REVISTA MATÉRIA V.30
ISSN 1517-7076 artigos e20250734, 2025

Avaliação do índice de confiabilidade de projetos de treliças planas industrializadas de madeira

Reliability index assessment of industrialized timber plane truss designs

Melissa Canalli Joaquim[1], Iuri Fazolin Fraga[1], André Luis Christoforo[1], Victor Almeida de Araujo[2], Herisson Ferreira dos Santos[3]

[1]Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, São Carlos, SP, Brasil.

[2]Universidade Estadual Paulista, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Ilha Solteira, SP, Brasil.

[3]Instituto Federal de Rondônia, Departamento de Pesquisa, Ariquemes RO, Brasil.

e-mail: melissacanalli5@gmail.com, iurifraga@outlook.com, christoforoal@yahoo.com.br, va.araujo@unesp.br, herisson.santos@ifro.edu.br

RESUMO

Devido a relação entre resistência mecânica e peso específico, excelente desempenho térmico e acústico e baixo impacto ambiental se comparados com o aço e concreto armado, a madeira vem sendo crescentemente utilizada na construção. No Brasil, a madeira tem sido frequentemente considerada para o projeto de estruturas de cobertura, especialmente em treliças planas industrializadas. Entretanto, a instabilidade em compressão no eixo de menor momento de inércia consiste em um fator crítico no dimensionamento, podendo impactar negativamente na análise da confiabilidade estrutural devido à espessura reduzida dos elementos de barra componentes. Assim, esta pesquisa visou avaliar a confiabilidade estrutural de estruturas de treliças planas industrializadas de madeira da espécie *Eucalyptus saligna* considerando-se três tipologias: Howe, Pratt e Fink. A metodologia se centrou na Simulação de Monte Carlo para obter índices de confiabilidade e comparar com os índices mínimos exigidos pela norma europeia EN 1990, visando analisar a segurança estrutural dessas treliças em aplicações típicas na construção. Os resultados revelaram que nenhuma das três tipologias atingiu o índice mínimo de confiabilidade estabelecido pela norma europeia, fato esse que requer a atenção de projetistas e de normalizadores e justifica a importância da adoção de reforços estruturais e do aumento da espessura dos componentes.

Palavras-chave: Treliças planas; Madeira folhosa; Confiabilidade estrutural; Simulação de Monte Carlo.

ABSTRACT

Due to the relationship between mechanical strength and specific weight, excellent thermal and acoustic performance, and lower environmental impact compared to steel and reinforced concrete, wood has been increasingly used in construction. In Brazil, timber has often been considered for the design of roof structures, especially in industrialized trusses. However, compression instability about the axis with the smaller moment of inertia is a critical factor in the design, which can negatively affect the structural reliability analysis of the wood due to the reduced thickness of the constituent bar elements. Thus, this research aimed to evaluate the structural reliability of industrialized timber planar truss structures of the species *Eucalyptus saligna*, considering three typologies: Howe, Pratt, and Fink. The methodology focused on Monte Carlo Simulation to obtain reliability indices and compare them with the minimum indices required by the European standard EN 1990, aiming to analyze the structural safety of these trusses in typical applications in construction. The results showed that none of the three typologies reached the minimum reliability index established by the European standard, a fact that requires the attention of designers and standardization bodies and justifies the importance of adopting structural reinforcements and increasing the thickness of the components.

Keywords: Planar trusses; Hardwood timber; Structural reliability; Monte Carlo simulation.

Autor Responsável: André Luis Christoforo Data de envio 28/08/2025 Data de aceite 04/11/2025

DOI: https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2025-0734

(cc) BY

1. INTRODUÇÃO

Na construção civil, a madeira desempenha um importante papel ao longo do tempo – sendo um dos materiais mais antigos utilizados segundo PFEIL e PFEIL [1] e DE ARAUJO [2]. A madeira tem uma ótima relação entre resistência mecânica e densidade e um excelente desempenho térmico e acústico, sendo muito utilizada em diversos países ao redor do mundo (RAMAGE *et al.* [3]).

Observa-se atualmente um movimento significativo de expansão nos países do Hemisfério Sul, como Brasil, Chile, Nova Zelândia e Austrália, que vêm intensificando o uso de madeira nas construções (DE ARAUJO *et al.* [4]). Apesar do preconceito histórico e cultural devido à desinformação sobre o seu desempenho conforme levantaram DE ARAUJO *et al.* [5], o Brasil vem aprimorando as tecnologias de beneficiamento da madeira ao longo dos últimos anos, fato este que tem impactado em uma nova fase da construção civil no país (CMA [6]).

Dentre as aplicações estruturais mais comuns da madeira no país, destacam-se as treliças planas industrializadas, amplamente empregadas em coberturas leves devido à facilidade de produção em escala e ao bom desempenho mecânico, fabricadas com espécies de madeiras de florestas plantadas, como são os casos do eucalipto e pinus. No entanto, pesquisas (FERREIRA [7]; FRAGA [8]; GOMES *et al.* [9]) indicam que a instabilidade em compressão no eixo de menor inércia dos elementos de barra das treliças industrializadas é um fator crítico no dimensionamento, podendo afetar negativamente a confiabilidade estrutural devido à espessura reduzida dos componentes. A Figura 1 apresenta um exemplo real dessa instabilidade, a flambagem do banzo superior de uma treliça de madeira de um edifício, ilustrando de forma prática os riscos estruturais decorrentes de dimensionamentos inadequados.

No Brasil, os projetos de estruturas de madeira são regidos pela ABNT NBR 7190 (2022) [10] e pela ABNT NBR 16936 (2023) [11] voltada para o sistema construtivo light-woodframe. Diante disso, é relevante desenvolver pesquisas que estejam alinhadas com as normas vigentes e que garantam um uso racional desse material. A ABNT NBR 7190 (2022) [10] determina que as peças principais isoladas, como vigas e barras longitudinais das treliças, devem ter espessura mínima de 5 cm, um valor considerado comum no mercado técnico brasileiro.

A confiabilidade desempenha um papel fundamental na avaliação da segurança e da estabilidade estrutural, especialmente em sistemas complexos como é o caso das treliças planas industrializadas de madeira.



Figura 1: Flambagem do banzo superior de uma treliça de madeira de um edifício.

A confiabilidade estrutural consiste em assegurar que a resistência de uma estrutura ou de seus componentes seja superior às ações atuantes ao longo de toda a sua vida útil. No entanto, devido às incertezas inerentes tanto à resistência dos materiais quanto aos carregamentos aplicados, sempre há uma probabilidade associada de falha. Dessa forma, a segurança estrutural não pode ser garantida de maneira determinística, sendo expressa por meio de uma abordagem probabilística, na qual a confiabilidade corresponde à probabilidade de a resistência superar os efeitos das ações solicitantes (QUADROS e VIEIRA [12]).

A norma brasileira ABNT NBR 7190 (2022) [10] não contempla diretamente os índices de confiabilidade-alvo (β). Já o documento normativo europeu EN 1990 [13] traz os valores limites para o índice de confiabilidade mediante uma classificação das Classes de Consequências (CC). Na Tabela 1 são apresentadas as definições das Classes de Consequências (CC), e, na Tabela 2, as relações das classes de confiabilidade (RC), estabelecidas após a classificação da edificação, com os respectivos valores mínimos ou valores alvo recomendados para o índice de confiabilidade (β), que naturalmente devem ser considerados no projeto de estruturas de madeira, e, mais especificamente, no projeto das treliças planas industrializadas de madeira.

Tabela 1: Definição das Classes de Consequências (CC).

CLASSE DE CONSEQUÊNCIA	DESCRIÇÃO	EXEMPLOS NA ENGENHARIA CIVIL
CC3	Consequência alta para perda de vidas humanas e alta chance de consequências econômicas, sociais ou ambientais	Edifícios públicos com altas chances de consequências de falhas
CC2	Consequência média para perda de vidas humanas e média chance de consequências econômicas, sociais ou ambientais	Edifícios residenciais e comerciais, edifícios públicos com médias chances de consequências de falhas
CC1	Consequência baixa para perda de vidas humanas e baixa chance de consequências econômicas, sociais ou ambientais	Edificações agrícolas sem presença de pessoas rotineiramente

Tabela 2: Valores mínimos recomendados para o índice de confiabilidade (β).

CLASSE DE CONFIABILIDADE	VALORES MÍNIMOS DE β NO PERÍODO DE 1 ANO	VALORES MÍNIMOS DE β NO PERÍODO DE 50 ANOS
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

Fonte: Adaptado de EN 1990 [13].

Dentre as técnicas probabilísticas aplicadas à avaliação da confiabilidade estrutural, destaca-se a Simulação de Monte Carlo, que permite modelar incertezas com base em variáveis aleatórias. Segundo BECK [14], a SMC é amplamente utilizada na comunidade científica por sua capacidade de resolver problemas complexos, tanto lineares quanto não lineares, com base em números aleatórios gerados conforme distribuições de probabilidade previamente definidas.

Diante deste contexto e com base na técnica SMC, a presente pesquisa tem como objetivo analisar a confiabilidade estrutural de treliças planas industrializadas de madeira de três tipologias distintas, de maneira a avaliar se os índices de confiabilidade atendem aos parâmetros estabelecidos pela norma europeia EN 1990.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Geometria

Para avaliar a confiabilidade estrutural de treliças planas industrializadas de madeira, foram analisadas três tipologias: Howe (Figura 2), Pratt (Figura 3) e Fink (Figura 4). Além disso, para abranger diferentes condições de carregamento e esforços, foram considerados dois vãos, de 5 e de 10 metros. Cabe destacar que os vãos considerados são presentes em estruturas de madeira de pequeno e médio porte.

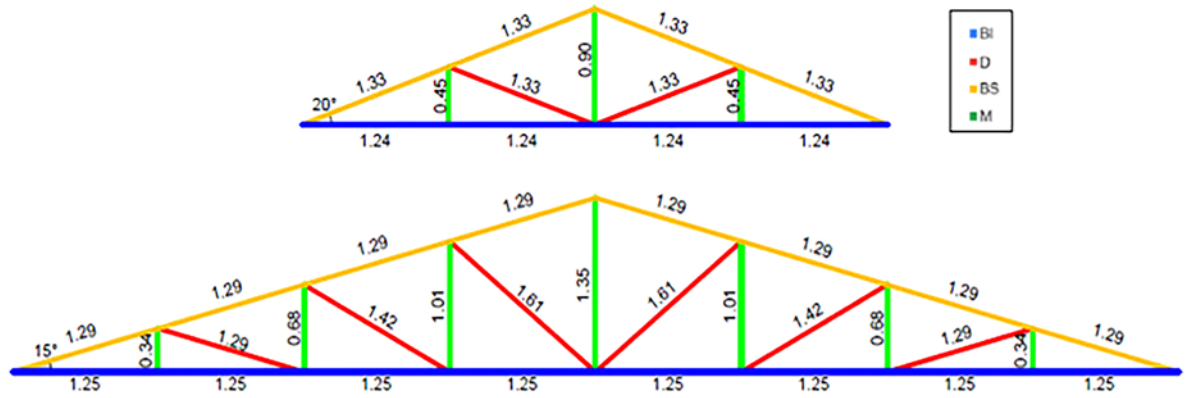


Figura 2: Geometria das treliças Howe e dimensões dos elementos de barra em metros.

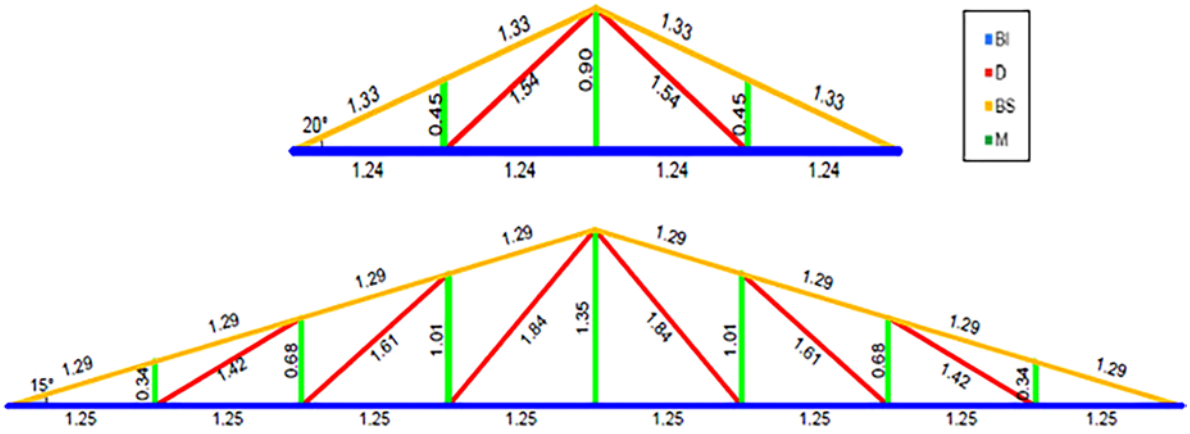


Figura 3: Geometria das treliças Pratt e dimensões dos elementos de barra em metros.

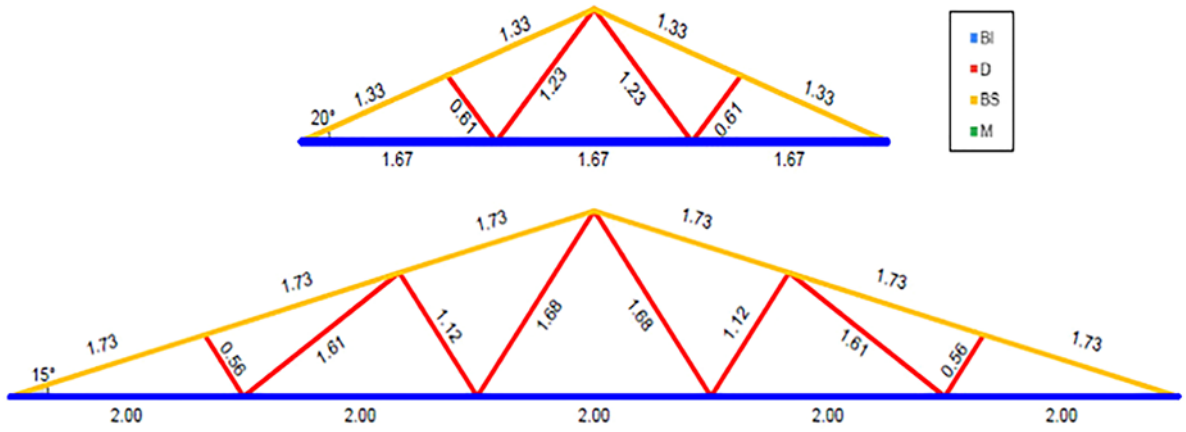


Figura 4: Geometria das treliças Fink e dimensões dos elementos de barra em metros.

A partir de catálogos específicos de fabricantes, determinou-se as categorias das telhas e os intervalos de inclinação entre os banzos. No vão menor, optou-se por telhas cerâmicas com inclinação estabelecida em 36% (aproximadamente 20º), enquanto no vão maior utilizou-se telhas de fibrocimento, com inclinação de 27% (cerca de 15°).

Cabe ressaltar que as telhas cerâmicas precisam de um sistema adicional de caibros e ripas para sua fixação, pois suas dimensões são significativamente menores que o espaçamento entre as terças. Por outro lado, essa estrutura não é necessária para as telhas de fibrocimento, que são apoiadas diretamente sobre as terças, resultado de uma maior simplicidade construtiva.

2.2. Ações e carregamentos

Ações e carregamentos, que são divididos em permanentes e variáveis, foram considerados conforme as normas ABNT NBR 6120 (2019) [15] e ABNT NBR 6123 (2023) [16], enquanto seus coeficientes de ponderação (γ), os fatores de combinação (ψ_0) e os fatores de redução (ψ_1 e ψ_2) foram extraídos da ABNT NBR 8681 (2003) [17].

As ações permanentes na treliça incluem o peso próprio da estrutura e dos materiais fixos, como terças, ripas e caibros. Para dimensionamento estrutural, foi utilizado o software iTruss, desenvolvido por FRAGA [18], que incorpora todas essas rotinas normativas. Além disso, considerou-se os pesos das telhas como ações permanentes, sendo 650 N/m^2 para telhas cerâmicas e 180 N/m^2 para telhas de fibrocimento.

As ações variáveis compreendem a ação do vento e a sobrecarga na cobertura. De acordo com o item 6.4 da ABNT NBR 6120 (2019) [15], pode-se considerar uma carga variável uniformemente distribuída de 0,25 kN/m^2 (250 N/m^2), independentemente da inclinação da cobertura, desde que esta seja igual ou superior a 1%.

Já a quantificação da ação do vento na estrutura foi realizada conforme as diretrizes da norma ABNT NBR 6123 (2023) [16], considerando um edifício com planta retangular e telhado simétrico de duas águas. Nas Figuras 5 e 6 são apresentadas a planta baixa, o corte transversal e o esquema de aberturas adotados para as duas situações de projeto: vão de 5 metros (Figura 5) e vão de 10 metros (Figura 6). Os parâmetros utilizados no cálculo da pressão dinâmica do vento seguem as diretrizes da ABNT NBR 6123 (2023) [16].

A edificação em análise consiste em um depósito/silo localizado em zona rural do município de São Carlos, na região centro-leste do estado de São Paulo, Brasil. Para a análise, foi adotado um valor da velocidade básica do vento de $V_0 = 40$ m/s. De acordo com a norma ABNT NBR 6123 (2023) [16], considerou-se topografia plana, com categoria de rugosidade III, compatível com áreas rurais com vegetação esparsa e edificações isoladas. O fator estatístico adotado corresponde ao de estruturas sem ocupação humana e sem circulação de pessoas no entorno, aplicável a construções de baixa importância estrutural.

Na análise do projeto proposto, destaca-se a importância das combinações últimas normais, já que apresentam uma maior probabilidade de ocorrência, pois apresentam as condições que a estrutura enfrentará ao longo de sua vida útil.

A norma ABNT NBR 8681 (2003) [17] estabelece a equação para as combinações ELU, representada na Equação 1. Para o ELS, as Equações 2 e 3 representam as deformações ao longo da sua vida útil, retiradas da norma ABNT NBR 7190 (2022) [10].

$$F_d = \sum_{i=1}^{m} \gamma_{gi} F_{Gi,k} + \gamma_q \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^{n} \psi_{0,j} F_{Qj,k} \right] \tag{1}$$

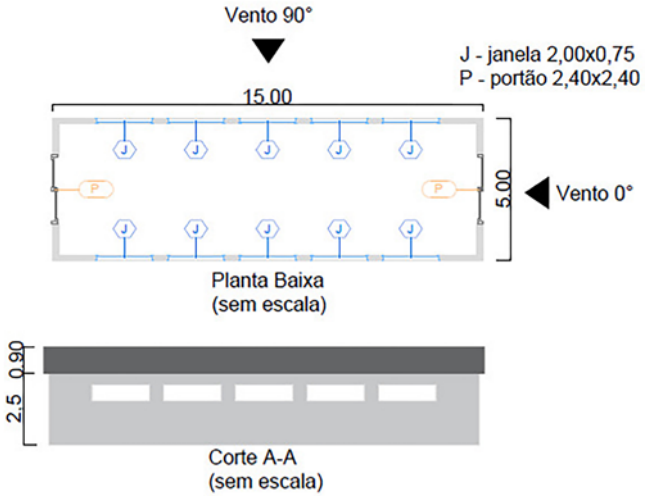


Figura 5: Planta Baixa e corte transversal do edifício com vão de 5 metros.

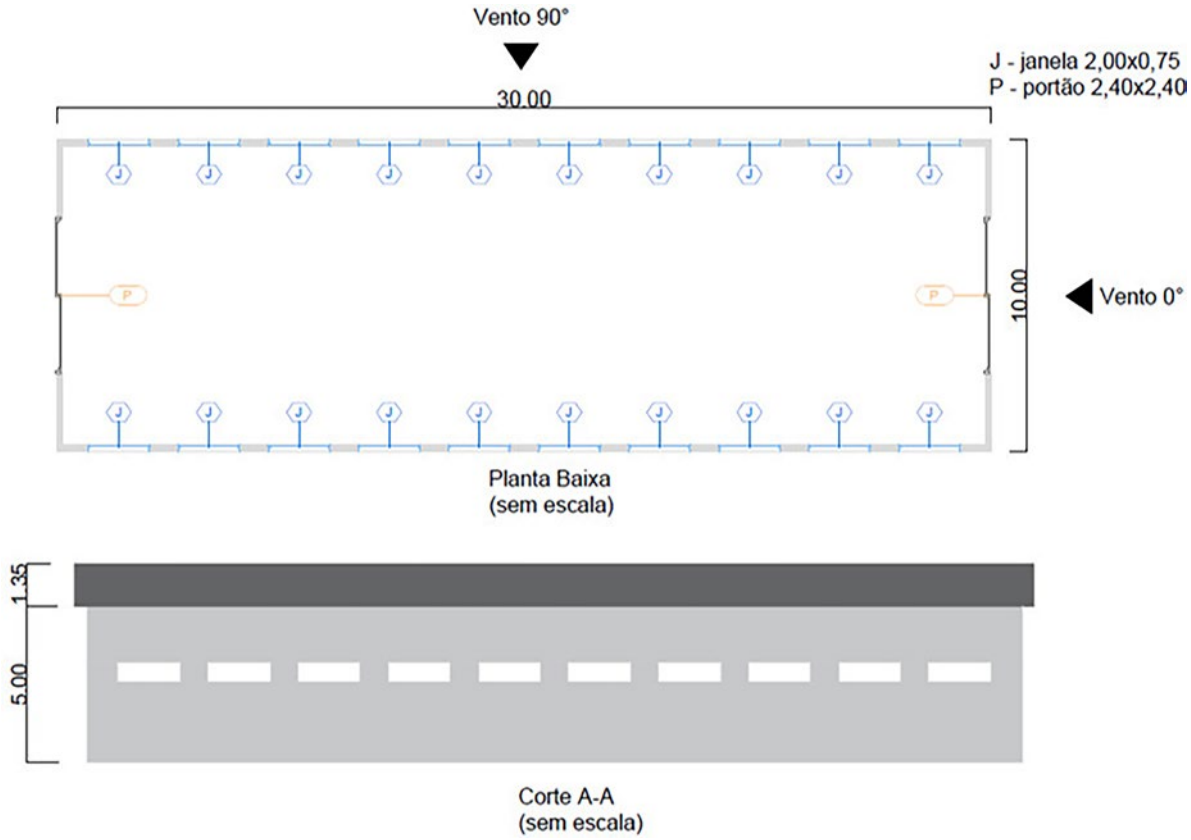


Figura 6: Planta Baixa e corte transversal do edifício com vão de 10 metros.

$$\delta_{inst} = \sum_{i=1}^{m} \delta_{inst,Gi,k} + \delta_{inst,Q1,k} + \sum_{j=2}^{n} \psi_{1j} \delta_{inst,Qj,k} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \delta_{fin} &= \sum_{i=1}^{m} \delta_{fin,Gi,k} + \sum_{j=1}^{n} \delta_{fin,Qj,k} \\ &= \sum_{i=1}^{m} \delta_{inst,Gi,k}(1+\theta) + \sum_{j=1}^{n} \delta_{inst,Qj,k} \psi_{2j}(1+\theta) \end{aligned} \tag{3}$$

onde:

F_d = esforço solicitante de cálculo [N/m^2]
γ_g = coeficiente de ponderação das ações permanentes [adimensional]
$F_{Gi,k}$ = valor característico das ações permanentes [N/m^2]
γ_q = coeficiente de ponderação das ações variáveis [adimensional]
$F_{Q1,k}$ = valor característico da ação variável considerada como principal [N/m^2]
$\psi_{0,j} F_{Qj,k}$ = valor reduzido de combinação de cada ação variável [adimensional]
δ_{inst} = deslocamento instantâneo [mm]
$\delta_{inst,Gi,k}$ = deslocamento instantâneo das ações permanentes [mm]
$\delta_{inst,Q1,k}$ = deslocamento instantâneo das ações variáveis [mm]
ψ_{1j} = fator de redução [adimensional]
δ_{fin} = deslocamento final [mm]
ψ_{2j} = fator de redução [adimensional]
θ = coeficiente de fluência da madeira (Tabela 20 da ABNT NBR 7190 [10]) [adimensional]

2.3. Dimensionamento

O software iTruss, desenvolvido por FRAGA [18], utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) para analisar treliças planas de coberturas. Este automaticamente identifica as combinações críticas de ações no ELU (Estado Limite Útil) e ELS (Estado Limite de Serviço) com base nos coeficientes e fatores fornecidos. Para a equação das combinações, tem-se a Tabela 3, para as treliças de vãos de 5 metros, e a Tabela 4, para as de 10 metros.

Tabela 3: Combinações Críticas de Esforços no ELU e Deslocamentos no ELS – Vãos de 5 metros.

ESTADO LIMITE	EQUAÇÕES
ELU	$F_d = 1{,}4F_G + 1{,}5F_{Q,AU} + (1{,}4 * 0{,}6) * F_{QW,90°(+)}$
ELS	$\delta_{inst} = \delta_{inst,G} + \delta_{inst,Q,AU}$
ELS	$\delta_{fin} = \delta_{inst,G}(1 + \theta) + 0{,}3\delta_{inst,Q,AU}(1 + \theta)$

Tabela 4: Combinações Críticas de Esforços no ELU e Deslocamentos no ELS – Vãos de 10 metros.

ESTADO LIMITE	EQUAÇÕES
ELU	$F_{d,1} = 1{,}4F_G + 1{,}5F_{Q,AU} + (1{,}4 * 0{,}6) * F_{QW,0°(+)}$
ELU	$F_{d,2} = 1{,}0F_G + 1{,}4F_{QW,0°(-)}$
ELU	$F_{d,3} = 1{,}0F_G + 1{,}4F_{QW,90°(-)}$
ELS	$\delta_{inst} = \delta_{inst,G} + \delta_{inst,Q,AU}$
ELS	$\delta_{fin} = \delta_{inst,G}(1 + \theta) + 0{,}3\delta_{inst,Q,AU}(1 + \theta)$

onde:

F_d = esforço solicitante de cálculo [N/m^2]

F_G = esforço das ações permanentes [N/m^2]

$F_{Q,AU}$ = esforço das ações variáveis acidentais de utilização [N/m^2]

F_{QW} = esforço das ações variáveis do vento [N/m^2]

δ_{inst} = deslocamento instantâneo [mm]

$\delta_{inst,G}$ = deslocamento instantâneo das ações permanentes [mm]

$\delta_{inst,Q,AU}$ = deslocamento instantâneo das ações variáveis acidentais de utilização [mm]

δ_{fin} = deslocamento final [mm]

θ = coeficiente de fluência da madeira (Tabela 20 da ABNT NBR 7190 [10]) [adimensional]

Inicialmente, utilizou-se os mesmos perfis para as peças das treliças (banzos, diagonais e montantes) com espessura de 5 centímetros e altura de 11 centímetros. Segundo as dimensões de peças de madeira da norma ABNT NBR 14807 (2002) [19], as terças foram dimensionadas com 50 × 150 milímetros. Já para as treliças com telhas cerâmicas (vãos menores), ainda há as ripas com 15 × 50 milímetros e os caibros de 50 × 50 milímetros.

Os efeitos de sucção do vento foram desconsiderados no ELU nas treliças com vão de 5 metros, pois em coberturas com telhas cerâmicas não fixadas ou não amarradas, segundo MOLITERNO [20], a ação de sucção torna-se irrelevante. Como nas telhas de fibrocimento há essa fixação, a ação de sucção foi considerada. No ELS, apenas as ações permanentes e de uso foram mantidas, pois o vento tem curta duração e não compromete o uso da estrutura (CALIL JUNIOR *et al.* [21]).

2.4. Análise de confiabilidade

Após a geometria e o dimensionamento das estruturas prontas, necessita-se definir as variáveis aleatórias e a configuração necessária para a aplicação da Simulação de Monte Carlo (SMC).

As variáveis aleatórias e os parâmetros necessários para as simulações foram obtidos com base em uma revisão bibliográfica da literatura. Para as variáveis dimensionais b (base) e h (altura), alguns autores utilizam como base o trabalho de KÖHLER *et al.* [22], as diretrizes do Comitê Conjunto sobre Segurança Estrutural (JCSS [23]) e os resultados da pesquisa de SANTIAGO *et al.* [24], que contribuíram com distribuições de probabilidade para ações baseadas em normas brasileiras.

Por conta da ampla disponibilidade de florestas plantadas no Brasil, a madeira da espécie Eucalyptus saligna foi escolhida na realização das simulações. Os parâmetros utilizados nas análises de confiabilidade (Tabela 5) foram baseados nos valores da densidade aparente, resistência e rigidez fornecidos na pesquisa de NOGUEIRA *et al.* [25].

Tabela 5: Distribuições de probabilidade e parâmetros adotados.

VARIÁVEL	DISTRIBUIÇÃO	X (MÉDIA)	CV (%)	REFERÊNCIA
b (*mm*)	Normal	50	$\frac{2}{b}*100$	JCSS [23]; KÖHLER *et al*. [22]
h (*mm*)	Normal	110 a 300	$\frac{2}{h}*100$	JCSS [23]; KÖHLER *et al*. [22]
g (N/m^2)	Normal	Cerâmicas:689 Fibrocimento:191	12,0	SANTIAGO *et al*. [24]
q (N/m^2)	Gumbel	250	40,0	SANTIAGO *et al*. [24]
f_{co} (*MPa*)	Normal	46,8	30,6	NOGUEIRA *et al*. [25]
f_{to} (*MPa*)	Normal	95,5	46,5	NOGUEIRA *et al*. [25]
E_{co} (*MPa*)	Normal	15261	29,1	NOGUEIRA *et al*. [25]
E_{to} (*MPa*)	Normal	15981	30,9	NOGUEIRA *et al*. [25]
ρ (kg/m^3)	Normal	730	21,9	NOGUEIRA *et al*. [25]

onde:

b (*mm*) = espessura do perfil

h (*mm*) = altura ou largura do perfil

g (N/m^2) = peso das telhas

q (N/m^2) = ação variável acidental de utilização (período de referência de 50 anos)

f_{co} (*Mpa*) = valor característico da resistência à compressão

f_{to} (*Mpa*) = valor característico da resistência à tração

E_{co} (*Mpa*) = valor médio do módulo de elasticidade na compressão

E_{to} (*Mpa*) = valor médio do módulo de elasticidade na tração

ρ (kg/m^3) = densidade aparente (12% de umidade)

Por fim, processou-se todas as diretrizes mencionadas no software iTruss, o que resultou nos perfis comerciais para cada barra das treliças apresentados na Tabela 6, em que BI consiste no banzo inferior, BS é o banzo superior, D designa as barras posicionadas nas diagonais e M são os montantes.

Tabela 6: Relação de perfis dimensionados para as treliças em milímetros.

PEÇA	HOWE E PRATT COM VÃO DE 5 METROS	HOWE E PRATT COM VÃO DE 10 METROS	FINK COM VÃO DE 5 METROS	FINK COM VÃO DE 10 METROS
BI	50 × 110	50 × 150	50 × 110	50 × 200
D	50 × 110	50 × 110	50 × 110	50 × 110
BS	50 × 150	50 × 200	50 × 150	50 × 300
M	50 × 110	50 × 110	–	–

2.5. Simulação de Monte Carlo

A simulação é uma técnica utilizada para reproduzir o comportamento de sistemas reais por meio de modelos matemáticos. Na engenharia, ela permite prever o desempenho de sistemas a partir da variação de seus parâmetros. A Simulação de Monte Carlo (SMC) é uma metodologia aplicada a problemas com variáveis aleatórias, utilizando amostras geradas aleatoriamente com base em distribuições de probabilidade definidas. Repetindo-se o processo de simulação diversas vezes, obtém-se uma amostra de respostas que permite análises estatísticas, como o cálculo de médias, variâncias e probabilidades de falha.

A SMC configura-se como uma ferramenta robusta para a avaliação do desempenho estrutural, proporcionando uma análise mais realista e estatisticamente fundamentada das incertezas envolvidas. Sua aplicação é especialmente relevante para o cálculo da confiabilidade estrutural e para a calibração de normas técnicas de projeto, garantindo que os índices de confiabilidade estabelecidos sejam atingidos (QUADROS e VIEIRA [12]).

Neste trabalho, a Simulação de Monte Carlo foi utilizada para estimar a confiabilidade estrutural, permitindo a modelagem das incertezas associadas às propriedades da madeira, bem como às ações e carregamentos considerados no projeto. Na presente pesquisa, optou-se por realizar 200.000 simulações visando garantir maior precisão nos resultados obtidos, cabendo destacar que, na pesquisa de FRAGA [8], foi-se utilizada uma abordagem semelhante, onde o autor iniciou as simulações com 10.000 amostras, com aumentos progressivos de 10.000 em cada próxima simulação até alcançar 150.000 amostras.

Cabe destacar que todas as simulações foram desenvolvidas com a linguagem de programação Python, por meio da plataforma Jupyter Notebook. As análises foram realizadas em um computador pessoal, de processador Intel® Core™ i7-10510U CPU, 8 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 10 de 64 bits. Em média, para cada treliça de vão de 5 metros, foi necessário uma média de 2 horas e 21 minutos, enquanto para os vãos maiores, a média foi de 9 horas e 25 minutos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pelo software iTruss, têm-se as combinações mais críticas para cada treliça, as quais estão detalhadas nas Tabelas 3 e 4, no tópico anterior 3.3 acerca do dimensionamento. Com isso, tem-se os índices de confiabilidade nas situações mais críticas da estrutura decorrentes da Simulação de Monte Carlo. Como a edificação foi considerada em zona rural, sem ocupação humana, de acordo com a Tabela 1, esta é categorizada como sendo de Classe de Consequência CC1, sendo de 3,3 (RC1) o valor mínimo do índice de confiabilidade no período de 50 anos. Nas Figuras 7, 8 e 9 são apresentados os resultados dos índices de confiabilidade β obtidos de acordo com as barras das treliças, cabendo destacar que BI, BS, D e M consistem nas barras posicionadas nos banzo superior, no banzo inferior, na diagonal e no montante, respectivamente.

Observa-se que nenhuma das estruturas atingiu o mínimo (3,3; RC1) exigido pelo documento normativo europeu EN 1990 (2002). Esse índice representa uma medida de segurança da estrutura em relação às incertezas do projeto, como as variações das cargas aplicadas e as propriedades dos materiais. Isso indica que a confiabilidade dos elementos já está comprometida, indicando que o nível de segurança está abaixo do recomendado para estruturas localizadas em zona rural. Entretanto, isso não significa que a estrutura está em risco iminente de colapso ou de atingir o Estado Limite Último (ELU), mas, isso revela que o nível de segurança é inferior ao desejável, o que requer a atenção dos projetistas e também dos normalizadores, já que as peças foram dimensionadas com a espessura mínima de 5 centímetros como exposto na norma técnica europeia.

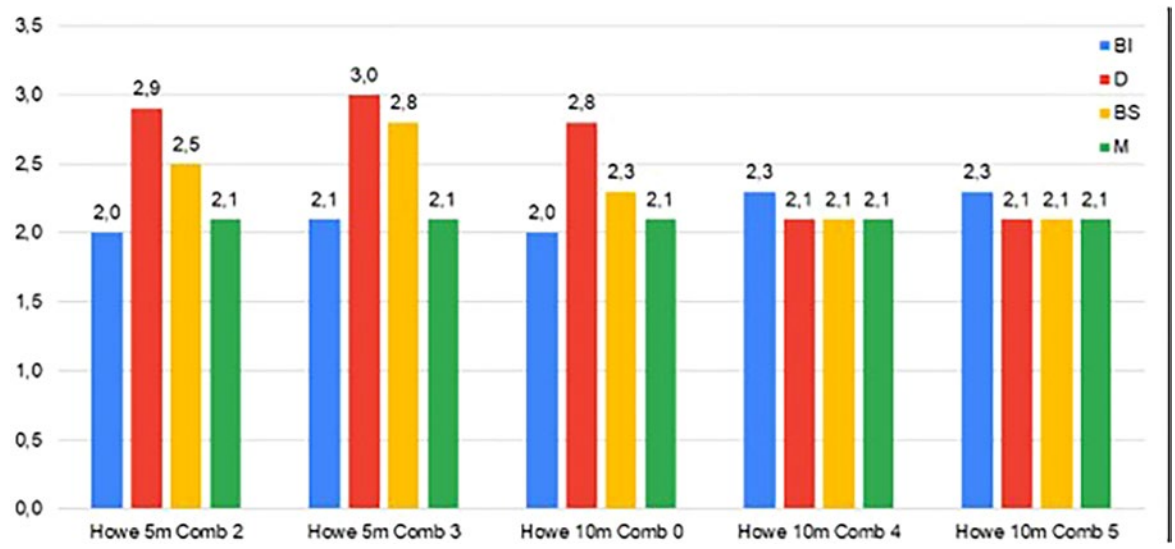


Figura 7: Resultados dos índices de confiabilidade (β) da treliça Howe para cada combinação de acordo com os vãos de 5 metros e 10 metros.

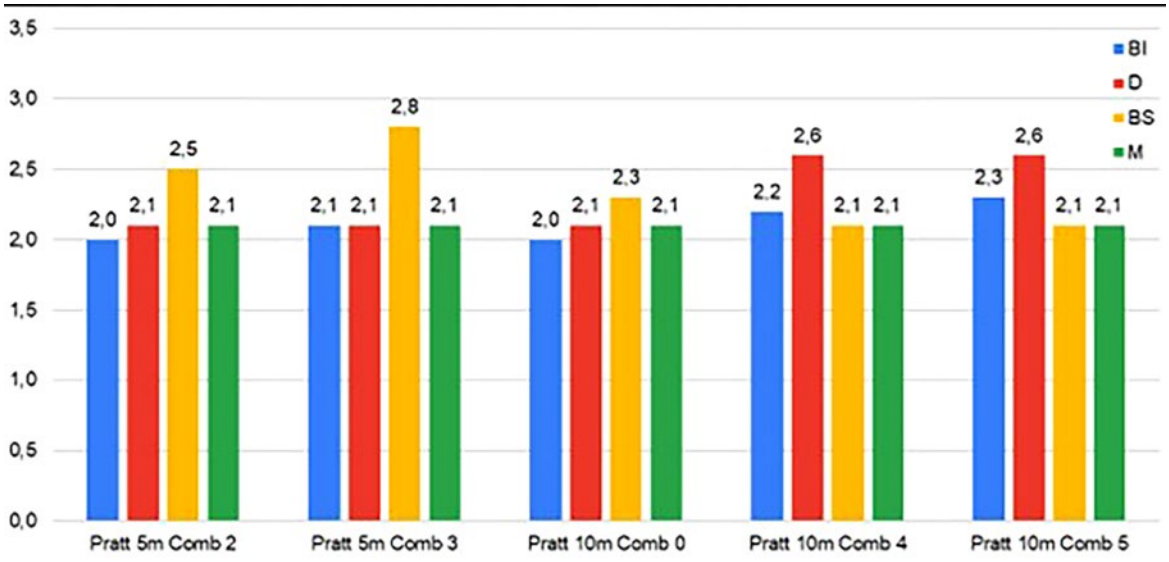


Figura 8: Resultados dos índices de confiabilidade (β) da treliça Howe para cada combinação de acordo com os vãos de 5 metros e 10 metros.

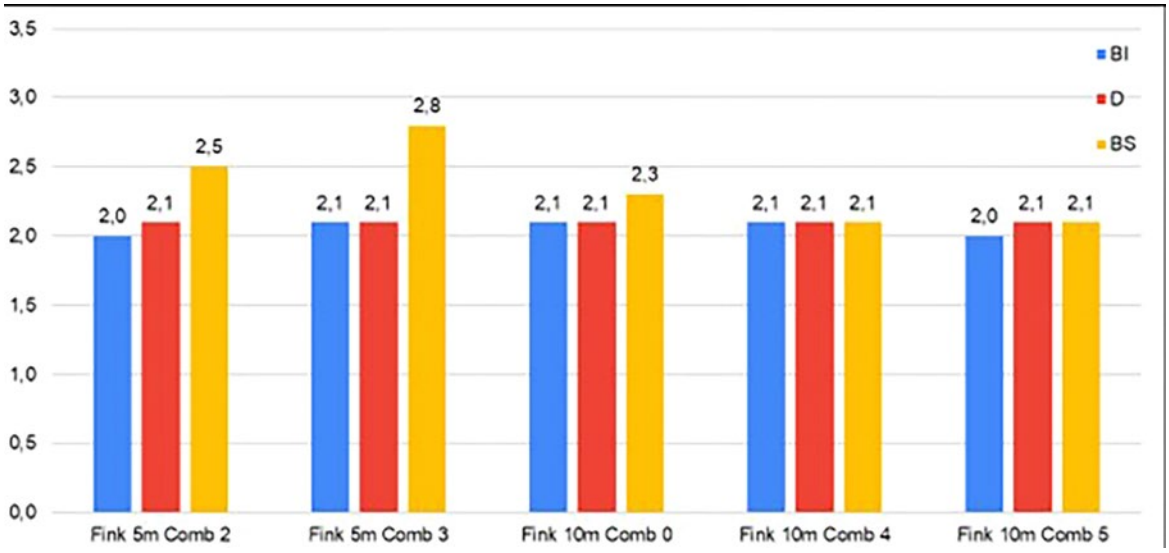


Figura 9: Resultados dos índices de confiabilidade (β) da treliça Howe para cada combinação de acordo com os vãos de 5 metros e 10 metros.

Para uma conclusão com base nos perfis dimensionados, as médias dos índices de confiabilidade das combinações para cada tipo de treliça são apresentadas nas Figuras 10 e 11. As treliças com vão de 5 metros apresentaram probabilidade de falhas semelhantes, com destaque para a diagonal da Howe, que apresentou a menor probabilidade de falha (0,14%), e em seguida dos banzos superiores, com 0,35% de chance.

Já as treliças com vão de 10 metros apresentaram, também, probabilidade de falhas semelhantes, com destaque para a diagonal da Pratt, que apresentou a menor probabilidade de falha (0,47%), e, em seguida, dos banzo inferior da Howe, com 1,07% de chance.

Logo, a treliça Fink apresentou as mais altas probabilidades de falhas em todos os componentes, indicando que esta não é a melhor tipologia construtiva em termos de confiabilidade, sendo necessário reforços adicionais. A Howe apresentou boas configurações nas diagonais e nos banzos superiores para o vão de 5 metros, entretanto, não foi tão boa para vãos maiores. Já a Pratt apresentou boa performance para vãos maiores, estando a diagonal associada aos menores valores de probabilidade entre todas as treliças de 10 metros de vão,

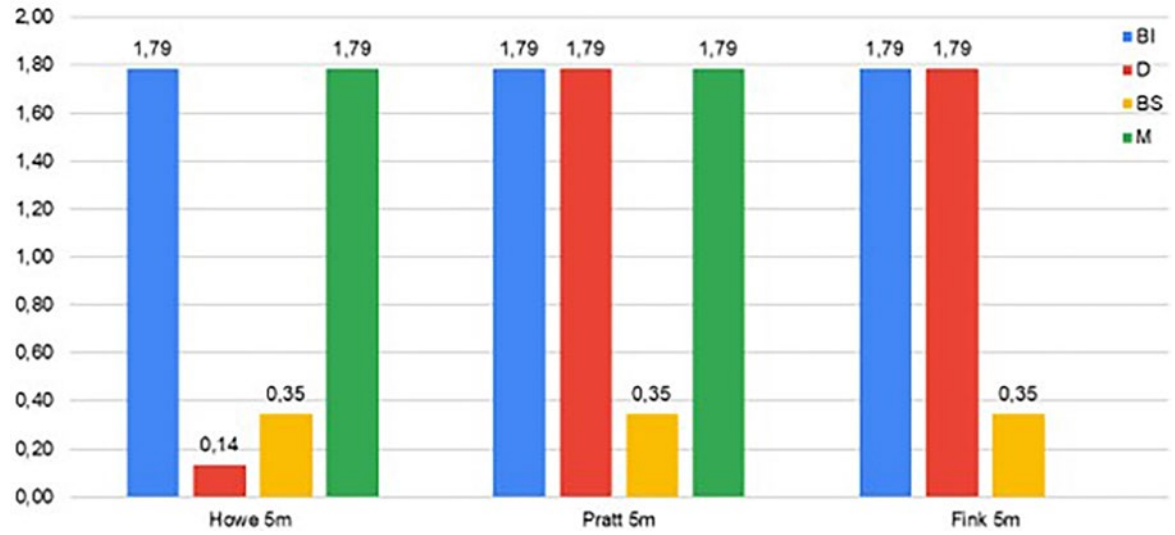


Figura 10: Comparação da probabilidade de falha de cada peça das treliças de 5 metros de vão.

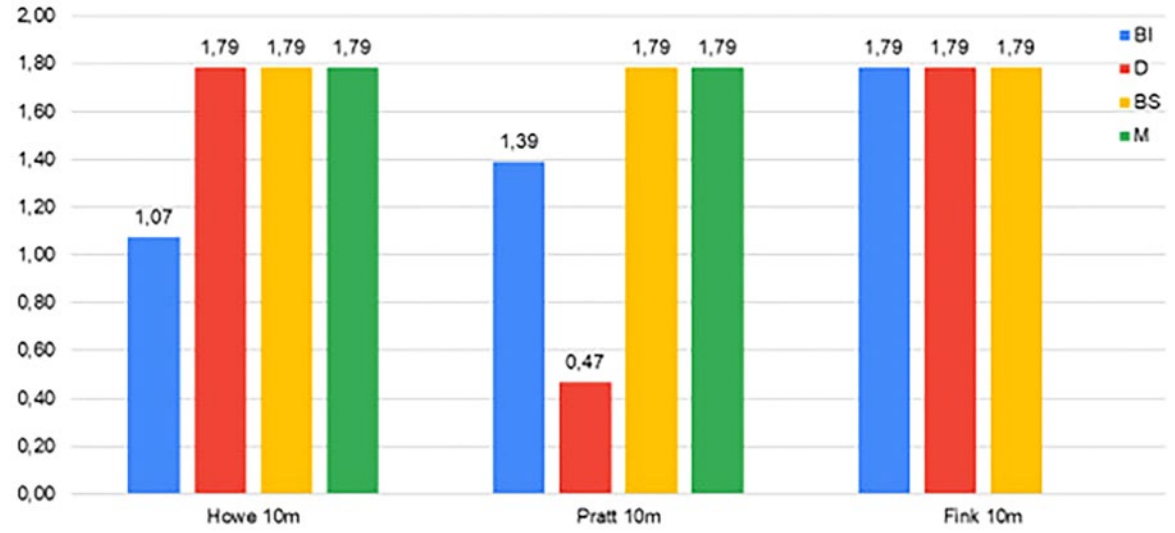


Figura 11: Comparação da probabilidade de falha de cada peça das treliças de 10 metros de vão.

entretanto, sua probabilidade de falha no banzo inferior é maior do que a Howe, sendo necessário um reforço adicional. Os resultados mostram que a opção da treliça Howe em vãos menores apresentou boa performance, sendo a mais utilizada atualmente no Brasil. Já, para vãos maiores, a Howe e Pratt tiveram vantagens semelhantes, com destaque para a diagonal da Pratt.

Apesar do aumento das dimensões nas peças críticas, principalmente na treliça Fink de 10 metros, alguns componentes ainda tiveram valores de probabilidades de falhas elevados (1,79%). Para tanto, um possível estudo complementar com o objetivo de manter a mesma área da seção transversal das barras, mas, variando a espessura e a largura de acordo com dimensões comerciais seria importante para avaliar como o aumento da espessura impactaria na confiabilidade estrutural.

4. CONCLUSÕES

Utilizando a Simulação de Monte Carlo para modelar incertezas, foi possível avaliar a confiabilidade estrutural de treliças com três tipologias: Howe, Pratt e Fink, em vãos de 5 e 10 metros. Os resultados revelaram que nenhuma das seis treliças estudadas atingiram os índices mínimos de confiabilidade estabelecidos pela normativa europeia EN 1990 (2002) [13]. A treliça Howe, mais utilizada no Brasil, destacou-se em vãos menores, mas, a confiabilidade ainda é uma preocupação significativa, especialmente em vãos maiores. As análises mostraram

que a treliça Fink apresentou as maiores probabilidades de falhas, mesmo com o aumento das dimensões dos banzos e diagonais, revelando a necessidade de reforços adicionais para garantir a segurança. Considerando que a norma brasileira determina uma espessura mínima de 5 centímetros, há uma necessidade de pesquisas adicionais sobre a variação da espessura das peças das treliças, a fim de garantir uma confiabilidade mais adequada das estruturas de madeira. Além disso, é importante investigar outros fatores que podem influenciar essa confiabilidade, como a espécie da madeira utilizada, o sistema construtivo adotado e os processos de fabricação das treliças.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Federal de Rondônia (ARI-DEPESP) pelo auxílio financeiro via edital institucional.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] PFEIL, W., PFEIL, M., *Estruturas de madeira*, 6 ed., Rio de Janeiro, LTC, 2003.

[2] DE ARAUJO, V., "Timber construction as a multiple valuable sustainable alternative: main characteristics, challenge remarks and affirmative actions", *International Journal of Construction Management*, v. 23, n. 8, pp. 1334–1343, 2023. doi: https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1969742.

[3] RAMAGE, M., BURRIDGE, H., BUSSE-WICHER, M., *et al.*, "The wood from the trees: The use of timber in construction", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 68, pp. 333–359, 2017. doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107.

[4] DE ARAUJO, V., PRAMREITER, M., CHRISTOFORO, A., "A global policy framework for the circular use of forest biomass as building materials", *Nature Reviews Materials*, v. 10, n. 3, pp. 170–172, 2025. doi: https://doi.org/10.1038/s41578-025-00780-8.

[5] DE ARAUJO, V., VASCONCELOS, J., MORALES, E., *et al.*, "Difficulties of wooden housing production sector in Brazil", *Wood Material Science & Engineering*, v. 15, n. 2, pp. 87–96, 2020. doi: https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1484513.

[6] COMISSÃO DE MEIO AMBIENTE, https://cbic.org.br/sustentabilidade/2023/07/25/construcao-com-madeira-as-oportunidades-no-brasil/, acessado em dezembro de 2024.

[7] FERREIRA, F., "*Influência de variações geométricas no desempenho de treliças de madeira*", Tese de B.Sc., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.

[8] FRAGA, I., "*Análise de confiabilidade em projetos de elementos de treliças planas de madeira considerando a variabilidade da inclinação das fibras*", Tese de D.Sc., Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2024.

[9] GOMES, A., RODRIGUES, E., SILVA, L., *et al.*, "Deslocamentos excessivos em coberturas de madeira como condicionantes de patologias", *Ambiente Construído*, v. 21, n. 3, pp. 147–158, Jul/Sep. 2021. doi: https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000300543.

[10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira*, Rio de Janeiro, ABNT, 2022.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 16936: Edificações em light wood frame*, Rio de Janeiro, ABNT, 2023.

[12] QUADROS, P.A., VIEIRA, R.N.C., "Confiabilidade estrutural: métodos, modelagem e simulação de Monte Carlo", *Caderno Pedagógico*, v. 21, n. 13, Nov. 2024. doi: https://doi.org/10.54033/cadpedv21n13-347.

[13] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, *Eurocode – Basis Of Structural Design*, Brussels, CEN, 1990, https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1990.2002.pdf, acessado em junho de 2025.

[14] BECK, A., *Confiabilidade e segurança das estruturas*, Rio de Janeiro, Elsevier, 2019.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 6120: Ações para cálculo de estruturas de edificações*, Rio de Janeiro, ABNT, 2019.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações*, Rio de Janeiro, ABNT, 2023.

[17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento*, Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

[18] FRAGA, I., "*Influência dos modelos idealizados de ligações no dimensionamento de treliças planas de madeira*", Tese de M.Sc., Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

(cc) BY

[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 14807: Madeira serrada – Dimensões*, Rio de Janeiro, ABNT, 2002.

[20] MOLITERNO, A., *Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeira*, 4 ed., São Paulo, Blücher, 2010.

[21] CALIL JUNIOR, C., LAHR, F., DIAS, A., *et al*., *Estruturas de Madeira: Projetos, Dimensionamento e Exemplos de Cálculo*, 1 ed., Rio de Janeiro, Elsevier, 2019.

[22] KÖHLER, J., SØRENSEN, J.D., FABER, M.H., "Probabilistic modeling of timber structures", *Structural Safety*, v. 29, n. 4, pp. 255–267, 2007. doi: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2006.07.007.

[23] JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY, *Probabilistic Model Code*, https://www.jcss-lc.org/, acessado em fevereiro de 2025.

[24] SANTIAGO, W., KROETZ, H., SANTOS, S., *et al.*, "Reliability-based calibration of main Brazilian structural design codes", *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 17, n. 1, pp. e245, 2020. doi: https://doi.org/10.1590/1679-78255754.

[25] NOGUEIRA, M., ALMEIDA, D., DE ARAUJO, V., *et al.*, "Physical and mechanical properties of Eucalyptus saligna for timber structures", *Ambiente Construído*, v. 19, n. 2, pp. 233–239, Apr/Jun. 2019. doi: https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000200319.