).

Guan et al. (2019) avaliaram no total 90 painéis de madeira com compósitos. Foram comparados valores obtidos por ensaios de vibração transversal livre em painéis de tamanho total e ensaios de flexão estática de amostras dos painéis. Os coeficientes de correlação entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico variam de 89% até 99%, demonstrando a aplicabilidade do método.

Braun Júnior e Santos (2018) avaliaram a correlação entre módulo elástico dinâmico e estático da madeira. Foram analisados 12 corpos de prova Caixeta (*Tabebuia Cassinoides*), 12 corpos de prova Massaranduba (*Manilka spp*) e 12 corpos de prova de Pequiá (*Caryocar villosum*). Os valores de módulo de elasticidade, obtidos por ensaios de vibração transversal, vibração longitudinal e de flexão estática, apresentaram correlação entre 84,89% e 89,63%.

Dentre os diversos aparelhos utilizados para testes de vibração transversal, pode-se destacar o software livre (*FFT analyzer*). As peças podem ser biapoizadas, com a aplicação de um impacto no centro da peça. Com a vibração da peça, é feita a leitura dos valores de peso e frequência, assim como as dimensões da peça e do vão. É utilizado um microfone para captar a vibração da peça. Um exemplo de montagem do ensaio é apresentado na Figura 2.5. O ensaio de vibração longitudinal é realizado de forma semelhante, mas com o sentido do impacto e captação do som na direção longitudinal.

Figura 2.5. Ensaios de vibração transversal



Fonte: Segundinho et al. (2018).

A eficiência da determinação de propriedades mecânicas por meio de ensaios de vibração foram atestadas por diversos autores (BALLARIN, PALMA, 2009; ROSA et al., 2014; TARGA, BALLARIN, BIAGGIONI, 2005; MARTINS, CRUZ, DIAS, 2019; HAINE, LEBAN, HERBE, 1996; CASTELLANOS, 2020; FAYDI et al., 2017); AS et al., 2019). Vale ressaltar que além de boa precisão de tais métodos, o tempo de execução dos ensaios é consideravelmente menor quando comparado ao ensaio de flexão estática, podendo ser 3 a 4 vezes mais rápido (COSSOLINO et al., 2009; BRAUN JÚNIOR e SANTOS, 2018). Com custo dos equipamentos

cada vez mais acessíveis e sem a necessidade de calibrações prévias, ensaios de vibrações têm se tornado uma opção cada vez mais atrativa. As peças podem ser submetidas a vibrações na direção longitudinal e transversal, existindo um modelo teórico para a estimativa das constantes elásticas. Segundinho et al. (2012) recomendam o uso do método que seja mais prático e conveniente em cada situação. Os métodos de vibração são os mais utilizados na identificação de propriedades dos materiais em razão da facilidade de implementação, procedimentos baratos e com equipamentos simples (TAM et al., 2017).

2.4.4 Ensaios Não Destrutivos – Resistógrafo

O resistógrafo vem se tornando uma alternativa cada vez mais presente na estimativa da resistência, do módulo de elasticidade e da densidade da madeira, sendo antes utilizado na avaliação de lenho de árvores. Segundo Lima et al. (2007), o uso tem sido crescente para avaliação de árvores no Brasil. O princípio de funcionamento é simples, uma broca de 3 mm é direcionada na madeira com uma taxa de velocidade, encontrando diferentes resistências (RINN, SCHWEIGRUBER, SCHAR, 1996). O equipamento é ilustrado na Figura 2.6. Com coeficientes R^2 de correlações entre as características físicas e mecânicas da madeira e o IP (Índice de Penetração) são em torno de 80%, como observado por Carrasco, Pereira e Alves (2013).

Figura 2.6. Resistógrafo



Fonte: Imposa et al. (2013).

2.4.5 Considerações Finais

A partir da revisão bibliográfica, observou-se que manifestações patológicas em estruturas de madeira são regularmente acompanhadas de deslocamentos excessivos, que podem prejudicar o desempenho e o tempo de utilização da edificação. Para analisar o comportamento de estruturas de cobertura de madeira, a utilização de modelos numéricos vem aumentando nos últimos anos em razão do custo relativamente inferior aos métodos experimentais. Com isso, a utilização de

modelos numéricos para avaliar o comportamento de estruturas de madeira são uma excelente alternativa em razão do volume de dados gerados e o custo relativamente inferior a uma abordagem experimental.

Ademais, a qualidade do material é um dos componentes mais importantes de uma estrutura, assim como a qualidade de projeto e manutenção. Em razão das características da madeira (material anisotrópico com grande variabilidade de propriedades mecânicas dentro de um mesmo lote), a definição das propriedades físicas e, principalmente, mecânicas com precisão é fundamental para o melhor uso do material. Portanto, a necessidade de técnicas de caracterização desse material é essencial. Os ensaios destrutivos não são indicados em diversas situações (ensaios em campo, por exemplo), tornando os testes não destrutivos uma alternativa na determinação de propriedades físicas e mecânicas, pois são precisos, rápidos e mais baratos em certos casos.

Atualmente, existem diversos métodos alternativos para determinação de propriedades mecânicas da madeira que vêm sendo descobertos e aprimorados nas últimas décadas. Com a disponibilidade de testes que podem ser realizados sem a necessidade de equipamentos robustos e mão de obra especializada possibilita a otimização e maior eficiência na caracterização de elementos de madeira. Com isso, é possível classificar os elementos de madeira, empregando métodos não destrutivos, para determinar propriedades mecânicas dos elementos de madeira (barras de uma treliça, por exemplo).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia para determinar experimentalmente as propriedades mecânicas e físicas das madeiras Angelim Pedra e Angelim Ferro. Além disso, para avaliar o comportamento estrutural de treliças isostáticas de madeira, foram desenvolvidos modelos computacionais de elementos finitos com auxílio do software ABAQUS®. Por fim, é apresentada a metodologia estatística dos resultados de 1260 modelos para avaliar os deslocamentos máximos adotando ora o $E_{c0,m}$ para todas as barras, e ora os valores reais dos módulos de elasticidade aleatoriamente atribuídos nas barras da treliça.

3.1. Caracterização da Madeira

A norma ABNT NBR 7190 (1997) especifica os métodos de caracterização completa, mínima e simplificada para a determinação das propriedades de resistência e rigidez. Para espécies usuais é permitido a caracterização simplificada, obtendo as propriedades mecânicas a partir dos resultados de no mínimo seis corpos de prova por lote de doze metros cúbicos. Para determinar a resistência e rigidez foram realizados ensaios em 100 corpos de prova (50 de compressão e 50 de tração) da espécie Angelim Pedra e em 100 corpos de prova (50 de compressão e 50 de tração) da espécie Angelim Ferro segundo a metodologia para corpos de prova isentos de defeitos apresentada pela norma ABNT NBR 7190 (1997). Todos os ensaios mecânicos descritos a seguir foram realizados com o auxílio da máquina AMSLER com capacidade de 250 kN (Figura 3.1). As peças de madeira foram estocadas no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM), Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, obedecendo todo o procedimento exigido pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997). O teor de umidade apresentado foi próximo a 12% (umidade de equilíbrio para madeiras), e posteriormente escolhidas as amostras e ensaiadas nesse mesmo local.

Figura 3.1. Máquina universal AMSLER



Fonte: Autor.

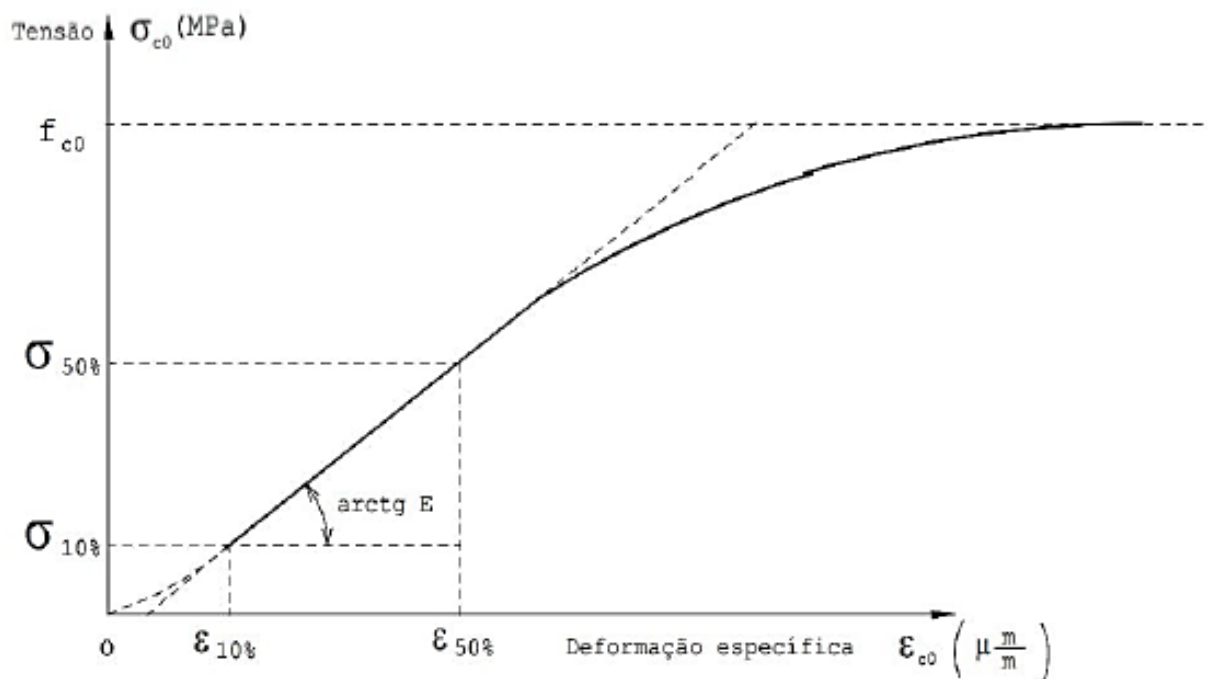
A resistência (f_{c0}) e o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}) foram determinados experimentalmente por meio do ensaio de compressão paralela às fibras. A resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) é definida pela razão entre a máxima força de compressão ($F_{c0,máx}$) obtida do ensaio pela área da seção transversal da amostra, assim como expressa a Equação 3.1.

$$f_{c,0} = \frac{F_{c0,máx}}{Área} \quad (3.1)$$

O módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}) é obtido da inclinação do trecho linear do diagrama tensão \times deformação específica (Figura 3.2), expressa pela Equação 3.2, em que $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ e $\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ representam as tensões e as deformações de compressão correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência f_{c0} medidas no terceiro ciclo de carregamento, equivalentes aos pontos de referência 71 e 85 do diagrama de carregamento mostrado na Figura 3.3.

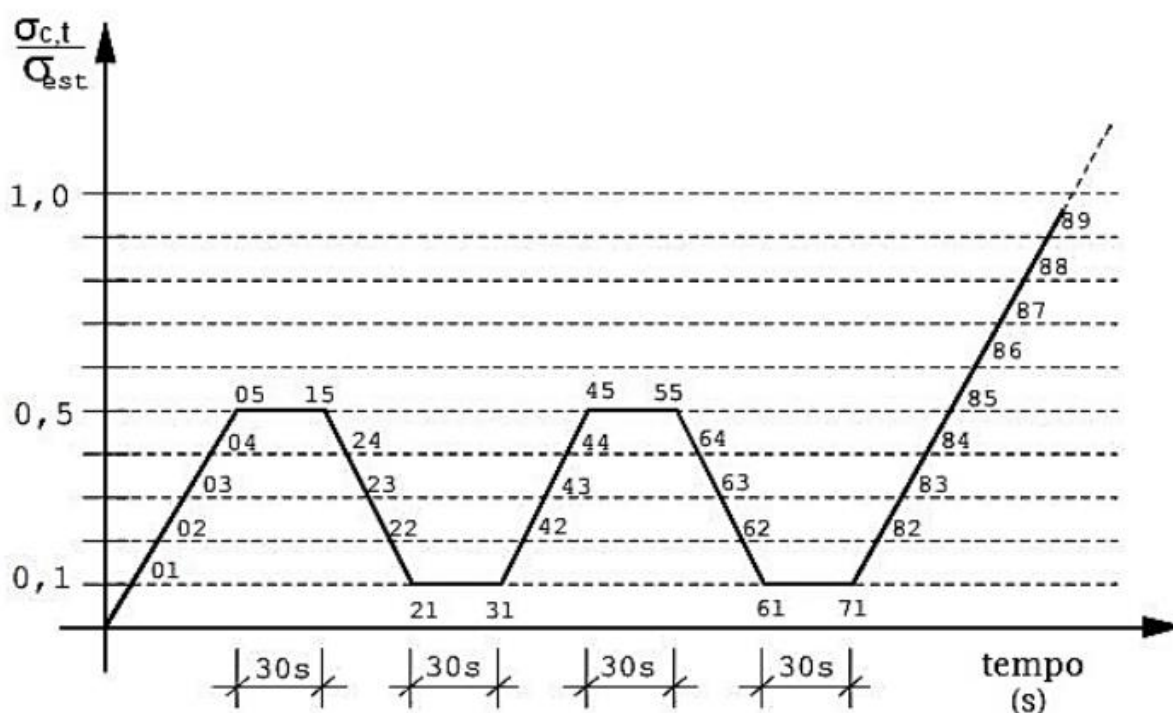
$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (3.2)$$

Figura 3.2. Diagrama tensão x deformação específica para determinação de E_{c0}



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Figura 3.3. Diagrama de carregamento para determinação de E_{c0} e E_{t0}



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

A determinação da resistência e da rigidez à compressão paralela às fibras é realizada utilizando o corpo de prova prismático, de dimensões 5 cm x 5 cm x 15 cm e precisão dimensional de 0,1 mm (Figura 3.4), como preconiza a ABNT NBR 7190 (1997).

Figura 3.4. Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de compressão paralela às fibras



Fonte: Autor.

Para a determinação do E_{c0} foi utilizada a média das deformações de compressão medidas com precisão de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ proveniente de dois relógios comparadores com precisão de 0,001 mm, como preconiza a norma. Os relógios foram fixados em faces opostas utilizando cantoneiras metálicas espaçadas a 100 mm Figura 3.5. A taxa de carregamento aplicada pela máquina de ensaio (Figura 3.6) é de 10 MPa/min. de modo monotônico.

Figura 3.5. Fixação dos relógios comparadores nos corpos de prova de compressão paralela às fibras



Fonte: Autor.

Figura 3.6. Posicionamento do corpo de prova e dos relógios comparadores na máquina de ensaio para o ensaio de compressão paralela às fibras



Fonte: Autor.

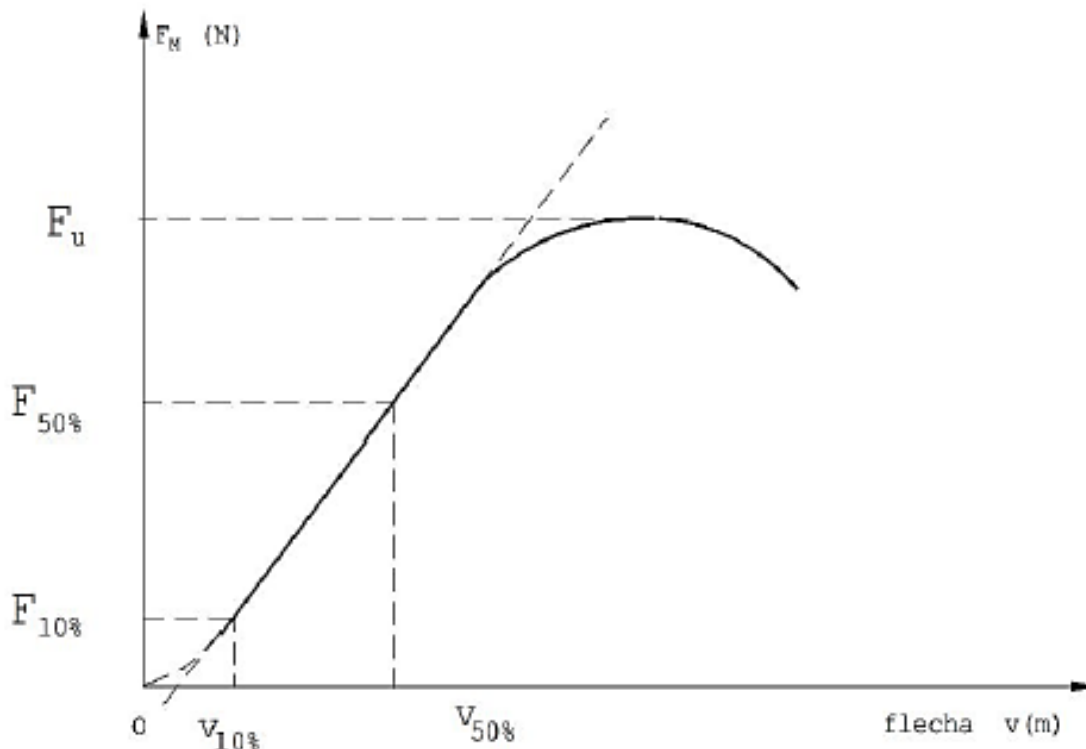
A resistência (f_{t0}) e o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras (E_{t0}) foram determinados experimentalmente por meio do ensaio de tração paralela às fibras. A resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}) é definida pela razão entre a máxima força de tração ($F_{t0,máx}$) obtida do ensaio pela área da seção transversal da amostra, assim como expressa a Equação 3.3.

$$f_{t,0} = \frac{F_{t0,máx}}{\text{Área}} \quad (3.3)$$

O módulo de elasticidade (Equação 3.4) é calculado a partir da inclinação do trecho linear da reta secante à curva tensão x deformação (Figura 3.7), definida pelas coordenadas $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ e $\epsilon_{10\%}$ e $\epsilon_{50\%}$, correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência à tração paralela às fibras.

$$E_{t0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (3.4)$$

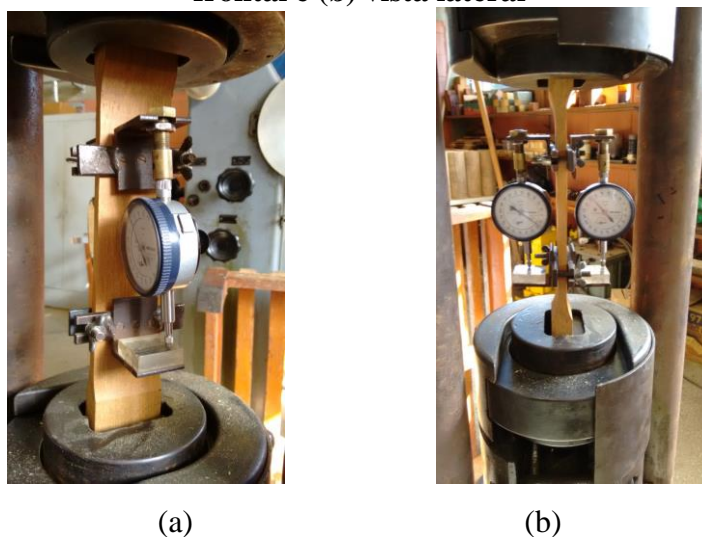
Figura 3.7. Diagrama tensão x deformação específica para determinação de E_{t0}



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Os ensaios de tração paralela às fibras foram realizados com a aplicação de carregamento monotônico crescente, à taxa de 10 MPa/min., adotando corpos de prova de dimensões 5 cm x 2 cm de lado e altura, e 45 cm na direção longitudinal, sendo que no trecho central, ao longo de 21 cm, a seção é reduzida para 5 cm x 0,7 cm de lado. Para a realização do ensaio, fixou-se, em duas faces opostas do corpo de prova (Figura 3.8), dois relógios comparadores com especificações similares aos citados na obtenção do E_{c0} . O módulo de elasticidade à tração paralelas às fibras (E_{t0}), analogamente ao E_{c0} , foi obtida no terceiro ciclo de carregamento do apresentado na Figura 3.3, no qual os pontos 71 e 85, representam, respectivamente, as tensões $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$.

Figura 3.8. Vistas do corpo de prova para o ensaio de tração paralela às fibras, (a) vista frontal e (b) vista lateral



Fonte: Autor.

3.2. Considerações Gerais dos Modelos

Em razão da falta de informações a respeito de manifestações patológicas decorrentes das condições previstas pela ABNT NBR 7190 (1997) para o dimensionamento de estruturas de cobertura de madeira, assim como é proposto por outros documentos normativos, essa pesquisa buscou avaliar a influência da adoção do $E_{c0,m}$ no deslocamento de treliças de madeira. Vale ressaltar que o objetivo foi avaliar o estado limite de serviço, e não todas as etapas de dimensionamento propostas pelo documento normativo. Como o foco desta pesquisa foi avaliar a adoção do mesmo valor de rigidez para todas as barras, as combinações de ações, fatores de modificação de resistência (k_{mod}), dentre outras recomendações para o dimensionamento de peças submetidas à compressão e tração não foram abordadas na pesquisa. Tais medidas poderiam mascarar os resultados, escondendo os reais efeitos da adoção do mesmo módulo de elasticidade para todas as barras. Ademais, não foi o intuito deste trabalho comparar os resultados entre as diferentes tipologias e sim avaliar diversos modelos de treliças para estender as conclusões deste estudo a estruturas de coberturas comumente utilizadas no Brasil, assim como diversos outros países do mundo. As considerações para a definição dos carregamentos, da seção transversal e inclinação das estruturas são apresentados no decorrer do texto.

Como supracitado, as propriedades mecânicas da madeira variam consideravelmente. A ABNT NBR 7190 (1997) preconiza a adoção do $E_{c0,m}$ para todas as barras da treliça. No modelo de referência foram estimados os deslocamentos segundo a ABNT NBR 7190 (1997), a partir de uma análise linear. Tal modelo foi utilizado para definir o carregamento e a seção das barras de cada uma das treliças.

- Modelo de referência (análise linear) com a adoção do $E_{c0,m}$ (média dos valores obtidos experimentalmente) para todas as barras;

Nos demais modelos o valor de rigidez de cada peça foi atribuído aleatoriamente, visando reproduzir as condições usualmente encontradas na montagem de treliças. Além disso, foi implementado o efeito de não linearidades geométricas por apresentar pronunciada influência na capacidade de carga de estruturas esbeltas (SEGNINI, 2000). As seções e carregamentos foram os definidos pelo modelo de referência.

- 20 modelos (análise não linear geométrica) onde o módulo de elasticidade de cada peça foi escolhido aleatoriamente dentre os valores experimentais obtidos.

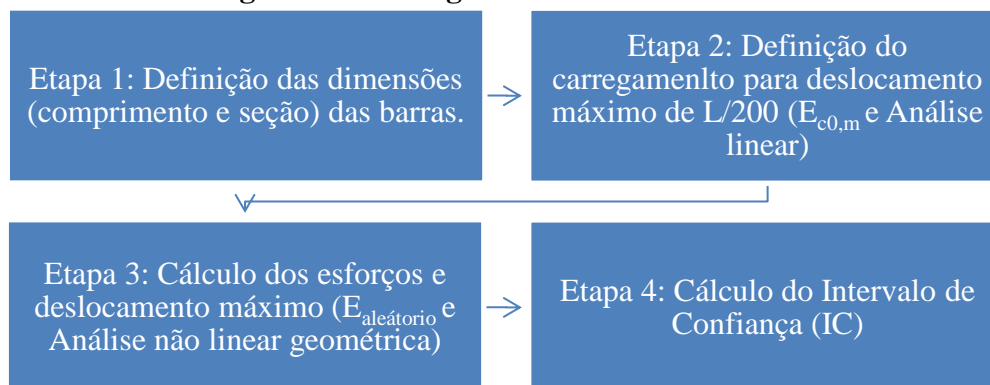
Os valores de deslocamentos foram comparados para avaliar a metodologia proposta pela ABNT NBR 7190 (1997) para o cálculo de deslocamento no estado limite de serviço. Para avaliar os deslocamentos de estruturas de madeiras, foram analisadas 10 tipologias de treliças, 3 vãos e 2 espécies de madeira. Para cada combinação de fatores foram analisadas 21 variações. Um resumo dos fatores avaliados é apresentado Tabela 3.1, totalizando 1260 modelos. Um fluxograma das simulações numéricas é apresentado na Figura 3.9.

Tabela 3.1. Fatores analisados

Tipologias	Pratt, Howe, Fink, Bowstring, Alpendre, Scissors, Banzo Superior Inclinado, Banzos Inclinaados, Banzos Paralelos Horizontais, Treliça tipo K
Vão (metros)	5, 10 e 20
Espécies	Angelim Pedra e Angelim Ferro
Variações por modelo	21 (modelo de referência com $E_{c0,m}$ (valor médio dos valores experimentais) + 20 modelos com $E_{\text{experimentais}}$ atribuídos aleatoriamente)

Fonte: Autor.

Figura 3.9. Fluxograma da análise numérica



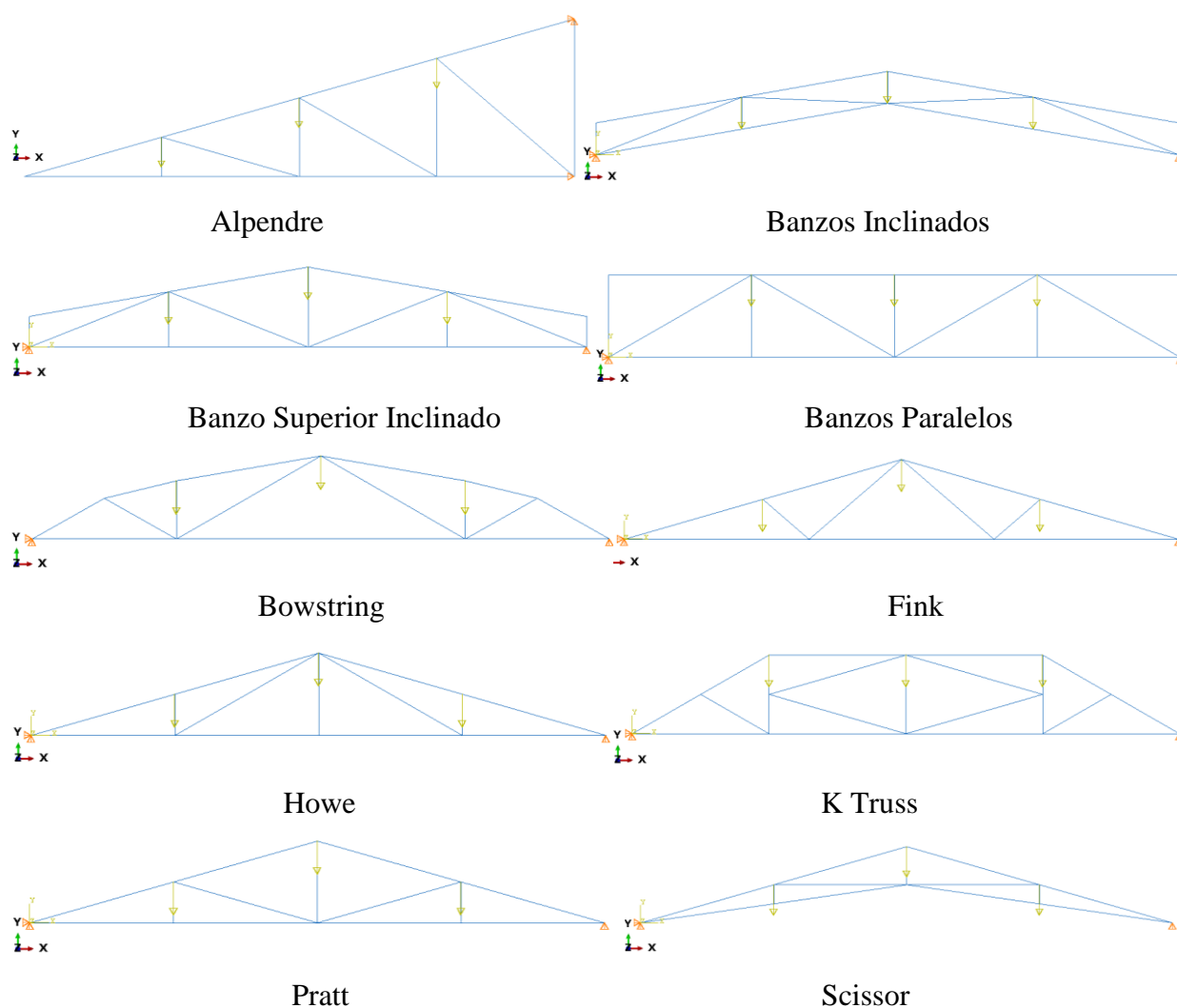
Fonte: Autor.

3.3. Geometria e Carregamento

Existem diversos aspectos normativos utilizados para realizar verificações na estabilidade e segurança da estrutura. No Brasil, as diretrizes para o dimensionamento de estruturas de madeira são fornecidas pela ABNT NBR 7190 (1997). Entretanto, como o objetivo da pesquisa foi analisar a influência da adoção do mesmo módulo de elasticidade para todas as barras, optou-se por não realizar todas as verificações necessárias para o dimensionamento das estruturas.

Para a definição do carregamento, seção transversal das barras e altura da treliça foram definidas considerações a serem seguidas. O carregamento foi definido como 3 cargas pontuais aplicadas em nós da treliça. Um ponto de carregamento é localizado no centro do vão ($L/2$), e o segundo e terceiro pontos foram definidos a distâncias $L/4$ à esquerda e à direita, respectivamente, do centro do vão. A altura máxima dos modelos foi definida como $L/7$, sendo adotada para todos os modelos. Os modelos numéricos são apresentados na Figura 3.10. e

Figura 3.10. Tipologias, pontos de carregamentos e apoios



Fonte: Autor.

Para definir a carga e a seção transversal para cada modelo, a esbeltez (λ) das peças comprimidas, definida pela Equação 3.6, é limitada a 80, admitindo peças medianamente esbeltas. O intuito desta consideração é diminuir os efeitos de instabilidade nas peças. Após a modelagem, foram obtidas todas as medidas das peças da treliça e, a partir da esbeltez máxima, é definida a seção transversal. Visando analisar estritamente a influência da tipologia, do vão e do módulo de elasticidade, a mesma seção transversal é adotada para todas as barras da estrutura, sendo escolhidas seções quadradas com lados múltiplos de 10 mm.

$$\lambda = \frac{L}{r} \quad (3.6)$$

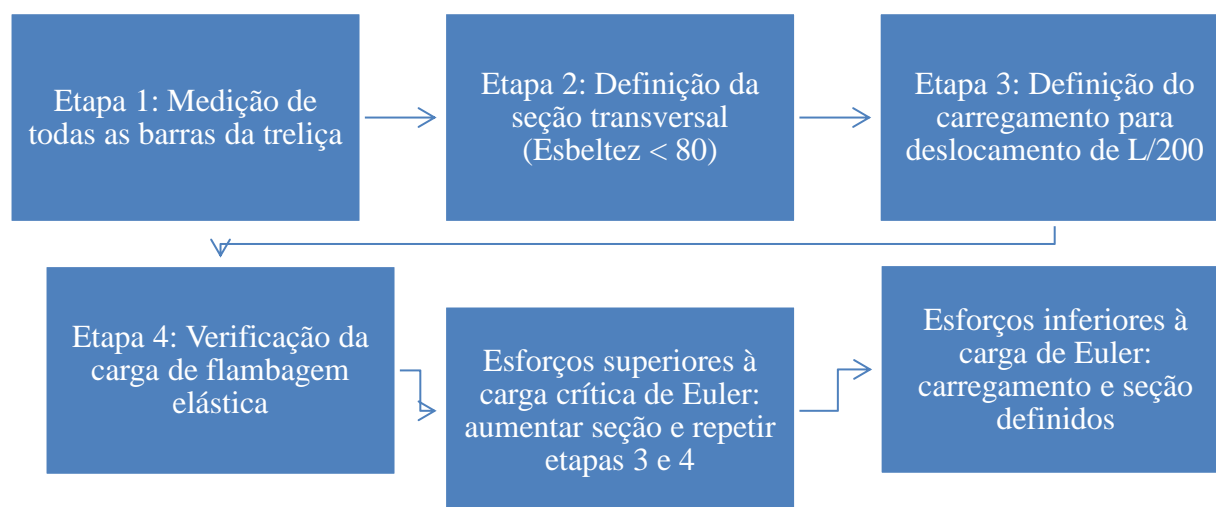
As treliças abordadas no estudo foram consideradas isostáticas. Vale ressaltar que além do deslocamento excessivo, o colapso de um elemento da estrutura causa a ruptura da treliça. Portanto, foi verificado no modelo de referência o esforço em todas as barras submetidas à compressão para garantir que o mesmo seja menor que a carga de flambagem elástica proposto por Euler (Equação 3.5), onde E é referente ao módulo de elasticidade, I ao momento de inércia e L o comprimento da barra.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3.5)$$

Vale ressaltar que os valores de esforços definidos na verificação do estado limite último de instabilidade propostos pela ABNT NBR 7190 (1997) são inferiores aos valores propostos por Euler por considerar possíveis efeitos de segunda ordem e imperfeições do elemento. Entretanto, foi utilizado a carga crítica de Euler como referência pela complexidade de avaliar o valor admissível segundo a normativa para todas as barras comprimidas de todos os modelos propostos.

A partir de uma análise linear do modelo de referência (valor médio E_{c0} atribuído para todas as barras), é definido o carregamento necessário para a estrutura atingir o limite de deslocamento no estado limite de serviço, definido como $L/200$. Após essa etapa, os esforços das barras comprimidas são comparados aos propostos com fórmula de Euler (Equação 3.5). Em caso de alguma barra apresentar esforços superiores à carga crítica de Euler, os lados da seção transversal eram aumentados em 10 mm e um novo carregamento era definido. Caso todas as barras comprimidas apresentem esforços inferiores a formulação de Euler, o modelo referência era definido, sendo o mesmo carregamento e seção dos elementos utilizado em todas as análises subsequentes (não linear geométrica) onde os módulos de elasticidade das barras foram atribuídos aleatoriamente. Um resumo do processo para definição do carregamento e da seção transversal é apresentado na Figura 3.11.

Figura 3.11. Fluxograma para definição do carregamento e da seção transversal



Fonte: Autor.

3.4. Definição das Propriedades Mecânicas das Barras da Treliça

Como metodologia simplificada, a ABNT NBR 7190 (1997) preconiza a adoção do E_{c0m} para todas as barras da treliça para o cálculo do deslocamento máximo no estado limite de serviço. Entretanto, como supracitado, as propriedades físicas e mecânicas da madeira podem apresentar valores consideravelmente diferentes em razão da região de cultivo, processo de secagem transporte e armazenamento. Além disso, a escolha da posição de cada barra da treliça é feita aleatoriamente, onde peças menos resistentes podem ser posicionadas em regiões mais solicitadas. Com isso, os deslocamentos reais da estrutura podem ser superiores aos calculados segundo a normativa, o que pode ocasionar problemas na estrutura.

Em busca de comparar os deslocamentos obtidos pela metodologia proposta pela ABNT NBR 7190 (1997) e uma situação mais próxima da realidade, duas espécies foram caracterizadas (Angelim Pedra e Angelim Ferro). Foram obtidos os valores experimentais de rigidez e resistência por meio de 50 ensaios de tração e 50 ensaios de compressão de cada espécie, totalizando 200 ensaios experimentais. Os valores de rigidez e resistência foram dispostos em uma tabela do Excel, juntamente com o número do corpo de prova (Tabela 3.2). Com base nos valores experimentais, o E_{c0m} foi calculado para cada espécie, o qual foi atribuído a todas as barras da treliça de referência de cada tipologia, assim como preconiza a normativa brasileira. As espécies

de utilizadas são madeiras comerciais onde não foram descritas procedências e idade da madeira, o que aumenta a variabilidade das propriedades do lote avaliado.

Tabela 3.2. Exemplo da disposição das propriedades mecânicas experimentais – Angelim Pedra

Amostra	ρ_{ap} (kg/m³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)
1	730	58	56	12904	13663
2	720	54	83	9342	15321
3	650	66	71	6603	13037
...

Fonte: Autor.

Em busca de avaliar possíveis diferenças nos valores de deslocamentos estimados pela metodologia proposta pela normativa e os valores reais, foi necessário atribuir as propriedades mecânicas das barras da treliça aleatoriamente. Para isso, as barras de cada treliça foram numeradas conforme a quantidade de barras. Posteriormente, foi vinculado uma célula no Excel para cada barra da treliça. Para essa célula foi atribuído arbitrariamente um valor de 1 a 50 utilizando a função “ALEATÓRIOENTRE”, disponível no Excel. Após a definição da amostra adotada para cada barra de cada treliça utilizando a função supracitada, os valores precisam ser fixados por meio da opção “colar valores”, disponível do Excel. Tal medida foi tomada pois a função “ALEATÓRIOENTRE” atualiza seus valores cada vez que ocorre uma alteração em outra célula da tabela. Na sequência as propriedades mecânicas foram atribuídas para cada barra utilizando as funções “SE” e “PROCV”. A primeira função foi utilizada para indicar se a barra estava submetida à compressão ou à tração. A segunda função foi utilizada para retornar o valor do módulo de elasticidade da barra. Parte de uma tabela utilizada na definição da rigidez das barras é apresentada na Tabela 3.3. Tal processo de atribuição visa refletir as condições presentes nas construções, onde a escolha das barras na montagem da treliça é realizada sem nenhuma pré-classificação.

Tabela 3.3. Exemplo da definição das propriedades mecânicas de cada barra – Angelim Pedra

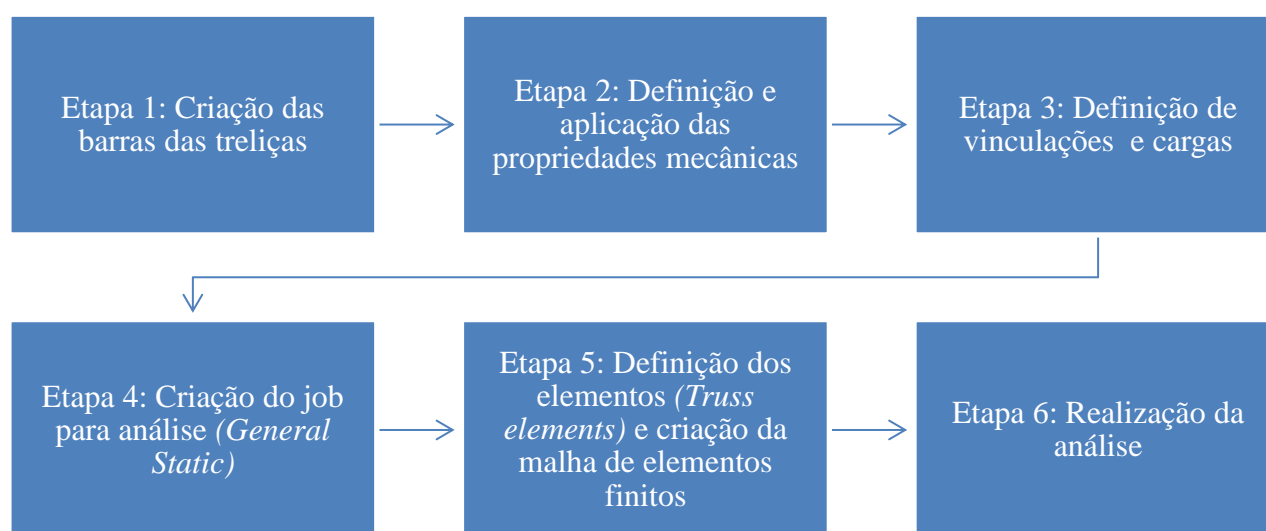
Barra	Amostra	E
1	3	6603
2	1	12168
3	2	9342
...

Fonte: Autor.

3.5. Modelagem Numérica

Em face à dificuldade dos métodos energéticos, analíticos, e ao avanço da computação, surgiram os métodos numéricos para a determinação de esforços e deslocamentos de estruturas. Dentre eles, destaca-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), que consiste em discretizar o domínio contínuo e analisar cada um dos subdomínios individualmente. Em virtude da quantidade de modelos propostos optou-se por uma abordagem numérica. Com essa abordagem é possível obter uma quantidade relevante de dados com custo e tempo consideravelmente inferiores se comparado a outras metodologias. Com o auxílio do software ABAQUS®, fundamentado nos Método dos Elementos Finitos (MEF), foram realizadas as análises dos modelos propostos. A solução de problemas estruturais via Métodos dos Elementos Finitos vem se tornando cada vez mais presente nos trabalhos acadêmicos pelo crescente aprimoramento e avanços das tecnologias computacionais. Com isso, os modelos numéricos têm se tornado uma alternativa ao uso de ensaios experimentais pela não necessidade de equipamentos específicos e mão de obra qualificada. A modelagem numérica de estruturas é dividida em diversas etapas, sendo necessário a entrada de diversos parâmetros e dados, como dimensões dos elementos componentes da estrutura, propriedades mecânicas e físicas, modelos de falha, restrições de deslocamentos e rotações, tipo de análise, dentre diversos outros. Nesta pesquisa, a modelagem da treliça foi dividida em algumas etapas. Um resumo das etapas de modelagem é apresentado na Figura 3.12.

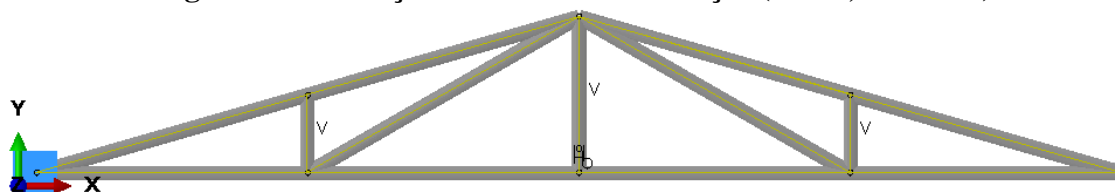
Figura 3.12. Fluxograma de modelagem no ABAQUS®



Fonte: Autor.

A primeira etapa consistiu na criação das barras. Por se tratar de uma treliça plana com carregamento vertical, os elementos foram criados em um espaço bi-dimensional utilizando fios deformáveis (*deformable wire*), disponíveis na biblioteca do software. Os elementos foram conectados nas suas extremidades, sem transmissão de momentos entre as barras, como mostra a Figura 3.13.

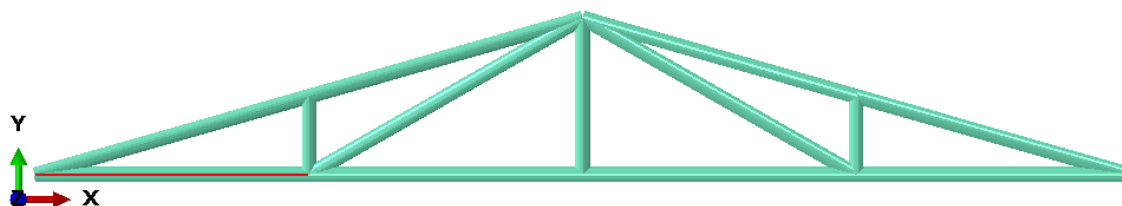
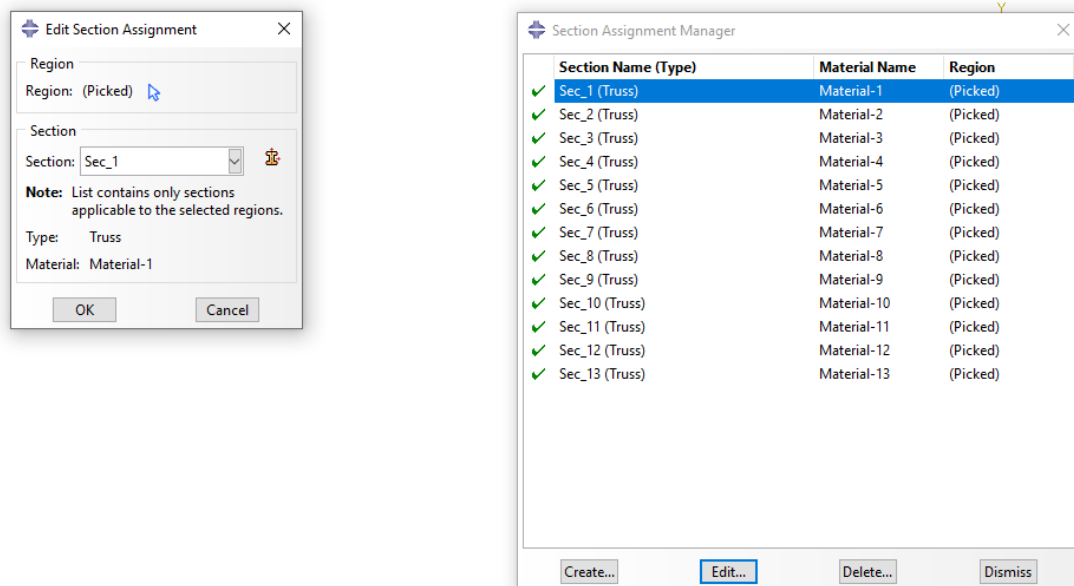
Figura 3.13. Criação das barras das treliças (Howe, 5 metros)



Fonte: Autor.

Na segunda etapa foram definidas e aplicadas as propriedades mecânicas da madeira (f_{c0} , f_{t0} , E_{c0} , E_{t0}) a todas as barras da treliça. A metodologia utilizada para a atribuição das propriedades mecânicas é discutida no Item 3.4. A aplicação das propriedades de cada barra é mostrada na Figura 3.14.

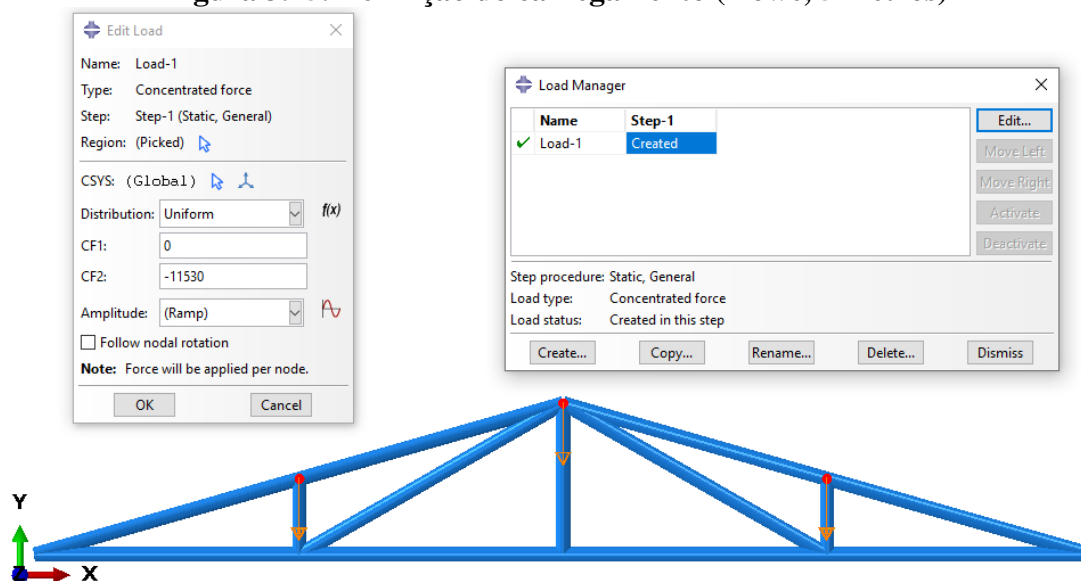
Figura 3.14. Aplicação das propriedades às barras da treliça (Howe, 5 metros)



Fonte: Autor.

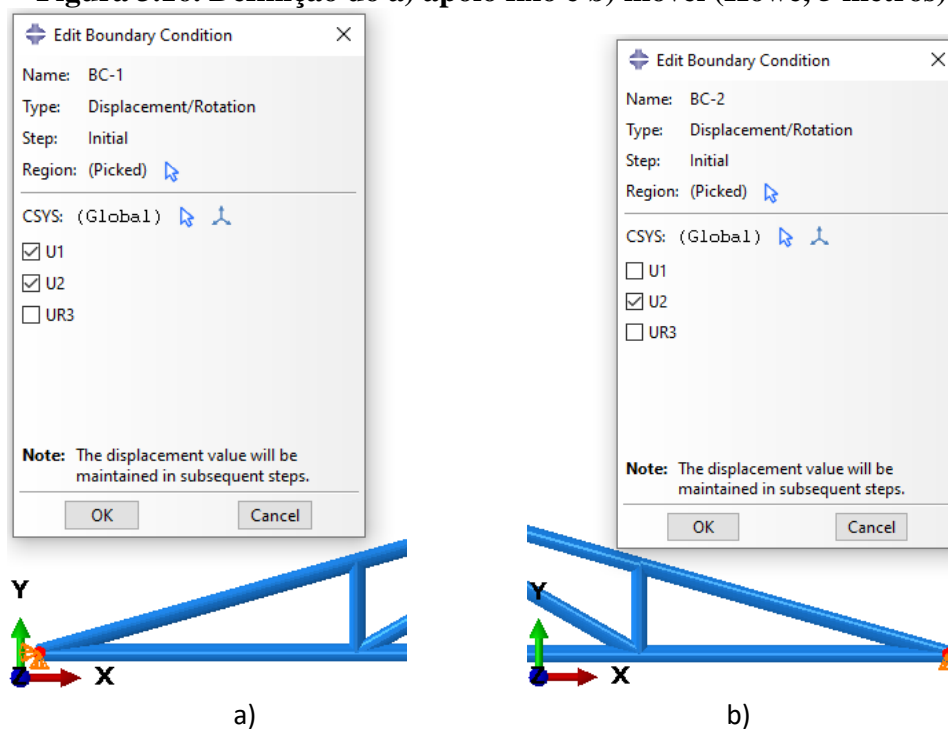
Na terceira etapa foram definidos os pontos de carregamentos e os tipos de apoio da treliça. Todas treliças possuem cargas pontuais aplicadas nos três nós centrais do banzo superior (Figura 3.15). Todas as treliças foram suportadas por dois apoios, sendo um com restrição na horizontal e vertical (Figura 3.16a) e o outro restringindo o movimento na vertical (Figura 3.16b). O ponto vermelho é referente ao ponto de aplicação do carregamento ou restrição de deslocamento.

Figura 3.15. Definição do carregamento (Howe, 5 metros)



Fonte: Autor.

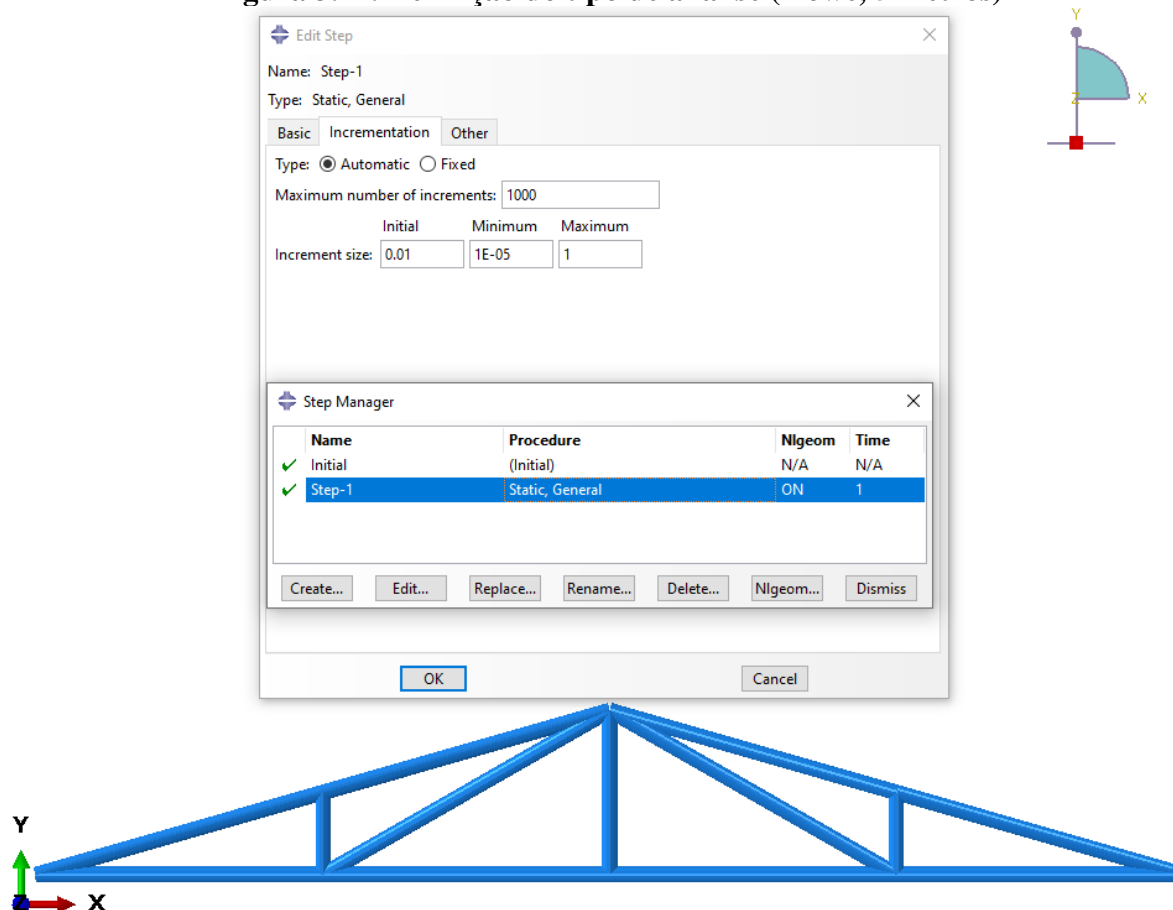
Figura 3.16. Definição do a) apoio fixo e b) móvel (Howe, 5 metros)



Fonte: Autor.

Na quarta etapa foi criado o tipo de análise a ser realizada, sendo em todos os modelos o tipo *general static*, disponível na biblioteca do software. Entretanto, nos modelos de referência ($E_{co,m}$ adotado em todas as barras), não linearidades geométricas não foram consideradas. Nos demais modelos as não linearidades geométricas foram consideradas utilizando a opção *Nlgeom*, disponível na biblioteca do ABAQUS®, como exemplificado na Figura 3.17.

Figura 3.17. Definição do tipo de análise (Howe, 5 metros)

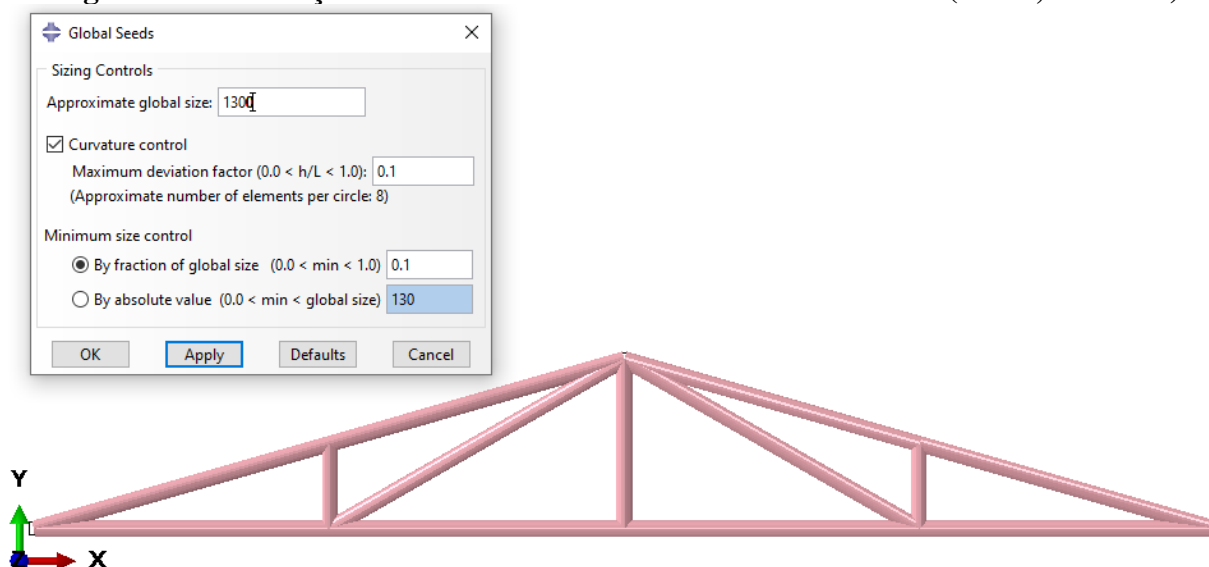


Fonte: Autor.

Na quinta etapa os elementos foram discretizados pela definição da malha e dos elementos finitos a serem utilizados. Como as treliças estudadas foram consideradas como perfeitamente rotuladas e os carregamentos são aplicados nos nós, os esforços foram constantes ao longo de todas as barras. Com isso, cada barra foi discretizada por um elemento T2D2 (elemento de deslocamento linear de dois nós). Em razão dos esforços nas barras da treliça serem constantes por todo o seu comprimento, pode-se adotar como elemento finito a própria barra (Figura 3.18). Por último, foi realizada a análise da estrutura e obtido o valor e o local do deslocamento máximo.

O critério de parada foi definido como sendo a de convergência do modelo adotando o incremento mínimo de 1×10^{-5} . O processo supracitado foi realizado para todas as simulações, ou seja, 1260 vezes.

Figura 3.18. Definição do tamanho da malha de elementos finitos (Howe, 5 metros)



Fonte: Autor.

Segundo Christoforo et al. (2011), a rigidez da ligação é geralmente maior que a dos elementos da treliça. Portanto, no presente trabalho foi considerado que as ligações permanecem íntegras, sendo o colapso da estrutura ocasionado pelas barras.

3.6. Análise Estatística

A análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de significância e com auxílio do software Minitab® versão 18, foi utilizada para verificar a equivalência entre os módulos de elasticidade obtidos dos ensaios de tração (E_{t0}) e compressão (E_{c0}) na direção paralela às fibras da madeira estabelecida pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997). Mesmo as barras das treliças simuladas estarem sendo solicitadas por forças de tração e de compressão, a equivalência entre E_{t0} e E_{c0} possibilitará o uso do valor médio do módulo de elasticidade à tração ou à compressão na direção paralela às fibras para todas as barras.

Da ANOVA, P-valor igual ou superior ao nível de significância implica que as médias dos valores dos E_{t0} e E_{c0} são equivalentes, e não equivalentes em caso contrário (P-valor < 0,05). A normalidade e a homogeneidade de variâncias dos resíduos da ANOVA (validação das premissas) foram avaliadas com o auxílio do teste de Anderson-Darling e de comparações múltiplas, respectivamente, ambos também ao nível de 5% de significância. P-valor igual ou superior a 0,05

implica em se aceitar a normalidade e a homogeneidade das variâncias entre os resíduos, o que valida os resultados da ANOVA. Cabe ressaltar que foram analisados 50 ensaios de compressão paralela às fibras e 50 ensaios de tração paralela às fibras para cada uma das duas espécies, totalizando 200 ensaios.

A partir dos valores das flechas obtidos pelas simulações, foi elaborado o Intervalo de Confiança da média (ao nível de 95% de confiabilidade), buscando estabelecer a margem de incerteza dos valores de deslocamentos obtidos. A metodologia apresentada possibilita verificar se as flechas obtidas adotando $E_{c0,m}$ para todas as barras pertencem ou não aos intervalos obtidos. Desta forma, é possível analisar se o método preconizado pela norma pode gerar deslocamentos excessivos na estrutura, potencializando o aparecimento de manifestações patológicas. Além disso, a metodologia possibilitou avaliar a influência da metodologia preconizada pela normativa na instabilidade local da estrutura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram divididos e discutidos em subitens. O primeiro apresenta os valores da densidade aparente (a 12% de umidade), as resistências à compressão e tração paralela às fibras, assim como os módulos de elasticidade à compressão e tração paralela às fibras. Os valores encontrados são comparados com pesquisas disponíveis na literatura e com valores propostos pela ABNT NBR 7190 (1997). Em seguida, são apresentados e discutidos os valores de deslocamentos máximos e esforços solicitantes das barras comprimidas dos modelos de treliça propostos, sendo comparados com o valor limite ($L/200$) e carga de Euler, respectivamente.

4.1. Propriedades da Madeira

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores médios (X_m), os coeficientes de variação (CV) e os menores (Mín.) e os maiores (Máx.) das propriedades investigadas na caracterização das duas espécies de madeira consideradas na presente pesquisa. As propriedades da madeira que são apresentadas são:

- ρ_{ap} - densidade aparente;
- f_{c0} - resistência à compressão na direção paralela às fibras;
- f_{t0} - resistência à tração na direção paralela às fibras;
- E_{c0} - módulo de elasticidade à compressão na direção paralela às fibras;
- E_{t0} - módulo de elasticidade à tração na direção paralela às fibras.

Os valores obtidos experimentalmente foram comparados com valores disponíveis na literatura, como mostrado nas Tabelas 4.2 e 4.3. Pelos valores encontrados na literatura foi possível afirmar que os dados encontrados neste trabalho foram consistentes. Ademais, observou-se alta variação nos valores de rigidez das peças, com amostras com os valores mínimos de 6603 MPa e 13135 MPa para Angelim Pedra e Angelim Ferro, respectivamente. Tais valores foram consideravelmente inferiores aos valores médios do lote. Processos de cultivo, secagem, armazenamento, assim como origem das peças podem contribuir para a heterogeneidade dos valores amostrais. Vale ressaltar que se utilizou corpos de provas isentos de defeitos e, portanto, os valores de rigidez das peças podem ser inferiores. Por fim, as madeiras utilizadas são comerciais, sem rastreabilidade de procedência ou idade, situação comum no Brasil. Com isso, peças de diferentes idades e cortes podem ser vendidas como um mesmo lote, o que pode aumentar a variabilidade das propriedades físicas e mecânicas.

Tabela 4.1. Resultados das propriedades referentes às espécies de madeira consideradas

Propriedades	Angelim Pedra				
	ρ_{ap} (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)
X_m	660	54,78	73,64	11516	11709
CV (%)	6,87	15,83	25,80	18,41	22,28
Mín.	590	38,12	34,61	6603	6975
Máx.	800	81,25	109,07	14831	13258
f_{wk} (MPa)	-----	39,40	47,18	-----	-----

Propriedades	Angelim Ferro				
	ρ_{ap} (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)
X_m	1160	79,24	110,58	20648	19586
CV (%)	4,09	12,83	23,09	16,16	19,72
Mín.	1040	53,00	87,00	13135	11011
Máx.	1290	97,00	147,00	23238	22354
f_{wk} (MPa)	-----	58,72	74,26	-----	-----

Fonte: Autor.

Tabela 4.2. Resultados das propriedades obtidas por diferentes autores – Angelim Pedra

Autores	ρ_{ap} (12%) (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)
Presente estudo	660	54,8	73,6	11516	11709
ABNT NBR 7190 (1997)	694	59,8	75,5	12912	-----
Christoforo et al. (2020a)	690	-----	-----	-----	-----
Christoforo et al. (2020b)	-----	59,2	-----	-----	-----
Dias et al. (2019)	730	65,5	-----	-----	-----
Grobério (2000)	690	65,5	78,0	14304	12467
Instituto de Pesquisa Tecnológicas (1981)	710	52,3	-----	-----	-----
Dias (2000)	-----	58,0	70,5	11990	11096

Fonte: Autor.

Tabela 4.3. Resultados das propriedades obtidas por diferentes autores – Angelim Ferro

Autores	ρ_{ap} (12%) (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)
Presente estudo	1160	79,2	110,6	20648	19586
ABNT NBR 7190 (1997)	1170	79,5	117,8	20827	-----
Christoforo et al. (2020a)	1170	-----	-----	-----	-----
Christoforo et al. (2020b)	-----	79,5	-----	-----	-----
Dias et al. (2019)	1160	-----	-----	-----	-----
Grobério (2000)	1170	79,1	117,9	20946	19788
Instituto de Pesquisa Tecnológicas (1981)	1170	79,5	117,8	20827	-----
Dias (2000)	-----	81,2	115,1	21263	19750

Fonte: Autor.

Os coeficientes de variação das propriedades de resistência (f_{c0} e f_{t0}) foram ambos inferiores ao valor de referência preconizado pela norma Brasileira ABNT NBR 7190 (1997) [28% para solicitações tangenciais]. Nota-se que as propriedades mecânicas da madeira de Angelim Ferro foram superiores as da madeira de Angelim Pedra, fato esse que também (além de características anatômicas, etc) pode ser explicado pela grande diferença entre as densidades

(Christoforo et al., 2020b). A densidade aparente da madeira de Angelim Ferro é aproximadamente 1,75 vezes o valor da densidade aparente da madeira de Angelim Pedra.

Da Tabela 4.1, segundo a norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), constata-se que a madeira de Angelim Pedra e Angelim Ferro pertencem às classes de resistência C30 e C40, respectivamente. Dias (2000) e Dias e Lahr (2004) classificaram as espécies Angelim Pedra e Angelim Ferro, respectivamente, como C40 e C60. Sales (2004) agrupou as classes Angelim Pedra e Angelim Ferro como C40 e C50, respectivamente. As classes obtidas neste trabalho foram próximas a trabalhos relatados na literatura.

As relações entre as resistências características à tração e a compressão encontradas para as madeiras de Angelim Pedra e Angelim Ferro foram iguais a $f_{c0} = 0,74 \cdot f_{t0}$ e $f_{c0} = 0,72 \cdot f_{t0}$, respectivamente, estando em conformidade com a relação $f_{c0} = 0,77 \cdot f_{t0}$ da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), o que evidencia a boa precisão da equação proposta para a estimativa da resistência característica à tração na direção paralela às fibras.

As Tabela 4.4 e Tabela 4.5 apresentam os resultados da análise de variância (ANOVA – 5% significância) efetuada com o objetivo de verificar a equivalência dos módulos de elasticidade obtidos dos ensaios de compressão (E_{c0}) e de tração (E_{t0}) na direção paralela às fibras estabelecida pela norma Brasileira ABNT NBR 7190 (1997) para as madeiras de Angelim Pedra e Angelim Ferro, respectivamente, e nas Figuras 4.1 e 4.2 são apresentados os resultados dos testes de validação da ANOVA (normalidade e homogeneidade da variância dos resíduos).

Tabela 4.4. Resultados da ANOVA para a comparação entre E_{c0} e E_{t0} - Angelim Pedra

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Solicitação	1	926984	926984	0,20	0,654
Erro	98	450413981	4596061		
Total	99	451340965			

Fonte: Autor.

GL – graus de liberdade; SQ – soma dos quadrados; QM: média dos quadrados; valor F – estatística F; valor P – estatística P.

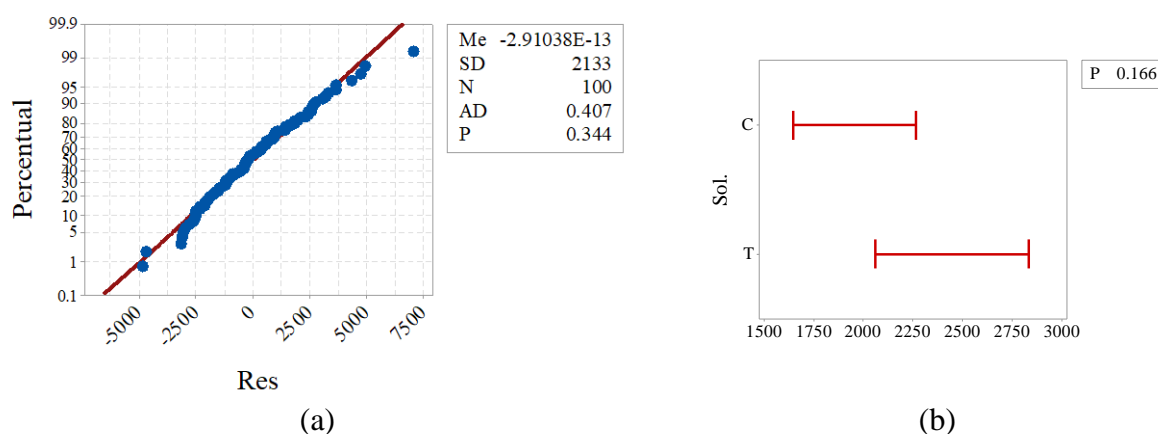
Tabela 4.5. Resultados da ANOVA para a comparação entre E_{c0} e E_{t0} - Angelim Ferro

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Solicitação	1	28200348	28200348	2,36	0,128
Erro	98	1172199977	11961224		
Total	99	1200400325			

Fonte: Autor.

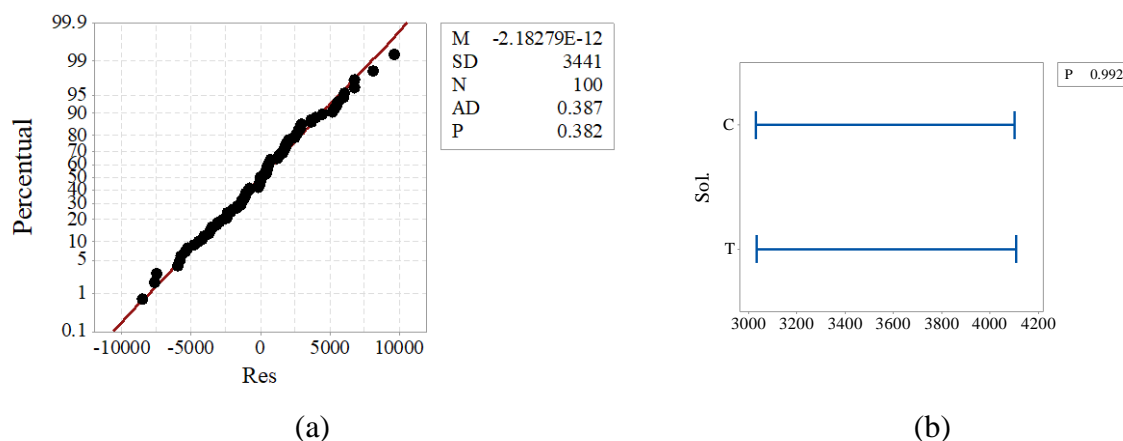
GL – graus de liberdade; SQ – soma dos quadrados; QM: média dos quadrados; valor F – estatística F; valor P – estatística P.

Figura 4.1. Resultados dos testes de normalidade (a) e de homogeneidade de variâncias (b) dos resíduos referente a comparação dos módulos de elasticidade E_{c0} e E_{t0} - Angelim Pedra



Fonte: Autor.

Figura 4.2. Resultados dos testes de normalidade (a) e de homogeneidade de variâncias (b) dos resíduos referente a comparação dos módulos de elasticidade E_{c0} e E_{t0} - Angelim Ferro



Fonte: Autor.

Das Tabelas 4.4 e Tabela 4.5, constata-se a equivalência dos módulos de elasticidade E_{c0} e E_{t0} para ambas as espécies de madeira, resultado esse em conformidade com o estabelecido pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997). Das Figura 4.1 e 4.2, por serem P-valores superiores ao nível de significância adotado (5%), constata-se a normalidade e homogeneidade da variância dos resíduos, o que valida os resultados da ANOVA apresentados nas Tabelas 4.4 e Tabela 4.5.

4.2. Carregamentos e Seções Transversais

Nas Tabelas 4.6 a 4.11 são apresentadas as seções transversais das barras e o carregamento total de cada modelo. Os valores foram definidos pelos modelos de referência, sendo a mesma seção e carregamento adotado para todas as demais 20 variações. Tais valores foram obtidos adotando a metodologia apresentada no Item 3.3. Os modelos apresentaram valores de seção transversal diferentes entre si para atender as condições definidas pela metodologia supracitada.

Vale ressaltar que os valores de deslocamento que foram comparados neste trabalho são da mesma tipologia e vão e, portanto, apresentavam as mesmas dimensões da seção transversal. As diferentes seções e carregamentos foram obtidos segundo o critério adotado nesta pesquisa e não em razão de determinada tipologia apresentar maior ou menor capacidade de carga ou deslocamento.

Tabela 4.6. Resultados das seções e carregamentos obtidos para as treliças planas com vão de 5 m – Angelim Pedra

Tip.	Seção transversal (mm)	Carregamento total (kN)
Alpendre	80 x 80	74,10
Banzo Inc.	60 x 60	12,24
Banzo Par	60 x 60	108,00
Banzo Sup.	70 x 70	77,55
Bowstring	70 x 70	94,80
Fink	60 x 60	35,25
Howe	60 x 60	34,59
K Truss	70 x 70	138,00
Pratt	60 x 60	34,95
Scissor	60 x 60	8,55

Fonte: Autor.

Tabela 4.7. Resultados das seções e carregamentos obtidos para as treliças planas com vão de 5 m – Angelim Ferro

Tip.	Seção transversal (mm)	Carregamento total (kN)
Alpendre	80 x 80	132,90
Banzo Inc.	60 x 60	21,96
Banzo Par	60 x 60	193,50
Banzo Sup.	70 x 70	139,05
Bowstring	70 x 70	170,40
Fink	60 x 60	63,30
Howe	60 x 60	58,50
K Truss	70 x 70	247,50
Pratt	60 x 60	61,50
Scissor	60 x 60	15,33

Fonte: Autor.

Tabela 4.8. Resultados das seções e carregamentos obtidos para as treliças planas com vão de 10 m – Angelim Pedra

Tip.	Seção transversal (mm)	Carregamento total (kN)
Alpendre	150 x 150	260,85
Banzo Inc.	120 x 120	48,90
Banzo Par	120 x 120	317,40
Banzo Sup.	130 x 130	267,60
Bowstring	130 x 130	327,00
Fink	120 x 120	141,00
Howe	120 x 120	138,30
K Truss	130 x 130	476,10
Pratt	120 x 120	138,75
Scissor	120 x 120	34,20

Fonte: Autor.

Tabela 4.9. Resultados das seções e carregamentos obtidos para as treliças planas com vão de 10 m – Angelim Ferro

Tip.	Seção transversal (mm)	Carregamento total (kN)
Alpendre	150 x 150	467,70
Banzo Inc.	120 x 120	89,10
Banzo Par	120 x 120	774,00
Banzo Sup.	130 x 130	467,60
Bowstring	130 x 130	587,70
Fink	120 x 120	253,20
Howe	120 x 120	248,40
K Truss	130 x 130	854,40
Pratt	120 x 120	248,40
Scissor	120 x 120	61,35

Fonte: Autor.

Tabela 4.10. Resultados das seções e carregamentos obtidos para as treliças planas com vão de 20 m – Angelim Pedra

Tip.	Seção transversal (mm)	Carregamento total (kN)
Alpendre	290 x 290	975,00
Banzo Inc.	240 x 240	195,60
Banzo Par	280 x 280	1731,00
Banzo Sup.	260 x 260	1068,00
Bowstring	260 x 260	1320,00
Fink	230 x 230	519,00
Howe	230 x 230	509,70
K Truss	260 x 260	1905,00
Pratt	230 x 230	509,70
Scissor	230 x 230	126,00

Fonte: Autor.

Tabela 4.11. Resultados das seções e carregamentos obtidos para as treliças planas com vão de 20 m – Angelim Ferro

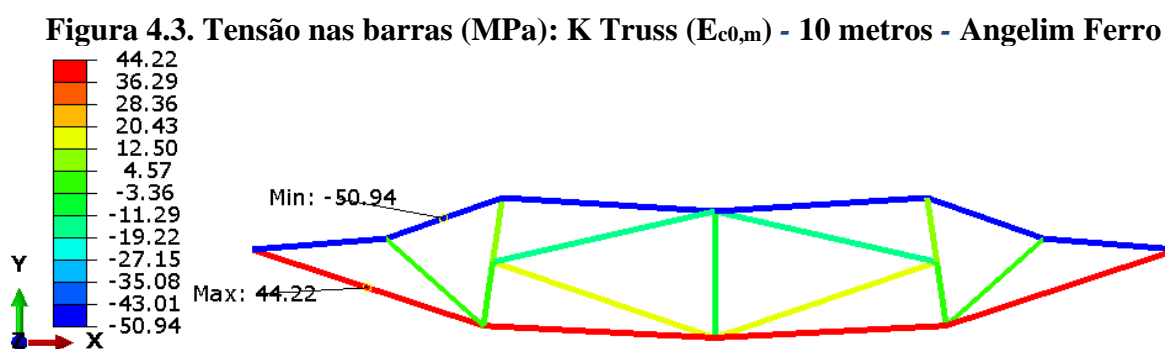
Tip.	Seção transversal (mm)	Carregamento total (kN)
Alpendre	290 x 290	1748,10
Banzo Inc.	240 x 240	350,70
Banzo Par	280 x 280	3103,70
Banzo Sup.	260 x 260	1914,00
Bowstring	260 x 260	2367,00
Fink	230 x 230	930,00
Howe	230 x 230	913,50
K Truss	260 x 260	34158,70
Pratt	230 x 230	914,10
Scissor	230 x 230	226,20

Fonte: Autor.

Pode se observar notável diferença na capacidade portante de cada tipologia. Os valores supracitados foram adotados para o modelo de referência (E_{com} adotado em todas as barras) e todos os modelos onde as propriedades mecânicas foram atribuídas aleatoriamente, totalizando

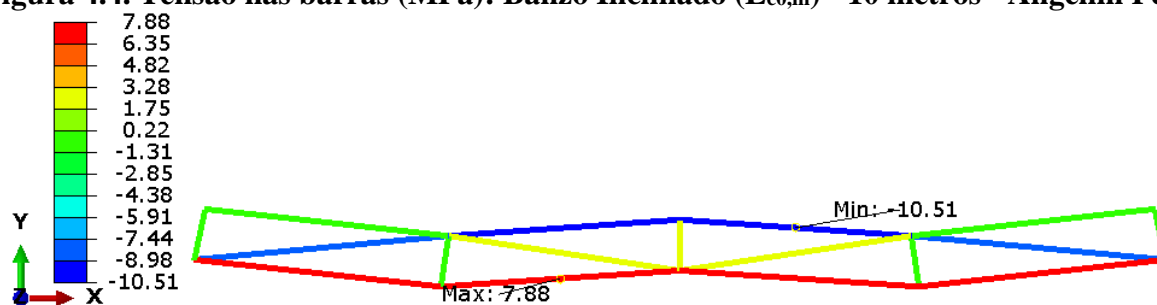
21 modelos para cada combinação (1 modelo de referência + 20 variações na rigidez das barras). Dessa forma foi possível avaliar a diferença de deslocamentos obtidos segundo a ABNT NBR 7190 (1997) e uma metodologia mais próxima da situação real da montagem de uma treliça (peças com diferentes propriedades mecânicas entre si).

As Tabelas 4.12 a 4.17 apresentam a tensão na barra mais comprimida e mais tracionada em cada um dos modelos de referência, assim como a porcentagem de uso da resistência média obtida pelos ensaios experimentais. A tipologia K Truss apresentou os maiores valores de tensão nas barras comprimidas e tracionadas, a tipologia com os Banzos Inclinados apresentou os menores valores de tração e a tipologia Scissor os menores valores de compressão. Vale observar que a tipologia K Truss apresentou os maiores carregamentos e as tipologias Banzos Inclinados e Scissor apresentaram os menores carregamentos. Além disso, os valores máximos de solicitação à compressão ficaram entre 15,49% e 50,90% para Angelim Pedra e 20,07% e 65,95% (Figura 4.3) para Angelim Ferro. Os valores para as barras submetidas à tração foram entre 11,00% (Figura 4.4) e 34,41% e entre 12,22% e 38,26% para Angelim Pedra e Angelim Ferro, respectivamente. Os resultados mostraram que para o carregamento crítico (L/200: deslocamento máximo para atender o estado limite de serviço), as tensões solicitantes foram consideravelmente inferiores à resistência média obtida experimentalmente para cada espécie. Tais resultados indicam que as barras foram submetidas a tensões do regime elástico da madeira. De acordo com Kingston e Budgen (1972), Keith (1972) e Tabiei e Wu (2000), tais resultados indicam que as não linearidades físicas não apresentam efeitos consideráveis na capacidade de carga e deslocamento dos modelos avaliados de acordo com trabalhos disponíveis na literatura.



Fonte: Autor.

Figura 4.4. Tensão nas barras (MPa): Banzo Inclinado ($E_{c0,m}$) - 10 metros - Angelim Pedra



Fonte: Autor.

Tabela 4.12. Maiores valores de compressão e tração para as treliças planas com vão de 5 m – Angelim Pedra ($F_{c0} = 55,78$ MPa; $f_{t0} = 71,64$ MPa)

Tip.	Peça mais comprimida (Mpa)	Uso da resistência máxima (%)	Peça mais tracionada (Mpa)	Uso da resistência máxima (%)
Alpendre	13,5	24,20	21,07	29,41
Banzo Inc.	10,52	18,86	7,89	<u>11,01</u>
Banzo Par	25,72	46,11	19,29	26,93
Banzo Sup.	21,53	38,60	20,03	27,96
Bowstring	24,87	44,59	22,57	31,50
Fink	17,82	31,95	17,14	23,93
Howe	17,49	31,36	16,81	23,46
K Truss	28,38	<u>50,88</u>	24,64	<u>34,39</u>
Pratt	17,43	31,25	16,77	23,41
Scissor	8,645	<u>15,50</u>	8,397	11,72

Fonte: Autor.

Tabela 4.13. Maiores valores de compressão e tração para as treliças planas com vão de 5 m – Angelim Ferro ($F_{c0} = 77,24$ MPa; $f_{t0} = 115,58$ MPa)

Tip.	Peça mais comprimida (Mpa)	Uso da resistência máxima (%)	Peça mais tracionada (Mpa)	Uso da resistência máxima (%)
Alpendre	24,22	31,36	37,78	32,69
Banzo Inc.	18,87	24,43	14,16	<u>12,25</u>
Banzo Par	46,07	59,65	34,55	29,89
Banzo Sup.	38,61	49,99	35,91	31,07
Bowstring	44,70	57,87	40,57	35,10
Fink	32,00	41,43	30,77	26,62
Howe	31,38	40,63	30,17	26,10
K Truss	50,90	<u>65,90</u>	44,20	<u>38,24</u>
Pratt	31,27	40,48	30,08	26,03
Scissor	15,50	<u>20,07</u>	15,06	13,03

Fonte: Autor.

Tabela 4.14. Maiores valores de compressão e tração para as treliças planas com vão de 10 m – Angelim Pedra ($F_{c0} = 55,78$ MPa; $f_{t0} = 71,64$ MPa)

Tip.	Peça mais comprimida (Mpa)	Uso da resistência máxima (%)	Peça mais tracionada (Mpa)	Uso da resistência máxima (%)
Alpendre	13,52	24,24	21,1	29,45
Banzo Inc.	10,51	18,84	7,88	<u>11,00</u>
Banzo Par	25,71	46,09	19,28	26,91
Banzo Sup.	21,54	38,62	20,03	27,96
Bowstring	24,87	44,59	22,57	31,50
Fink	17,82	31,95	17,13	23,91
Howe	17,48	31,34	16,8	23,45
K Truss	28,38	<u>50,88</u>	24,64	<u>34,39</u>
Pratt	17,53	31,43	16,86	23,53
Scissor	8,643	<u>15,49</u>	8,394	11,72

Fonte: Autor.

Tabela 4.15. Maiores valores de compressão e tração para as treliças planas com vão de 10 m – Angelim Ferro ($F_{c0} = 77,24$ MPa; $f_{t0} = 115,58$ MPa)

Tip.	Peça mais comprimida (Mpa)	Uso da resistência máxima (%)	Peça mais tracionada (Mpa)	Uso da resistência máxima (%)
Alpendre	24,25	31,40	37,83	32,73
Banzo Inc.	18,82	24,37	14,12	<u>12,22</u>
Banzo Par	46,06	59,63	34,54	29,88
Banzo Sup.	37,65	48,74	35,01	30,29
Bowstring	44,70	57,87	40,56	35,09
Fink	31,99	41,42	30,76	26,61
Howe	31,39	40,64	30,18	26,11
K Truss	50,94	<u>65,95</u>	44,22	<u>38,26</u>
Pratt	31,29	40,51	30,33	26,24
Scissor	15,55	<u>20,13</u>	15,06	13,03

Fonte: Autor.

Tabela 4.16. Maiores valores de compressão e tração para as treliças planas com vão de 20 m – Angelim Pedra ($F_{c0} = 55,78$ MPa; $f_{t0} = 71,64$ MPa)

Tip.	Peça mais comprimida (Mpa)	Uso da resistência máxima (%)	Peça mais tracionada (Mpa)	Uso da resistência máxima (%)
Alpendre	13,52	24,24	21,09	29,44
Banzo Inc.	10,51	18,84	7,88	<u>11,00</u>
Banzo Par	25,75	46,16	19,31	26,95
Banzo Sup.	21,49	38,53	19,99	27,90
Bowstring	25,10	45,00	22,77	31,78
Fink	17,85	32,00	17,16	23,95
Howe	17,53	31,43	16,86	23,53
K Truss	28,39	<u>50,90</u>	24,65	<u>34,41</u>
Pratt	17,53	31,43	16,86	23,53
Scissor	8,668	<u>15,54</u>	8,419	11,75

Fonte: Autor.

Tabela 4.17. Maiores valores de compressão e tração para as treliças planas com vão de 20 m – Angelim Ferro ($F_{c0} = 77,24$ MPa; $f_{t0} = 115,58$ MPa)

Tip.	Peça mais comprimida (Mpa)	Uso da resistência máxima (%)	Peça mais tracionada (Mpa)	Uso da resistência máxima (%)
Alpendre	24,24	31,38	37,82	32,72
Banzo Inc.	18,84	24,39	14,13	<u>12,23</u>
Banzo Par	49,17	63,66	34,64	29,97
Banzo Sup.	38,54	49,90	35,85	31,02
Bowstring	44,69	57,86	40,55	35,08
Fink	31,99	41,42	30,76	26,61
Howe	31,42	40,68	30,21	26,14
K Truss	50,91	<u>65,91</u>	44,20	<u>38,24</u>
Pratt	31,44	40,70	30,23	26,16
Scissor	15,56	<u>20,15</u>	15,11	13,07

Fonte: Autor.

4.3. Resultados das simulações

Nas Tabelas de 4.18 a 4.23 são apresentados os valores médios (X_m), os desvios-padrões (DP), os menores (Mín.) e os maiores (Max.) valores, assim como o intervalo de confiança da média (IC – 95% de confiabilidade) dos deslocamentos máximos nas estruturas simuladas (10 tipologias) considerando as propriedades mecânicas das duas espécies de madeira (Angelim Pedra e Angelim Ferro) para os três vãos avaliados (5, 10 e 20 metros).

Tabela 4.18. Deslocamentos das treliças planas com vão de 5 m – Angelim Pedra

Tip.	L/200	X_m (mm)	DP (mm)	Mín (mm)	Máx (mm)	IC (95%)
Alpendre	25,00	<u>25,18</u>	1,59	23,5	26,9	(23,59; 26,76)
Banzo Inc.	25,00	<u>26,52</u>	1,33	24,3	27,9	(24,93; 28,10)
Banzo Par	25,00	<u>26,04</u>	1,23	24,0	27,3	(24,45; 27,62)
Banzo Sup.	25,00	<u>26,02</u>	1,06	24,9	27,1	(24,42; 27,60)
Bowstring	25,00	<u>26,46</u>	2,23	24,3	29,8	(24,87; 28,04)
Fink	25,00	<u>26,86</u>	1,19	25,4	28,7	(25,27; 28,44)
Howe	25,00	<u>27,74</u>	3,08	23,4	30,5	(26,15; 29,33)
K Truss	25,00	<u>25,32</u>	0,76	24,2	26,2	(23,73; 26,90)
Pratt	25,00	<u>26,00</u>	2,33	23,3	29,1	(24,41; 27,59)
Scissor	25,00	<u>27,36</u>	1,45	25,9	28,9	(25,77; 28,94)

Fonte: Autor.

Tabela 4.19. Deslocamentos das treliças planas com vão de 5 m – Angelim Ferro

Tip.	L/200	X _m (mm)	DP (mm)	Mín (mm)	Máx (mm)	IC (95%)
Alpendre	25,00	24,48	1,36	22,6	26,0	(22,51; 26,44)
Banzo Inc.	25,00	<u>26,24</u>	1,92	24,0	28,6	(24,27; 28,20)
Banzo Par	25,00	<u>26,36</u>	1,70	24,0	28,6	(24,39; 28,32)
Banzo Sup.	25,00	<u>26,30</u>	1,82	23,9	28,6	(24,33; 28,26)
Bowstring	25,00	<u>27,22</u>	3,00	24,4	31,4	(25,26; 29,18)
Fink	25,00	<u>25,42</u>	1,29	24,2	27,4	(23,45; 27,38)
Howe	25,00	<u>26,48</u>	1,29	24,5	27,9	(25,35; 27,61)
K Truss	25,00	<u>27,34</u>	1,68	25,4	28,9	(25,37; 29,30)
Pratt	25,00	<u>27,04</u>	3,50	23,7	32,8	(22,51; 26,44)
Scissor	25,00	<u>29,56</u>	2,85	27,2	33,9	(24,27; 28,20)

Fonte: Autor.

Tabela 4.20. Deslocamentos das treliças planas com vão de 10 m – Angelim Pedra

Tip.	L/200	X _m (mm)	DP (mm)	Mín (mm)	Máx (mm)	IC (95%)
Alpendre	50,00	<u>50,30</u>	3,52	45,8	54,2	(46,54; 54,06)
Banzo Inc.	50,00	<u>53,04</u>	3,67	48,8	56,7	(49,28; 56,80)
Banzo Par	50,00	<u>54,66</u>	6,94	46,1	63,7	(50,90; 58,42)
Banzo Sup.	50,00	<u>52,44</u>	2,92	49,8	56,7	(48,68; 56,20)
Bowstring	50,00	<u>55,62</u>	3,43	53,0	60,5	(51,86; 59,38)
Fink	50,00	<u>54,26</u>	1,64	52,5	56,2	(50,50; 58,01)
Howe	50,00	<u>54,68</u>	2,51	52,1	58,8	(50,92; 58,44)
K Truss	50,00	<u>51,08</u>	1,55	49,4	52,7	(47,32; 54,83)
Pratt	50,00	<u>54,98</u>	7,25	47,7	65,6	(51,22; 58,74)
Scissor	50,00	<u>55,24</u>	3,78	50,9	60,2	(51,48; 59,00)

Fonte: Autor.

Tabela 4.21. Deslocamentos das treliças planas com vão de 10 m – Angelim Ferro

Tip.	L/200	X _m (mm)	DP (mm)	Mín (mm)	Máx (mm)	IC (95%)
Alpendre	50,00	<u>54,24</u>	7,03	48,5	66,5	(49,87; 58,61)
Banzo Inc.	50,00	<u>52,46</u>	4,06	48,2	58,7	(48,90; 56,02)
Banzo Par	50,00	<u>54,26</u>	6,29	49,1	64,7	(49,89; 58,63)
Banzo Sup.	50,00	<u>54,94</u>	2,66	51,2	57,6	(52,61; 57,27)
Bowstring	50,00	<u>56,56</u>	6,77	49,7	67,9	(52,19; 60,93)
Fink	50,00	<u>54,16</u>	3,25	51,3	59,4	(49,79; 58,53)
Howe	50,00	<u>54,98</u>	3,34	49,5	58,2	(50,61; 59,35)
K Truss	50,00	48,38	3,40	45,2	52,3	(44,01; 52,75)
Pratt	50,00	<u>60,72</u>	3,84	54,5	64,9	(56,35; 65,09)
Scissor	50,00	<u>53,18</u>	5,18	46,9	59,2	(48,81; 57,55)

Fonte: Autor.

Tabela 4.22. Deslocamentos das treliças planas com vão de 20 m – Angelim Pedra

Tip.	L/200	X _m (mm)	DP (mm)	Mín (mm)	Máx (mm)	IC (95%)
Alpendre	100,00	<u>105,74</u>	13,12	88,20	120,10	(98,33; 113,15)
Banzo Inc.	100,00	<u>105,40</u>	6,23	97,50	113,50	(97,99; 112,81)
Banzo Par	100,00	<u>104,76</u>	8,33	93,00	111,80	(97,35; 112,17)
Banzo Sup.	100,00	99,38	7,99	89,10	110,20	(91,97; 106,79)
Bowstring	100,00	<u>102,02</u>	4,82	94,90	107,50	(94,61; 109,43)
Fink	100,00	<u>109,54</u>	6,53	98,30	115,10	(102,13; 116,95)
Howe	100,00	<u>103,76</u>	9,64	95,80	120,50	(96,35; 111,17)
K Truss	100,00	<u>103,18</u>	4,02	97,60	108,20	(95,77; 110,59)
Pratt	100,00	<u>105,06</u>	9,81	96,00	121,00	(97,65; 112,47)
Scissor	100,00	<u>103,78</u>	7,55	92,80	111,00	(96,37; 111,19)

Fonte: Autor.

Tabela 4.23. Deslocamentos das treliças planas com vão de 20 m – Angelim Ferro

Tip.	L/200	X _m (mm)	DP (mm)	Mín (mm)	Máx (mm)	IC (95%)
Alpendre	100,00	<u>127,78</u>	8,01	119,60	140,50	(120,76; 134,80)
Banzo Inc.	100,00	<u>107,76</u>	8,79	98,10	120,50	(100,08; 115,44)
Banzo Par	100,00	<u>104,22</u>	6,36	95,30	112,80	(96,54; 111,90)
Banzo Sup.	100,00	<u>108,68</u>	6,17	101,30	113,60	(101,00; 116,36)
Bowstring	100,00	<u>102,62</u>	10,84	88,00	115,60	(94,94; 110,30)
Fink	100,00	<u>109,88</u>	9,57	97,40	122,40	(102,20; 117,56)
Howe	100,00	<u>106,54</u>	7,68	98,50	115,20	(98,86; 114,22)
K Truss	100,00	<u>106,76</u>	4,08	100,90	110,70	(99,08; 114,44)
Pratt	100,00	<u>105,12</u>	9,51	98,70	121,80	(97,44; 112,80)
Scissor	100,00	<u>103,90</u>	10,51	98,30	122,50	(96,22; 111,58)

Fonte: Autor.

As tabelas apresentadas foram obtidas com base no resultado de 60 simulações lineares e 1200 simulações não lineares geométricas. Para cada combinação de tipologia, vão e espécie de madeira, adotando o $E_{c0,m}$, foi determinado o carregamento da estrutura para o deslocamento de L/200 através de uma simulação elástica linear. Posteriormente, para cada tipologia e vão foram realizadas 20 simulações, adotando valores experimentais dos módulos de elasticidade, foi determinado a flecha máxima da estrutura com base em uma análise não linear. Inicialmente, é válido mencionar que a introdução do efeito da não linearidade geométrica possibilitou a análise das estruturas planas de forma mais completa. A consideração de tal efeito é essencial em casos de estruturas formadas por peças esbeltas sujeitas a grandes deslocamentos.

Observa-se nas tabelas que o valor limite de deslocamento (L/200) é excedido em diversos modelos, em 57 dos 60 valores médios (95%). Outro ponto a ser ressaltado é que 76% dos modelos que foram atribuídos módulos de elasticidade aleatoriamente (1200) apresentaram deslocamento

máximo acima do valor definido pela norma brasileira. Além disso, foram calculados os intervalos de confiança (IC) com 95% de confiança, onde foram encontrados valores 17,32%, 30,18%, 34,80% superiores aos limites de referência, para os vãos de 5, 10 e 20 metros, respectivamente. Tais valores são consideravelmente superiores aos calculados adotando o módulo de elasticidade a compressão paralelo às fibras médio, preconizado pela ABNT NBR 7190 (1997). Cada tipologia apresentou diferentes números de barras, seções e carregamentos, não sendo o intuito comparar os valores de deslocamentos entre as treliças. O objetivo da pesquisa foi avaliar a metodologia proposta pela normativa brasileira para o cálculo de deslocamentos. Foram utilizadas diversas tipologias para abordar modelos utilizados não somente no Brasil, mas em diversos outros países, mostrando assim a aplicabilidade dos resultados obtidos para diversos modelos.

Os deslocamentos máximos foram localizados no banzo inferior em 56% dos casos e 44% no banzo superior, como mostrado nas Figuras 4.3, 4.5 e 4.7. Tais deslocamentos excessivos no banzo inferior podem gerar patologias em elementos adjacentes a estrutura. Oliveira e Cardoso (2018) afirmam que flechas excessivas podem causar fissuras e rupturas na alvenaria por causa da incompatibilidade entre as deformações da estrutura e dos componentes que integram edifícios. A presença de fissuras na madeira pode provocar a perda de resistência do elemento, podendo afetar o desempenho de toda a estrutura. Ainda, o deslocamento excessivo no banzo inferior pode provocar o aparecimento de aberturas no telhado devido à falta de encaixe entre as telhas, possibilitando a infiltração no edifício. A presença de umidade é uma das principais causas de manifestações patológicas em estruturas de madeira (ANDRADE JÚNIOR et al., 2012).

Com base nos resultados comentados, observou-se que o método simplificado proposto pela norma brasileira pode gerar deslocamentos excessivos nas estruturas de madeira e, com isso, favorecer o aparecimento de manifestações patológicas nos elementos estruturais e, também, em elementos subjacentes como esquadrias, alvenaria e outros elementos adjacentes à estrutura. Como observado por Macchioni e Mannucci (2018), deslocamentos excessivos podem ser normalmente relacionados a falha ou risco de falha de determinados elementos. Ademais, deslocamento excessivo pode causar problemas estruturais (CALIL JÚNIOR et al., 2006).

Outro ponto analisado foi a comparação do esforço de cada barra comprimida com a carga de Euler, definida como o carregamento teórico obtido por modelos idealizados, sem imperfeições. Em 59% dos casos analisados, onde os módulos de elasticidade para cada barra da treliça foram adotados aleatoriamente, pelo menos uma barra da treliça apresentou esforço superior a carga de Euler. Tal valor pode ser justificado em parte pelo critério adotado na definição do modelo de referência. Como explicado no Item 3.3, o modelo de referência foi definido com base na esbeltez máxima de 80 para elementos comprimidos e na carga crítica de Euler. Com isso,

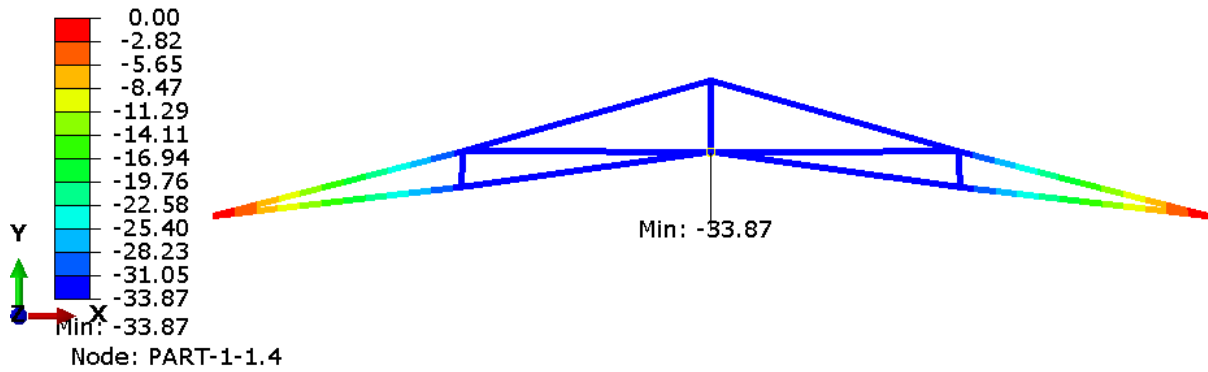
as barras mais esbeltas apresentavam esforços bem próximos a carga máxima de flambagem elástica, tornando tais elementos mais susceptíveis à instabilidade. Vale ressaltar que as cargas propostas pela ABNT NBR 7190 (1997) na verificação do estado limite último de instabilidade, por considerar possíveis efeitos de segunda ordem e imperfeições do elemento, são inferiores aos valores calculados pela fórmula de Euler. Como já citado, todas as treliças modeladas eram isostáticas, implicando que a falha de um elemento provoca o colapso de toda a estrutura. Pode-se observar que a adoção do mesmo módulo de elasticidade para todas as barras de uma treliça, como preconizado pela norma brasileira, pode levar ao colapso de um ou mais elementos da estrutura, comprometendo seu desempenho geral.

Além disso, 81% dos modelos os quais as propriedades das peças foram atribuídas aleatoriamente apresentaram deslocamento acima da $L/200$ ou esforço superior a carga crítica de Euler em pelo menos um elemento. Em outras palavras, apenas 19% dos modelos não apresentaram qualquer tipo de problema. Tais números indicam que a adoção do $E_{c0,m}$ para todas as peças da treliça pode provocar deslocamentos excessivos e instabilidades locais e conseqüentemente seu colapso quando se trata de estruturas isostáticas. Além disso, estes números podem ser explicados pela alta variabilidade dos valores de rigidez definidos experimentalmente. As espécies utilizadas são madeiras comerciais onde não foram descritas procedências e idade da madeira. A falta de rastreabilidade das madeiras utilizadas, que é algo comum, contribui para tal variação pois madeiras de diferentes regiões podem ter sido enviadas para o laboratório como um mesmo lote, acentuando a diferença dos valores encontrados. Portanto, o uso de uma disposição racional das peças poderia reduzir os deslocamentos da estrutura.

A partir da revisão bibliográfica foi possível constatar que manifestações patológicas em estruturas de madeira são muito comuns. Esta pesquisa optou por avaliar estritamente a adoção do mesmo módulo de elasticidade para todas as barras. Coeficientes e combinações de ações, assim como outros critérios de dimensionamento não foram utilizados pois poderiam mascarar os resultados. A partir da metodologia proposta foi possível avaliar quais os efeitos desta adoção nos deslocamentos excessivos das treliças isoladamente.

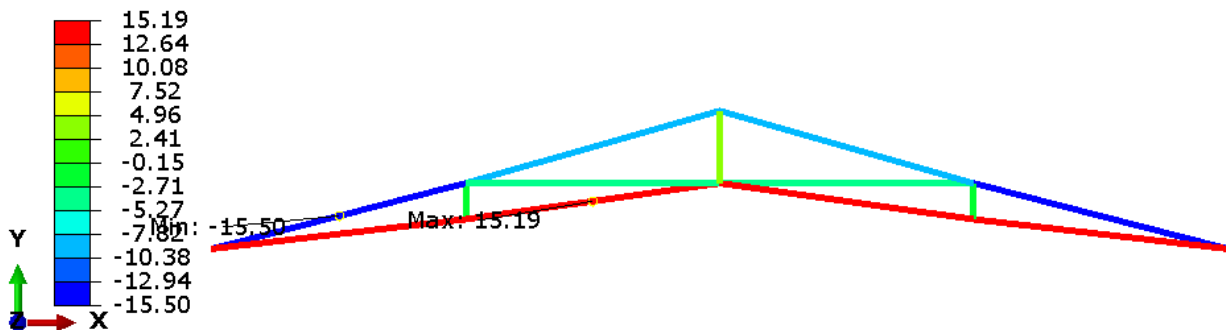
Nas Figuras 4.5 a 4.10 são mostrados os modelos que apresentaram os maiores deslocamentos e as respectivas tensões nas barras para cada um dos vãos avaliados. Em tais modelos foram adotados módulos de elasticidade aleatoriamente para simular as condições reais de montagem de treliças.

Figura 4.5. Deslocamento vertical (mm): Scissor ($E_{aleatório}$) - 5 metros - Angelim Ferro



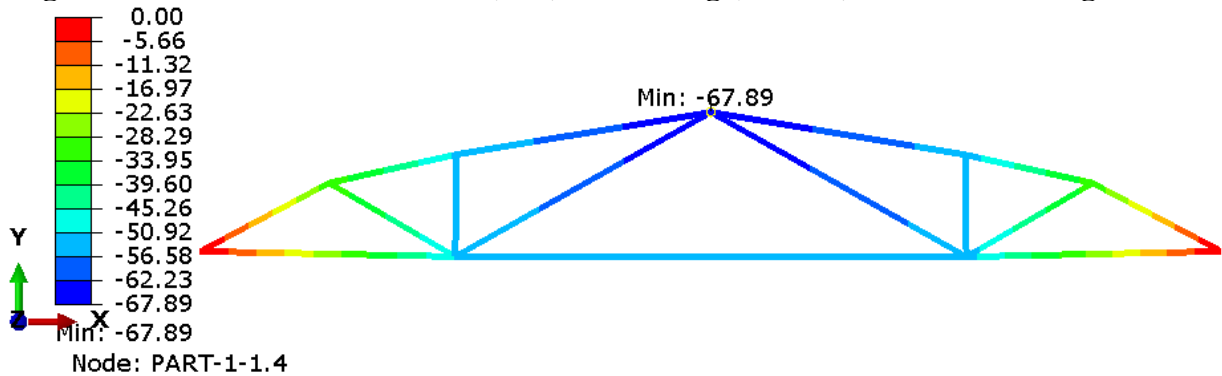
Fonte: Autor.

Figura 4.6. Tensão nas barras (MPa): Scissor ($E_{aleatório}$) - 5 metros - Angelim Ferro



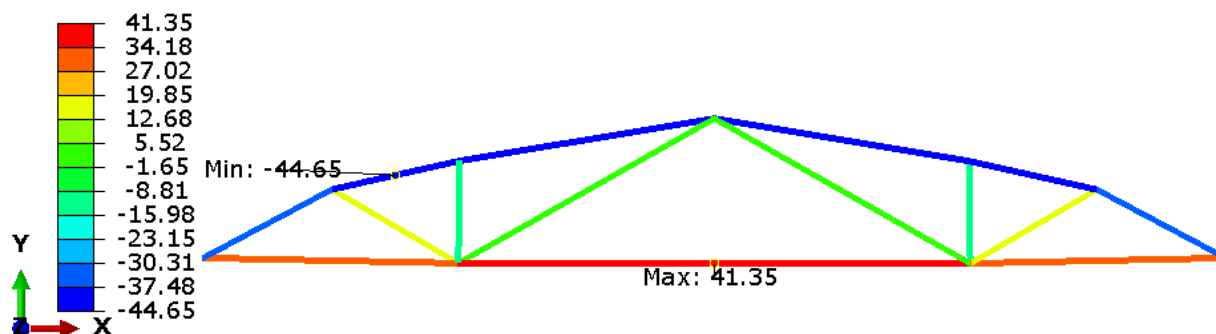
Fonte: Autor.

Figura 4.7. Deslocamento vertical (mm): Bowstring ($E_{aleatório}$) - 10 metros - Angelim Ferro



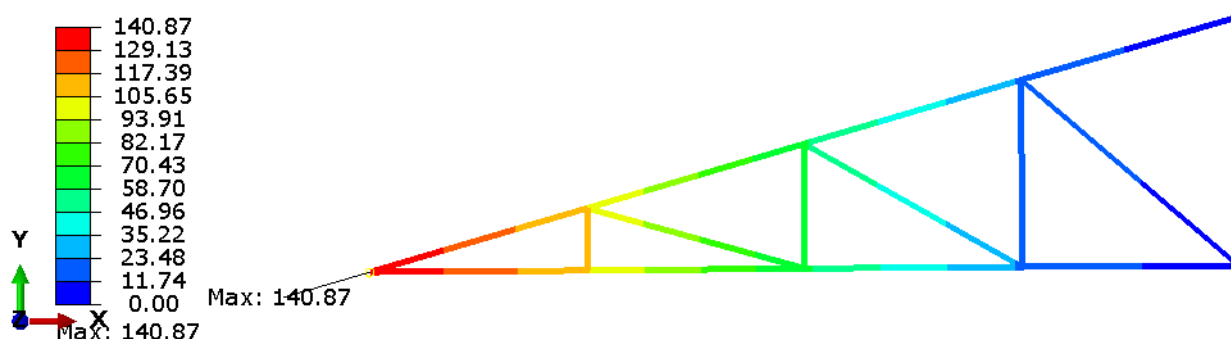
Fonte: Autor.

Figura 4.8. Tensão nas barras (MPa): Bowstring ($E_{aleatório}$) - 10 metros - Angelim Ferro



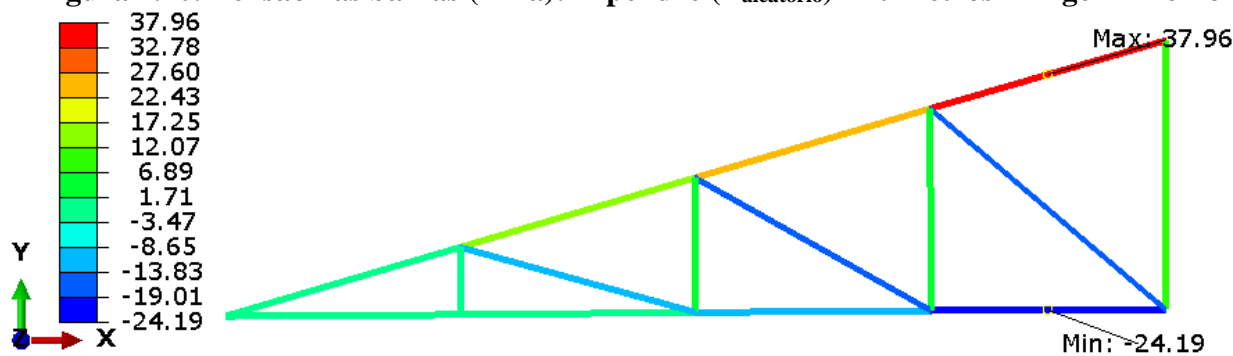
Fonte: Autor.

Figura 4.9. Deslocamento vertical (mm): Alpendre ($E_{aleatório}$) - 20 metros - Angelim Ferro



Fonte: Autor.

Figura 4.10. Tensão nas barras (MPa): Alpendre ($E_{aleatório}$) - 20 metros - Angelim Ferro



Fonte: Autor.

Se comparada aos valores de $f_{t0,m}$ e $f_{c0,m}$ da madeira Angelim Ferro, (110,58 e 79,24 MPa, respectivamente), pode-se observar que a madeira foi submetida a solicitações consideravelmente inferiores aos valores de resistência da espécie. Tais observações são apresentadas na Figura 4.6, Figura 4.8 e Figura 4.10. Estes resultados indicam que a adoção do $E_{c0,m}$ para todas as barras possui influência considerável nos deslocamentos da treliça, além de influenciar a carga de Euler

de cada barra, porém não provoca consideráveis alterações nas solicitações em cada barra. Vale ressaltar que foi considerado que as ligações permanecem íntegras, assumindo que a falha ocorre nas barras de madeira (CHRISTOFORO et al., 2011). Além disso, em razão das tensões consideravelmente inferiores a resistência da madeira, o efeito da não linearidade física foi desprezado por não modificar significativamente o deslocamento da estrutura. Tal consideração foi baseada nos trabalhos de Kingston e Budgen (1972), Keith (1972) e Hunt (1989).

Os resultados mostraram que os deslocamentos foram superiores ao valor de referência em vários modelos, e diversas barras apresentaram esforços superiores a carga de Euler, indicando a instabilidade local da estrutura. Tais resultados indicam que a adoção do $E_{c0,m}$ para todas as barras pode gerar uma rigidez maior da estrutura que o valor real (“in loco”), seja local ou global, quando as barras são posicionadas aleatoriamente na estrutura. Esses resultados indicaram que o método preconizado pela normativa podem provocar deslocamentos excessivos em treliças de madeira, podendo influenciar no desempenho e durabilidade.

As simulações numéricas se mostraram eficazes na geração de diversos resultados com um tempo e custo consideravelmente inferior. Com base nesses resultados foi possível inferir possíveis causas de manifestações patológicas em estruturas de madeira, como já realizado em diferentes situações por diversos autores (BERTOLINI-CESTARI et al., 2013). Como constatado pela revisão bibliográfica, diversas manifestações patológicas têm como causa, falhas de projeto de execução e falta de manutenção, além de possíveis equívocos no projeto estrutural. Os resultados desta pesquisa sugerem que a metodologia preconizada pela ABNT NBR 7190 (1997) para o cálculo de deslocamentos em treliças de coberturas pode gerar deslocamentos excessivos e instabilidades locais. A pré-classificação dos elementos estruturais, com auxílio de métodos não destrutivos, possibilita a escolha de peças com qualidade superior para posições mais solicitadas, enquanto as peças de qualidade inferior são posicionadas em locais menos solicitados. Diversos trabalhos supracitados atestam a eficiência de tais métodos para estimativa de propriedades da madeira, sendo uma alternativa eficiente aos métodos realizados em laboratório. Tais medidas podem reduzir os deslocamentos de estruturas de madeira, diminuindo o aparecimento de manifestação patológicas.

A normativa que regula construções em madeira foi publicada em 1997, ou seja, há mais de duas décadas. Nos últimos anos, os métodos construtivos de diversos tipos de estruturas e materiais têm evoluído e diversificado. Os sistemas estruturais e componentes em madeira vêm sendo cada vez mais utilizados por serem opções ambientalmente, socialmente e economicamente apropriadas (BUKAUSKAS et al., 2019). Desta forma, é essencial aprimorar métodos de dimensionamento para tornar tais estruturas cada vez mais eficientes. No presente estudo foi

observado que a adoção do $E_{c0,m}$ para todos os elementos da treliça no cálculo de deslocamentos pode gerar deslocamentos excessivos, podendo acarretar manifestações patológicas. A pré-classificação com ensaios não destrutivos dos elementos de barra possibilita posicionar racionalmente peças mais resistentes nas regiões de maior solicitação. Tal prática possui elevado potencial para aplicação em treliças, especialmente na montagem industrial por possibilitar o aumento da eficiência, eficácia e diminuição dos deslocamentos da estrutura. Com isso, é possível obter estruturas mais sustentáveis e confiáveis a um custo relativamente baixo, garantindo um melhor desempenho durante sua vida útil.

5. CONCLUSÕES

A partir do estudo numérico proposto, foi possível realizar o estudo de diversas tipologias e vãos para duas espécies distintas a um custo relativamente inferior e em um prazo hábil se comparado à metodologia experimental. A partir dos resultados obtidos foi possível avaliar a metodologia proposta pela normativa para o cálculo de deslocamentos no Estado Limite de Serviço.

No presente trabalho foram apresentados resultados para a análise de treliças com comportamento não linear geométrico com o objetivo de avaliar a metodologia proposta pela ABNT NBR 7190 (1997) para o cálculo dos deslocamentos no estado limite de serviço. Além disso, foi proposto o uso da pré-classificação da madeira, possibilitando o posicionamento dos elementos racionalmente nas regiões mais solicitadas.

Este estudo colaborou para aprofundar o conhecimento relativo a possíveis causas de patologias em treliças de cobertura em madeira, indicando que a metodologia para o cálculo de deslocamentos preconizada pela normativa ABNT NBR 7190 (1997) pode causar deslocamentos excessivos. Os principais resultados obtidos foram:

- 76% dos modelos que foram atribuídos módulos de elasticidade aleatoriamente apresentaram deslocamento superior a $L/200$;
- Intervalos de confiança apresentaram valores 17,32%, 30,18% e 34,80% superiores aos limites de referência, para os vãos de 5, 10 e 20 metros, respectivamente;
- Os deslocamentos máximos foram localizados no banzo inferior em 56% dos casos, e 44% no banzo superior, podendo provocar patologias no telhado e em elementos adjacentes a estrutura;
- Em 59% das treliças com os módulos de elasticidade adotados aleatoriamente pelo menos uma barra da treliça apresentou esforço superior a carga de Euler, implicando na falha da estrutura por instabilidade local;
- 81% dos modelos apresentaram deslocamento excessivo e/ou carga superiores a carga crítica de Euler em pelo menos uma barra.

Baseados nos resultados preliminares obtidos pela pesquisa, a metodologia proposta pela normativa brasileira para o cálculo de deslocamentos de estruturas de madeira pode ter influência nos deslocamentos excessivos e instabilidades locais em treliças de madeira. Uma solução para essa problemática consiste na utilização de técnicas não destrutivas para obtenção do módulo de elasticidade da madeira, como ondas de tensão, ultrassom, resistógrafo, vibração transversal e longitudinal. Desta forma, as peças com maiores valores de rigidez podem ser posicionadas em regiões com maior solicitação, prevenindo flechas excessivas e manifestações patológicas

decorrentes do deslocamento excessivo. Tal prática pode ser facilmente aplicada na montagem industrial de treliças, fornecendo estruturas mais eficientes, confiáveis e sustentáveis a um custo relativamente baixo.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a adoção de diferentes modelos constitutivos para a madeira nos modelos numéricos, considerando a não linearidade física do material. Ainda, propõe-se comparar os diferentes métodos não destrutivos citados neste trabalho para avaliar o custo e aplicabilidade do Brasil. Por fim, pode-se estudar experimentalmente o efeito da alocação racional das peças de madeira da treliça nos deslocamentos da estrutura, utilizando ensaios não destrutivos na montagem de treliças.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMYAN, S. G.; ISHMAMETOV, R. K. Strengthening Timber Roof Trusses during Building Construction and Reconstruction. 2016. **International Conference on Industrial Engineering**, p. 2133–2137, 2016.

ALMEIDA, D. H.; FERRO, F. S.; ICIMOTO, F. H.; TAKESHITA, S.; MODES, K. S.; ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Determinação da rigidez de *Pinus elliottii* em diferentes teores de umidade por meio de ensaios mecânicos não destrutivos. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 303–309, 1 jun. 2016a.

ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D.H.; CHRISTOFORO, A. L.; CHAHUD, E.; BRANCO, L. A. M. N.; LAHR, F. A. R. Density as Estimator of Strength in Compression Parallel to the Grain in Wood. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 3, p. 67–71, 1 jun. 2016b.

ALVIM, R. C.; VELOSO, L. A. C. M.; ALMEIDA, P. A. O.; ALVIM, R. A. A. Metodologia para avaliação da segurança de estrutura do tipo Hauff em coberturas de grande porte de madeira no Brasil. Coimbra, Portugal, **Anais CIMAD** 11, 7-9/06/2011.

ANDRADE JÚNIOR, J. R.; ALMEIDA, D. H.; STAMATO, G. C.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Avaliação das condições estruturais de telhados construídos com madeira brasileira nativa. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, v. 13, p. 1- 10, 2012.

ANDRADE JÚNIOR, 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** , v. 14, p. 75–85, 2014.

ARRIAGA, F.; PERAZA, F.; ESTEBAN, M.; BOBADILLA, I.; GARCÍA, F. **Intervención em estructuras de madera**. Editora AITIM asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera, Madrd, España, 2002.

AS, N.; ROSS, R. J.; WANG, X.; SENALIK, C. A. Nondestructive Evaluation of Tensile Properties of Structural Lumber from the Spruce-Pine-Fir Species Grouping: Phase 1. Evaluation of Modulus of Elasticity. **Proceedings: 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium**, p. 250–261, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190. **Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1997.

ASTM 1876 – American Society for Testing and Materials. ASTM 1876: **Standard test method for dynamic Young’s modulus, shear modulus and Poisson’s ratio by Impulse excitation Vibration**. Philadelphia, 2007.

ASTM C215 – American Society for Testing and Materials. ASTM C215: **Standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies os concrete specimens**. Philadelphia, 2008.

BALLARIN, A. W; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *pinus taeda* por ultra-som. **Engenharia Agrícola - Jaboticabal**, v. 25, n. 1, p. 19–28, 2005.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento com uso do método não destrutivo de. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, v. 10, n. 28, 2009.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L.; HELLMEISTER, L. A. V. Ensaio não-destrutivo de ondas de tensão em toras e madeira serrada de *Pinus taeda* L. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, v. 11, n. 26, 2010.

BARBOSA, L.; TARCÍSIO, J.; RABELO, G. F.; GOMES, F. C.; TRUGILHO, P. F.; ELOY, F. Avaliação não destrutiva de estrutura de madeiras em edifício histórico de Tiradentes, MG. **CERNE**, vol. 19, nº:3, jul/set, p. 481-487, 2013.

BASSIER, M.; HADJIDEMETRIOU, G.; VERGAUWEN, M.; ROY, N. V.; VERSTRYNGE, E. Implementation of scan-to-BIM and FEM for the documentation and analysis of heritage timber roof structures. **Springer Verlag**, EuroMed 2016, Part I, LNCS 10058, pp. 79– 90, 2016. DOI: [10.1007/978-3-319-48496-9_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9_7)

BERTOLINI-CESTARI, C.; CHIABRANDO, F.; INVERNIZZI, S.; MARZI, T.; SPANÒ, A. Terrestrial Laser Scanning and Settled Techniques: A Support to Detect Pathologies and Safety Conditions of Timber Structures. **Advanced Materials Research**, 778, 350–357, 2013 DOI: [10.4028/www.scientific.net/amr.778.350](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.778.350)

BRANCO, F.; BRITO, J.; FLORES, I.; GASPAR, F.; SANTOS, S.; PAULO, P.; CAMPOS, J.; ALEXANDRE, J. **Capítulo 3: Patologia e inspeção de construções em madeira. Curso de Inspeção e Reabilitação de construções**. Módulo IR2. Instituto Superior Técnico. Lisboa. 2012

BRANCO, J. M.; VARUM, H.; RAMISOTE, V.; COSTA, A. Load-carrying capacity test of a long-span timber truss. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings**, v. 169, n. 5, p. 373–387, 1 maio 2016.

BRANCO, J. M.; SOUSA, H. S.; TSAKANIKI, E. Non-destructive assessment, full-scale load-carrying tests and local interventions on two historic timber collar roof trusses. **Engineering Structures**, v. 140, p. 209–224, 1 jun. 2017.

BRAUN JÚNIOR, W.; SANTOS, L. L. Correlação das propriedades elásticas estáticas e dinâmicas de três espécies nativas de madeira. **Revista Científica Faesa**, v. 14, n. 1, p. 122–141, 1 dez. 2018.

BRITO, L. D. **Patologia em estruturas de madeira: metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2014.

BUKAUSKAS, A.; MAYENCOURT, P.; SHEPERD, P.; SHARMA, B.; MUELLER, C.; WALKER, P.; BREGULLA, J. Whole timber construction: A state of the art review. **Construction and Building Materials**. v. 213. p. 748-769. 2019.

BUCUR, V. **Acoustics of wood**. New York: CRC Press, 1995.

BUCUR, V. Theory of and experimental methods for acoustic characterization of wood. **In: Acoustics of wood**. Berlin: Springer-Verlag. 2 ed, p. 39-104, 2006.

CALIL JÚNIOR; DIAS, A. A.; GÓES, J. L. N.; CHEUNG, A. B.; STAMATO, G. C.; PIGOZZO, J. C.; OKIMOTO, F. S.; LOGSDON, N. B.; BRAZOLIN, S.; LANA, E. L. **Manual de projeto e construção de pontes de madeira**. São Carlos: Suprema, 2006.

CANDIAN, M.; SALES, A. Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 83-98, Out./dez. 2009.

CARNIELLE, R. A. O. **Caracterização das construções com madeira em uberlândia: patologias, projetos e detalhes**. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil. Universidade de Uberlândia, 2011.

CARRASCO, E. V. M.; PEREIRA, N. C. S.; ALVES, R. C. Estimativa da densidade aparente, resistência à compressão e módulo de elasticidade da madeira por meio do resistografo. **Construindo**, v. 5, n. 1, 2013.

CARREIRA, M. R.; CANDIAN, M. Teste de um equipamento para classificação de peças estruturais de madeira pela técnica da vibração transversal. **Semina: Ciências Exatas e da Terra**, v.29, n.1, p. 3-14, 2008.

CARREIRA, M. R.; SEGUNDINHO, P. G. A.; CALIL NETO, C.; DIAS, A. A.; CALIL JÚNIOR, C.; SANTOS, C. J. Aplicação do ensaio de vibração transversal livre na avaliação não-destrutiva de vigas de madeira laminada colada (MLC). **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, v. 11, n. 26, 2010.

CASTELLANOS, J. R. S. Módulo dinámico de la madera laminada compuesta de tres especies, determinado por vibraciones transversales. **Tecnológico Nacional de México en Celaya Pistas Educativas**. n. 135, 2020.

CAVALHEIRO, R. S.; ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H.; ARAÚJO, V. A.; CRHISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Mechanical Properties of Paricá Wood Using Structural Members and Clear Specimens. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 2, p. 56–59, 1 abr. 2016.

CHAUHAN, S.; SETHY, A. Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 18, n. 2, p. 373–382, 2016.

CHEN, Y.; GUO, W. Mechanical properties evaluation of two wood species of ancient timber structure with nondestructive testing methods. **BioResources**, v. 11, n. 3, p. 6600–6612, 2016.

CHRISTOFORO, A. L., ROMANHOLO, G. A., PANZERA, T. H., BORGES, P. H. R., LAHR, F. A. R. Influence of stiffness in bolted connections in wooden plane structure of truss type. **Engenharia Agrícola**, 31(5), 998-1006, 2011. [DOI:10.1590/S0100-69162011000500017](https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000500017)

CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, D. H.; VARANDA, L. D.; PANZERA, T. H.; LAHR, F. A. R. Estimation of wood toughness in brazilian tropical tree species. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 2, p. 232–237, abr. 2020a.

CHRISTOFORO, A. L.; COUTO, N. G.; ALMEIDA, J. P. B.; AQUINO, V. B. M.; LAHR, F. A. R. Apparent density as an estimator of wood properties obtained in tests where failure is fragile. **Engenharia Agrícola - Jaboticabal**, v. 40, p. 105-112, 2020b.

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A.; ICIMOTO, F. H.; FERRO, F. S.; SEGUNDINHO, P. G. A., CALIL JÚNIOR, C. Avaliação da coerência entre três métodos de determinação do módulo de elasticidade da madeira de *Pinnus Oocarpa*. **Madeira: Arquitetura & Engenharia**, São Carlos - SP, v. 10, n. 25, p. 33-42, 2009.

CRUZ, H. **Patologia, avaliação e conservação de estruturas de madeira. II Curso Livre Internacional de Patrimônio**. Associação Portuguesa dos Municípios com centro histórico; Fórum UNESCO Portugal, Santarém Fevereiro/Março de 2001.

DEL MENEZZI, C. H. S.; SILVEIRA, R. R.; SOUZA, M. R. Estimativas das propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras amazônicas por meio da técnica não-destrutiva de ondas de tensão. **Acta Amazônica**. Vol. 40 (2), p. 325-332, 2012.

DIAS, F. M., ALMEIDA, T. H.; ARAÚJO, V. A.; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Influence of the apparent density on the shrinkage of 43 tropical wood species. **Acta Scientiarum - Technology**, v. 41, n. 1, 2019.

DIAS, F. M. **A densidade aparente como estimador de propriedades de resistência e rigidez da madeira**. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, 2000.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente Strength and stiffness properties of wood esteemed through the specific gravity. **Scientia Forestalis**, v. 65, p. 102–113, 2004.

DIETSCH, P. Robustness of large-span timber roof structures - Structural aspects. **Engineering Structures**, v. 33, n. 11, p. 3106–3112, nov. 2011.

FAYDI, Y.; BRANCHERIAU, L.; POT, G.; COLLET, R. Prediction of Oak mechanical properties Based on the Statistical Exploitation of Vibration Response. **BioResources**, v. 12, n. 3, p. 5913–5927, 2017.

FEIO, A. O.; MACHADO, J. S.; LOURENÇO, P. B. Caracterização de propriedades da madeira de castanho na direção perpendicular ao fio – recurso a técnicas destrutivas e não destrutivas de ensaio. **Congresso ibérico a madeira na construção, 1, Guimarães**, “I Congresso Ibérico (CIMAD'04) : a Madeira na Construção”. p. 353-362, 2004.

FREITAS, R. R. **Modelo teórico-experimental de deterioração de postes de madeira aplicado ao Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado) – Interunidades em ciência e Engenharia de materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

GARCIA, R. A.; CARVALHO, A. M.; LATORRACA, J. V. F.; MATOS, J. L. M.; SANTOS, W. A.; SILVA, R. F. M. Nondestructive evaluation of heat-treated *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood using stress wave method. **Wood Science and Technology**, v. 46, n. 1–3, p. 41–52, jan. 2012.

GOCÁL, J.; KRUSINKSKÝ, P.; CAPJOVÁ, E.; KEKELIAK, M. Geometric and static analysis of the historical truss in village Belá Dulice. **Advanced Materials Research**, v. 969 p. 199-20,

2014.

GONÇALVES, R.; BARTHOLOMEU, A. Avaliação do desempenho de ensaio não destrutivo em vigas de madeira de eucalyptus citriodora e pinus elliottii. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 269–274, 2000.

GROBÉRIO, M. P. **Indicações para o emprego da madeira de espécies tropicais do Brasil**. Dissertação (Mestrado) – Interunidades em ciência e Engenharia de materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

GUAN, C.; LIU, J.; ZHANG, H.; WANG, X.; ZHOU, L. Evaluation of modulus of elasticity and modulus of rupture of full-size wood composite panels supported on two nodal-lines using a vibration technique. **Construction and Building Materials**, v. 218, p. 64–72, 10 set. 2019.

HAINES, D. W.; LEBAN, J. M.; HERBE, C. Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. **Wood Science and Technology**. v. 30, p. 253-263, 1996.

HUNT, D. G. Linearity and non-linearity in mechano-sorptive creep of softwood in compression and bending. **Wood Science and Technology**, v. 23, n. 4, p. 323–333, 1989.

KEITH, C. The mechanical behaviour of wood in longitudinal compression. **Wood and Technology**, v.4, p. 234-244, 1972.

KINGSTON, R.; BUDGEN, B. Some aspects of the rheological behaviour of wood. Part IV: Non-linear behaviour at high stresses in bending and compression. **Wood and Technology**, v. 6, p. 230-238, 1972.

HIGHLEY, T. L.; SCHEFFER, T. **Controlling decay in waterfront structures. Evaluation, Prevention, and Remedial Treatments**. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. FPL-RP-494. Madison, WO. United States. 1989.

HIRAMATSU, N. A. **Equações de volume comercial para espécies nativas na região do Vale do Jari, Amazônia Oriental**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

IMPOSA, S.; GIULIANA, M.; MAURO, C.; GIUSEPPE, C; GIORGIO B. Characterization of Decay in the Wooden Roof of the S. Agata Church of RagusaIbla (Southeastern Sicily) by Means of Sonic Tomography and Resistograph Penetration Tests. **International Journal of Architectural Heritage** v. 8(2), p. 213–223, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Madeiras Tropicais Brasileiras**. IBAMA-LPF, Brasília, 152p, 1997.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Informações de Madeira**. São Paulo. IPT, 1981.

LIMA, J. T.; SARTÓRIO, R. C.; TRUGILHO, P. F.; CRUZ, C. R.; VIEIRA, R. S. Uso do revistógrafo para estimar a densidade básica e a resistência à perfuração da madeira Eucalyptus. **Scientia Forestalis**, n. 75, p. 85–93, 2007.

LIU, X. The finite element analysis of truss beam structure based on ANSYS. **Advanced Materials Research**, v. 594–597 p. 2939–2944, 2012. DOI: <https://www.scientific.net/AMR.594-597.2939>

LORENZI, H. 5. ed. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil, vol.2**, Nova Odessa, São Paulo: Instituto Plantarum, p. 203, 209, 294, 2008.

MACCHIONI, N.; MANNUCCI, M. The assessment of Italian trusses: survey methodology and typical pathologies. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 12, n. 4, p. 533–544, 19 maio 2018.

MARTINS, C.; CRUZ, H.; DIAS, A. M. P. G. Using non-destructive testing to predict the mechanical properties of glued laminated poplar. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings**, v. 172, n. 9, p. 661–670, 1 set. 2019.

MARTINS, J. F. A.; FIORITI, C. F. Avaliação de manifestações patológicas identificadas nas estruturas em madeira do centro de eventos IBC (Instituto Brasileiro do Café). **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 12, n. 3, 10 ago. 2016.

MATOS, G. S. B.; SILVA, G. R.; GAMA, M. A. P.; VALE, R. S.; ROCHA, J. E. C. Desenvolvimento Inicial e Estado Nutricional de Clones de Eucalipto no Nordeste do Pará. **Acta Amazônica**, v. 42, n. 2, p. 491-500, 2012.

MORI, M.; HASEGAWA, YOO, J.; KANG, S, MATSUMURA, J. Nondestructive evaluation of bending strength of wood with artificial holes by employing air-coupled ultrasonics. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 24–31, 1 maio 2016.

NOGUEIRA, M.; BALLARIN, A. W. Sensibilidade dos ensaios de ultra-som à ortotropia elástica da madeira. **Pan- American Conference for Nondestructive Testing**, 2003.

OLIVEIRA, T. D. S.; CARDOSO, A. C. S. Deformação lenta das estruturas de concreto armado e suas manifestações patológicas. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 10, n. 2, 2018.

OLIVEIRA, F. G. R.; MILLER, K. P.; CANDIAN, M.; SALES, A. Efeito do comprimento do corpo-de-prova na velocidade ultra-sônica em madeiras. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 141-145, 2006.

OLIVEIRA, G. O. B.; PINHEIRO, R. V.; ARROYO, F. N.; ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H.; SILVA, D. A. L.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.. Technical Feasibility Study of the Use of Softwoods in Lattice Structure “Howe” Type for Roofing (Gaps between 8-18 Meters). **Current Journal of Applied Science and Technology**, p. 1–8, 22 maio 2019.

PALLUDO, D. F.; PINHEIRO, R. V.; ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H.; TAKEDA, M. C.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Timber Use in Truss Structures for Roof (“Howe” Type – 8 to 18 Meters). **International Journal of Materials Engineering**, v. 7, n. 5, p. 93–99, 1 out. 2017.

PARISI, M. A.; CHESI, C.; TARDINI, C. Inferring seismic behavior from morphology in timber roofs. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 6, n. 1, p. 100–116, 1 jan. 2012.

PAULA, M. H.; MESQUITA, R. R. S.; GONÇALEZ, J. C.; RIBEIRO, E. S.; SOUZA, R. S. Utilização de métodos não destrutivos para caracterização simplificada da madeira de cumaru (*Dipteryx odorata* Willd). **Biodiversidade**, v. 15, n. 2, 2016.

PELLEGRIN, R. F. A vibrational approach to non-destructive testing of structural lumber. **Forest Products Journal**, Madison, v. 14, n.3, p.93-101, 1965

PEREIRA, P. I. G. **Avaliação de vigas de madeira de Castanho tendo por base a classificação visual e ensaios não destrutivos**. Dissertação (Mestrado), Universidade do Minho Escola de Engenharia, 2015.

PINHEIRO, R. V.; LÁZARO, L. G. F.; MACEDO, L. B.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Repair Methods Indication for a Timber Coverage Structure Located in Sinop City - Brazil. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 2, p. 39–46, 1 abr. 2016.

PITER, J. C.; ZERBINO, R. L.; BLAB, H. J. Effectiveness of fundamental resonant frequency for determining the elastic properties of Argentinean *Eucalyptus grandis* in structural sizes. **Holz Roh Werkst**, v.62, n.2, p.88-92, 2004.

RIBEIRO, E. S.; GONÇALEZ, J. C.; SOUZA, R. S.; PAULA, M. H. Avaliação de propriedades mecânicas da madeira por meio de métodos destrutivos e não-destrutivos. **Nativa**, v. 4, n. 2, p. 103–106, 27 abr. 2016.

RINN, F.; SCHWEINGRUBER, F.H.; SCHAR, E. Resistograph and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. **Holzforschung**, Berlin, v.50, n.4, p.303-311, 1996.

ROSA, R. A.; FRANÇA, L. C. A.; SEGUNDINHO, P. G. A.; LUBE, V. M.; PAES, J. B. Caracterização da Madeira de Maçaranduba (*Manilkara* sp.) por Métodos Destrutivos e Não Destrutivos. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 5, n. 1, p. 68–78, 31 maio 2014.

SALES, A. Sistema de classe de resistência para dicotiledôneas: Revisão da NBR 7190/1997. **Madeira: Arquitetura e engenharia**. v. 13, n.1, p. 10-21, 2004.

SANTOS, L. L. **Estabelecimento de Classes de Resistência para a Madeira Serrada de *Pinus spp.*** Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2019.

SATHEESKUMAR, N.; HENDERSON, D. J.; GINGER, J. D.; WANG, C. Three-Dimensional Finite-Element Modeling and Validation of a Timber-Framed House to Wind Loading. **Journal of Structural Engineering**, v. 143, n. 9, 1 set. 2017.

SCANAVACA JÚNIOR, L.; GARCIA, J. N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 65, 120-129, 2004.

SEGNINI, S. C. A. **Estudo comparativo de formulações para análise não linear geométrica de treliças**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, 2000.

SEGUNDINHO, P. G. A.; CARREIRA, M. R.; CALIL NETO, C.; REGAZZI, A. J.; DIAS, A. A.; CALIL JÚNIOR, C. Avaliação do módulo de elasticidade de peças de madeira laminada colada (MLC) obtido por meio do ensaio de vibração transversal. **Ambiente Construído**, v. 13,

n. 2, p. 7–14, 2013.

SEGUNDINHO, P. G. A.; COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A.; CALIL JÚNIOR, C. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira 1. **Árvore**, v. 36, n. 6, p. 1155–1161, 2012.

SEGUNDINHO, P. G. A.; REGAZZI, A. J.; POLETTI, F. S.; PAULA, M. O.; MENDONÇA, A. R.; GONÇALVES, F. G. Variação dos módulos de elasticidade e ruptura em madeira de cedro-australiano por meio de ensaios não destrutivo e destrutivo. **Ciencia Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1163–1178, 1 jul. 2018.

SEJKOT, P.; ORMARSSON, S.; VESSBY, J.; KALLSNER, B. Numerical out-of-plane stability analysis of long span timber trusses with focus on buckling length calculations. **Engineering Structures**, v. 204, 1 fev. 2020.

SILVA, L. C. S. L. **Avaliação da integridade da tesoura de caibro-armado de madeira do século XIX através de ensaios não-destrutivos**. Tese (Doutorado), Escola de Arquitetura. Universidade Federal De Minas Gerais, 2019.

SOUZA, M. H. **Incentivo ao uso de novas madeiras para a fabricação de móveis**. IBAMA, Brasília, 70p, 1997.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. Editora Pini. São Paulo, 1998.

TABIEI, A.; WU, J. Three-dimensional nonlinear orthotropic finite element material model for wood. **Composite Structures**, v. 50, n. 2, p. 143-149, 2000.

STANGERLIN, D. M.; CADEMARTORI, P. H. G.; GATTO, D. A.; CALEGARI, L.; MELO, R. R.; VIVIAN, M. A.; MODES, K. S. Propagação indireta e semidireta de ondas ultrassônicas na estimativa de propriedades mecânicas da madeira. **Ciência da Madeira**, v. 2, n. 2, p. 85–95, 2011.

STANGERLIN, D. M.; CALEGARIA, L.; SANTINI, E. J.; DOMINGUES, J. M. X.; GATTO, D. A.; MELO, R. R. Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por meio de métodos destrutivo e não-destrutivo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 3, n. 2, p. 145-150, 2008.

STANGERLIN, D. M.; GATTO, D. A.; MELO, R. R.; CALEGARI, L.; VIVIAN, A. M.; CASTELO, P. A. R.; BELTRAME, R. Uso do ultrassom para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de *Peltophorum dubium*. **Ciência da Madeira**, v. 1, p. 44-53, 2010.

STEVENSON, S. A.; EL ANSARY, A. M.; KOPP, G. A. A practical modelling technique to assess the performance of wood-frame roofs under extreme wind loads. **Engineering Structures**, v. 191, p. 640–648, 15 jul. 2019.

SUDAM/IPT - Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia – SUDAM/ Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. **Grupamento de espécies tropicais da Amazônia por similaridade de características básicas e por utilização.**, Belém, 237p, 1981.

TAM, J. H.; ONG, Z. C.; ISMAIL, Z.; ANG, B. C.; KHOO, S. Y. Identification of material properties of composite materials using nondestructive vibrational evaluation approaches: A review. **Mechanics of Advanced Materials and Structures**, v. 24, n. 12, p. 971–986, 10 set.

2017.

TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola - Jaboticabal**, v. 25, n. 2, p. 291–299, 2005.

TER STEEGE, H.; VAESSEN, R. W.; LÓPES, D. C.; SABATIER, D.; ANTONELLI, A.; OLIVEIRA, S. M.; PITMAN, N. C. A.; JORGENSEN, P. M.; SALOMÃO, R. P. The discovery of the Amazonian tree flora with an updated checklist of all known tree taxa. **Scientific Reports**, v. 6, 13 jul. 2016.

TREVISAN, H.; TIEPPO, F. M. M.; CARVALHO, A. G.; LELIS, R. C. C. Avaliação de propriedades físicas e mecânicas da madeira de cinco espécies florestais em função da deterioração em dois ambientes. **Árvore**, v. 31, n. 1, 2007.

TUISIMA-CORAL, L. L.; ODICIO-GUEVARA, J. E.; WEBER, J. C.; LLUNCOR-MENDONZA, D., LOJKA, BOHDAN. Variación de las propiedades físicas en troncos de Guazuma crinita, una especie maderable en el Amazonas Peruano. **Madera Bosques**, v. 23, n. 1, p. 53–61, 2017.

VIALA, R.; PLACET, V.; COGAN, S. Simultaneous non-destructive identification of multiple elastic and damping properties of spruce tonewood to improve grading. **Journal of Cultural Heritage**, v. 42, p. 108–116, 1 mar. 2020.

VIVIAN, M. A.; MODES, K. S.; SANTINI, E. J.; CARVALHO, D. E.; MORAIS, W. W. C.; SOUZA, J. T.; GATTO, D. A. Estimativa dos módulos de elasticidade e ruptura da madeira de eucalyptus cloeziana f. muell por meio de método não destrutivo. **Ciência da Madeira**, v. 3, n. 2, p. 91–101, 2012.

WOLFE, R. W.; MCCARTHY, M. STRUCTURAL PERFORMANCE OF LIGHT-FRAME ROOF ASSEMBLIES I. Truss Assemblies With High Truss Stiffness Variability. **Forest Products Laboratory**, FPL-RP-492, 1989.

YANG, J. L.; EVANS, R. Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density. **Holz als Roh - und Werkstoff**, v. 61, n. 6, p. 449–452, 2003.

YANG, Z.; JIANG, Z.; HSE, C. Y.; LIU, R. Assessing the impact of wood decay fungi on the modulus of elasticity of slash pine (*Pinus elliottii*) by stress wave non-destructive testing. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 117, p. 123–127, 1 fev. 2017.

ZANGIÁCOMO, A. L.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Elasticity moduli in round wooden beams of *Pinus caribaea*. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 36, n. 3, p. 566–570, 2016.