

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

**ANÁLISE DE INFLUÊNCIAS DA INCLUSÃO DE
DESCONTINUIDADES EM CORPOS DE PROVA PARA O ENSAIO DE
TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS**

Tobias Ribeiro Ferreira

São Carlos
2025

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

**ANÁLISE DE INFLUÊNCIAS DA INCLUSÃO DE
DESCONTINUIDADES EM CORPOS DE PROVA PARA O ENSAIO DE
TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS**

Tobias Ribeiro Ferreira

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. André Luis Christoforo

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr

São Carlos
2025

FOLHA DE APROVAÇÃO



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Relatório de Defesa de Tese

Candidato: Tobias Ribeiro Ferreira

Aos 05/12/2025, às 10:00, realizou-se na Universidade Federal de São Carlos, nas formas e termos do Regimento Interno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, a defesa de tese de doutorado sob o título: ANÁLISE DE INFLUÊNCIAS DA INCLUSÃO DE DESCONTINUIDADES EM CORPOS DE PROVA PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS, apresentada pelo candidato Tobias Ribeiro Ferreira. Ao final dos trabalhos, a banca examinadora reuniu-se em sessão reservada para o julgamento, tendo os membros chegado ao seguinte resultado:

Participantes da Banca	Função	Instituição	Conceito	Resultado Final
Prof. Dr. Andre Luis Christoforo	Presidente	UFSCar	Aprovado	<u>Aprovado</u>
Prof. Dr. Afonso Rangel Garcez de Azevedo	Titular	UENF	Aprovado	
Prof. Dr. Victor Almeida de Araujo	Titular	UNESP	Aprovado	
Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho	Titular	UFES	Aprovado	
Prof. Dr. Diego Henrique de Almeida	Titular	UNIR	Aprovado	

Parecer da Comissão Julgadora*:

Os membros da comissão examinadora sugeriram apenas ajustes formais a serem incorporados na versão definitiva da tese.

Encerrada a sessão reservada, o presidente informou ao público presente o resultado. Nada mais havendo a tratar, a sessão foi encerrada e, para constar, eu, Sheyla Mara Baptista Serra, representante do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, lavrei o presente relatório, assinado por mim e pelos membros da banca examinadora.

Documento assinado digitalmente
gov.br SHEYLA MARA BAPTISTA SERRA
Data: 07/12/2025 11:35:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo

Representante do PPG:

Prof. Dr. Afonso Rangel Garcez de Azevedo

Prof. Dr. Victor Almeida de Araujo

Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Prof. Dr. Diego Henrique de Almeida

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Afonso Rangel Garcez de Azevedo, Victor Almeida de Araujo, Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, Diego Henrique de Almeida e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ao) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDRE LUIS CHRISTOFORO
Data: 05/12/2025 13:19:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo

(X) Não houve alteração no título () Houve alteração no título. O novo título passa a ser:

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao Senhor Deus, por conduzir cada passo de minha trajetória e por me abençoar de forma tão sobrenatural. Sou profundamente grato por Sua constante orientação, pelo dom da vida e pela serenidade da mente ao longo da realização deste trabalho, que dedico inteiramente a Ti. A Ti, Senhor, rendo toda honra, glória e louvor.

Ao meu orientador, Prof. Dr. André Luis Christoforo, expresso minha profunda gratidão pelo acolhimento, paciência, companheirismo e pelas inúmeras palavras de incentivo. Muito obrigado por todo o empenho dedicado à concretização deste trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr, agradeço pelos inúmeros auxílios ao longo da pesquisa, especialmente nas questões de experimentais. Sua paciência e prontidão foram essenciais para o sucesso deste projeto.

Ao meu estimado colega Pedro Ignácio Jardim por suas contribuições tão importantes e significativas no desenvolvimento das simulações numéricas.

À minha amada esposa, Júlia, e à minha filha, Luísa, pela presença constante, tanto nos dias de bonança quanto nas horas de dificuldade. Sou imensamente grato por cada gesto de amor, pelo tempo que muitas vezes abriram mão em meu favor, pelos cuidados e carinhos, me dando alegria e me fortalecendo para seguir adiante.

Aos meus pais, Abadio Aparecido e Maria Cristina, sou imensamente grato pelo apoio incondicional ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Minha gratidão aos senhores é imensurável.

Aos amigos e familiares, agradeço a torcida e pelos momentos de alegria e apoio.

Aos Professores Dr. Afonso Azevedo, Dr. Diego Almeida, Dr. Pedro Segundinho e Dr. Victor de Araújo, agradeço por contribuírem de forma tão significativa na qualidade deste trabalho e por dividirem tamanha experiência em nossa banca de defesa.

Por fim, agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) pela oportunidade de realizar a pós-graduação; ao Laboratório de Madeira e de Estruturas de Madeira (LaMEM) da Universidade de São Paulo (USP) pela disponibilização do espaço para os experimentos e; ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) – *Campus* Avançado Piumhi pela oportunidade de usufruir do programa de afastamento docente para participação no programa de pós-graduação *Stricto Sensu*.

RESUMO

A madeira é um material compósito natural que, em virtude de sua complexa composição anatômica, é usualmente considerada como um material ortotrópico, apresentando propriedades diferenciadas conforme a direção de análise. Entre as diversas propriedades mecânicas de interesse, destaca-se o comportamento da madeira quando submetida a esforços de tração. Nessa condição específica, o material apresenta um desempenho classificado como elastofrágil, caracterizado pela ausência de deformações plásticas significativas antes da ruptura. O processo de ruptura à tração na madeira pode ocorrer por meio de diversos modos de falha, fato que gera incertezas substanciais na determinação da resistência à tração paralela às fibras. Isso ocorre porque a irregularidade e a aleatoriedade do plano de falha fazem com que o conceito de tensão normal média deixe de ser representativo para estimar, com precisão, o valor efetivo da resistência. Diante desse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo principal avaliar a influência da introdução de cortes laterais em corpos de prova padronizados, visando induzir a formação de planos de falha preferenciais na região central. Foram estudadas quatro espécies de madeiras folhosas provenientes de florestas tropicais (*Erisma uncinatum*, *Goupia glabra*, *Hymenolobium petraeum* e *Bagassa guianensis*), de modo a contemplar diferentes características anatômicas e mecânicas. Os cortes foram introduzidos em diferentes orientações: alinhados (0°) e inclinados (30° e 45°). Com isso, buscou-se verificar de que maneira a presença dessas descontinuidades afetaria os modos de falha durante os ensaios de tração paralela às fibras, assim como a magnitude e a variabilidade dos valores de resistência obtidos. A investigação foi conduzida por meio de ensaios experimentais e complementada com análises numéricas utilizando o método dos elementos finitos, possibilitando uma avaliação mais aprofundada do comportamento dos corpos de prova. Os resultados evidenciaram que a utilização dos cortes alinhados nos corpos de prova padronizados pela norma brasileira promoveu uma significativa redução da dispersão dos resultados, ao induzir a ruptura para a região central da peça ensaiada. Observou-se, nesse caso, uma redução média da resistência de 0,893 em relação aos corpos de prova sem cortes. Contudo, essa diminuição foi acompanhada pela redução das variabilidades e incertezas associadas à estimativa da resistência à tração paralela às fibras, proporcionando resultados mais consistentes e representativos do comportamento real do material. Assim, conclui-se que a introdução de cortes alinhados pode ser uma estratégia eficiente para melhorar a confiabilidade das medições da resistência à tração da madeira, contribuindo para avanços metodológicos na caracterização mecânica desse material natural e heterogêneo.

Palavras-chave: Madeira folhosa; Espécie Tropical; Tração paralela às fibras; Plano de falha; Ensaio mecânico; Método dos Elementos Finitos; Padronização.

ABSTRACT

*Wood is a natural composite material which, due to its complex anatomical composition, is generally modeled as an orthotropic material, exhibiting distinct properties depending on the direction of analysis. Among the various mechanical properties of interest, the behavior of wood under tensile loading is particularly relevant. In this condition, wood presents an elasto-brittle response, characterized by the absence of significant plastic deformations prior to failure. The tensile failure process may occur through different modes, which introduces substantial uncertainties in determining the tensile strength parallel to the grain. This difficulty arises because the irregularity and randomness of the failure plane make the concept of average normal stress less representative for accurately estimating the actual strength values. In this context, the main objective of this research was to evaluate the influence of introducing lateral notches into standardized specimens, aiming to induce preferential failure planes in the central region. Four species of hardwoods from tropical forests were studied (*Erismia uncinatum*, *Goupia glabra*, *Hymenolobium petraeum* e *Bagassa guianensis*), thereby encompassing distinct anatomical and mechanical features. Notches were introduced in different orientations: aligned (0°) and inclined (30° and 45°). This approach sought to verify how the presence of such discontinuities would affect the failure modes observed during tensile tests parallel to the grain, as well as the magnitude and variability of the measured tensile strength values. The investigation combined experimental tests with numerical analyses based on the finite element method, allowing for a more comprehensive assessment of specimen behavior. The results demonstrated that the use of aligned notches in the standardized Brazilian specimen configuration led to a significant reduction in result dispersion, by consistently inducing fracture in the central region of the tested samples. In this case, an average reduction of 0.893 in tensile strength was observed compared to unnotched specimens. However, this decrease was accompanied by a reduction in variability and uncertainty associated with the estimation of tensile strength parallel to the grain, thus providing more consistent and representative results regarding the actual behavior of the material. Therefore, it can be concluded that the introduction of aligned notches represents an effective strategy to improve the reliability of tensile strength measurements in wood, contributing to methodological advances in the mechanical characterization of this natural and heterogeneous material.*

Keywords: hardwoods; tropical species; tensile parallel to grain; failure plan; mechanical testing; finite element method; standardization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aspectos constituintes das madeiras: (a) células traqueídes, (b) vasos, (c) fibra, (d) e (e) vasos.....	12
Figura 2 – Diagrama e modos de falha da madeira tracionada axialmente: (a) diagrama tensão x deformação, (b) rompimento da lamela média e (c) fratura da fibra	13
Figura 3 – Corpos de prova rompidos à tração.....	14
Figura 4 – Corte transversal de um tronco de árvore	19
Figura 5 – Lenho de uma folhosa em observação espacial	20
Figura 6 – Estrutura fibrilar da parede celular de uma célula de madeira	22
Figura 7 – Eixos principais da madeira em relação às fibras e aos anéis de crescimento	24
Figura 8 – Componentes de tensão 3D e direções ortogonais para um elemento de madeira	25
Figura 9 – Comportamento típico de tensão-deformação da madeira	26
Figura 10 – Níveis de abrangência e restrições normativas	31
Figura 11 – Corpo de prova britânico para ensaio de tração paralela	33
Figura 12 – Corpo de prova da ASTM para ensaio de tração paralela	34
Figura 13 – Exemplo de registro de resultados ASTM	35
Figura 14 – Corpo de prova indiano para tração paralela.....	36
Figura 15 – Corpo de prova russo para tração paralela	37
Figura 16 – Corpos de prova da ABNT para ensaio de tração paralela	39
Figura 17 – Diagrama para extração dos corpos de prova	42
Figura 18 – Corpos de prova normalizados para resistência à tração paralela: (a) GOST 16483.23 [1973], (b) PN-D-04107 [1954], (c) PN-D-04106 [1981], (d) amostra menor de compensado do CT CЭB 2377-80 [1980], (e) amostra maior de compensado do CT CЭB 2377-80 [1980], (f) PN-D-04118 [1959], (g) BS 373:1957 [1957], (h) DIN 52188 [1979], (i) ASTM D 143 [1994, 2014], (j) antiga amostra americana em forma de cunha Hatt W. K. [1906]	46
Figura 19 – Geometria dos corpos de prova prismáticos: (a) densidade e umidade (b) resistência e módulo de elasticidade à compressão	53
Figura 20 – Diagrama de Kollmann.....	54
Figura 21 – Instrumentação para a estimativa dos módulos de elasticidade: (a) suporte fixador dos relógios comparadores (b) ensaio de módulo de elasticidade à compressão (c) ensaio de módulo de elasticidade à tração.	56
Figura 22 – Diagrama de carregamento para a determinação da rigidez da madeira.....	57
Figura 23 – Diagrama tensão x deformação específica para a determinação da rigidez da madeira na compressão paralela às fibras.....	57
Figura 24 – Corpo de prova padrão para o ensaio de tração na direção paralela às fibras.....	58
Figura 25 – Confecção dos Corpos de prova de tração paralela às fibras.....	58
Figura 26 – Propostas de modificações do corpo de prova padrão.....	59
Figura 27 – Esquema das regiões para avaliação da ruptura (a) dimensões (b) regiões destacadas	60
Figura 28 – Condições de contorno do modelo numérico	63
Figura 29 – Resultados do teste de malha.....	64
Figura 30 – Modelos numéricos validados: (a) configuração I, (b) configuração II, (c) configuração III e (d) configuração IV.....	65
Figura 31 – Resultado do teste de malha: (a) erro e (b) tempo de processamento	66
Figura 32 – Modelo numérico validado: corpo de prova contínuo (a) e corpo de prova descontínuo (b).....	66
Figura 33 – Etapas do procedimento experimental à tração: (a) antes do ensaio, (b) início do carregamento e (c) após a ruptura	68
Figura 34 – Histogramas de resistências para o Cambará Rosa	69
Figura 35 – Histogramas de resistências para a Cupiúba.....	70
Figura 36 – Histogramas de resistências para o Angelim pedra	71
Figura 37 – Histogramas de resistências para a Tatajuba	71
Figura 38 – Resultados da resistência a tração paralela média para todas as espécies e configurações	73
Figura 39 – Gráfico de relações entre resistências características normais	76
Figura 40 – Padrões de falha por configuração em exemplares de cada espécie	77
Figura 41 – Arranjo de quantificação da distribuição da ruptura	79
Figura 42 – Gráficos da distribuição percentual média para as regiões de falha. <i>Erismia uncinatum</i> (a), <i>Goupia glabra</i> (b), <i>Hymenolobium petraeum</i> (c) e <i>Bagassa guianensis</i> (d).....	80

Figura 43 – Tensão normal nos corpos de prova da configuração I: <i>Erisma uncinatum</i> (a), <i>Goupia glabra</i> (b), <i>Hymenolobium petraeum</i> (c) e <i>Bagassa guianensis</i> (d)	82
Figura 44 – Tensão cisalhante nos corpos de prova da configuração I: <i>Erisma uncinatum</i> (a), <i>Goupia glabra</i> (b), <i>Hymenolobium petraeum</i> (c) e <i>Bagassa guianensis</i> (d)	83
Figura 45 – Deformação plástica nos corpos de prova da configuração I <i>Erisma uncinatum</i> (a), <i>Goupia glabra</i> (b), <i>Hymenolobium petraeum</i> (c) e <i>Bagassa guianensis</i> (d)	83
Figura 46 – Tensões normais (MPa) atuantes nos corpos de prova da configuração II: <i>Erisma uncinatum</i> (a), <i>Goupia glabra</i> (b), <i>Hymenolobium petraeum</i> (c) e <i>Bagassa guianensis</i> (d)	84
Figura 47 – Tensão cisalhantes (MPa) atuantes nos corpos de prova da configuração II: <i>Erisma uncinatum</i> (a), <i>Goupia glabra</i> (b), <i>Hymenolobium petraeum</i> (c) e <i>Bagassa guianensis</i> (d)	85
Figura 48 – Deformação plástica (mm/mm) nos corpos de prova da configuração II: <i>Erisma uncinatum</i> (a), <i>Goupia glabra</i> (b), <i>Hymenolobium petraeum</i> (c) e <i>Bagassa guianensis</i> (d)	85
Figura 49 – Tensões normais (MPa) nos corpos de prova da configuração III: <i>Erisma uncinatum</i> (a), <i>Goupia glabra</i> (b), <i>Hymenolobium petraeum</i> (c) e <i>Bagassa guianensis</i> (d)	86
Figura 50 – Tensões de cisalhamento (MPa) nos corpos de prova da configuração III: <i>Erisma uncinatum</i> (a), <i>Goupia glabra</i> (b), <i>Hymenolobium petraeum</i> (c) e <i>Bagassa guianensis</i> (d)	87
Figura 51 – Deformação plástica (mm/mm) nos corpos de prova da configuração III: <i>Erisma uncinatum</i> (a), <i>Goupia glabra</i> (b), <i>Hymenolobium petraeum</i> (c) e <i>Bagassa guianensis</i> (d)	87
Figura 52 – Tensões normais (MPa) atuantes nos corpos de prova da configuração IV: <i>Erisma uncinatum</i> (a), <i>Goupia glabra</i> (b), <i>Hymenolobium petraeum</i> (c) e <i>Bagassa guianensis</i> (d)	88
Figura 53 – Tensões cisalhantes (MPa) atuantes nos corpos de prova da configuração IV <i>Erisma uncinatum</i> (a), <i>Goupia glabra</i> (b), <i>Hymenolobium petraeum</i> (c) e <i>Bagassa guianensis</i> (d)	89
Figura 54 – Deformação plástica (mm/mm) nos corpos de prova da configuração IV: <i>Erisma uncinatum</i> (a), <i>Goupia glabra</i> (b), <i>Hymenolobium petraeum</i> (c) e <i>Bagassa guianensis</i> (d)	89
Figura 55 – Padrões de ruptura em duas configurações para a <i>Tatajuba</i>	91
Figura 56 – Tensões principais e imagem real o corpo de prova da configuração I após o ensaio	92
Figura 57 – Tensões principais e foto do corpo de prova na configuração II após o ensaio	93
Figura 58 – Tensões de cisalhamento do corpo de prova configuração I	94
Figura 59 – Tensões de cisalhamento para o corpo de prova na configuração II – alinhados a 0°	95
Figura 60 – Deformações plásticas: corpo de prova íntegro, configuração I (a) e corpo de prova modificado, configuração II – cortes alinhados à 0° (b)	96
Figura 61 – Regiões de escoamento e imagem do corpo de prova íntegro avaliado – configuração I	97
Figura 62 – Regiões de escoamento e imagem do corpo de prova avaliado na configuração II – cortes alinhados à 0°	97

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Recopilação normativa para madeira tracionada</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 2 – Espécies de madeiras estudadas na pesquisa.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabela 3 – Quantidade de amostras para estimar as propriedades</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 4 – Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 5 – Valores obtidos dos coeficientes de plasticidade do critério de falha de Hill.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 6 – Módulos de elasticidade e enquadramento das espécies em classes de resistência</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 7 – Resistências características axiais para o Cambará Rosa</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 8 – Resistências características axiais para a Cupiúba</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 9 – Resistências características axiais para o Angelim Pedra</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 10 – Resistências características axiais para a Tatajuba</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 11 – Distribuição percentual da linha de falha por regiões da Figura 41</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 12 – Valor da resistência à tração paralela de dois exemplares.....</i>	<i>91</i>

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMÁTICA.....	11
1.2 OBJETIVOS	15
1.3 JUSTIFICATIVA	15
1.4 Estrutura da tese.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Aspectos fundamentais sobre a madeira	18
2.1.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS.....	22
2.1.2 Propriedades de resistência	28
2.2 Pesquisas direcionadas para o desenvolvimento do estudo	29
2.2.1 CÓDIGOS NORMATIVOS.....	30
2.2.1.1 ISO 13061.....	32
2.2.1.2 Eurocode 5	32
2.2.1.3 ASTM D143	33
2.2.1.4 Bureau of Indian Standard 1708	35
2.2.1.5 Norma Russa ГOCT 16483	36
2.2.2 ABNT NBR 7190.....	38
2.2.2.1 Caracterização completa da madeira serrada	39
2.2.2.2 Caracterização mínima da resistência de espécies de madeira pouco conhecidas.....	41
2.2.2.3 Caracterização simplificada da resistência da madeira serrada ...	41
2.2.2.4 Caracterização da rigidez da madeira	41
2.2.3 TRABALHOS DESENVOLVIDOS NA ÁREA DE ESTUDO	42
2.2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	46
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
3.1 Análise Experimental.....	51
3.1.1 TEOR DE Umidade.....	52
3.1.2 Densidade APARENTE	53
3.1.3 Resistência e rigidez.....	54
3.1.4 Avaliação qualiquantitativa	60
3.2 ANÁLISE NUMÉRICA	61
3.2.1 Propriedades físico-mecânicas e modelo constitutivo da madeira.....	61
3.2.2 Configuração e validação do modelo numérico	63
3.2.2.1 Simulação para os valores médios e todas as configurações	63
3.2.2.2 Simulação exploratória para uma espécie e duas configurações .	65
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68
4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	68
4.1.1 Enquadramento em classes, valores de resistências e módulos de elasticidade	68
4.1.2 Resultados qualiquantitativos acerca da região do plano de falha da madeira 77	
4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA	82

4.2.1	Análise numérica dos corpos de prova sem cortes.....	82
4.2.2	Análise numérica dos corpos de prova com cortes alinhados	84
4.2.3	Análise numérica dos corpos de prova com cortes desalinhados à 30° 86	
4.2.4	Análise numérica dos corpos de prova com cortes desalinhados à 45° 88	
4.3	Aprofundamento sobre o mecanismo de falha	90
5.	CONCLUSÕES.....	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
	ANEXOS.....	106
A.	Características das espécies estudadas	106
	APÊNDICE.....	113
A.	Desenho com vistas para confecção dos corpos de prova	113

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMÁTICA

Toda e qualquer obra de edificação somente pode ser concebida e manter-se estável em virtude do seu sistema estrutural. É esse sistema que confere resistência e estabilidade diante dos esforços e condições que solicitam a estrutura. De modo geral, os sistemas estruturais são formados por elementos individuais constituídos de materiais e seções dimensionados para resistir a todas as possíveis combinações de carregamentos.

Entre os diversos materiais aplicáveis às estruturas de edificações, destaca-se a madeira. Trata-se de um material orgânico, naturalmente composto por fibras de celulose — responsáveis pela resistência à tração — inseridas em uma matriz de lignina, que resiste à compressão (Carvalho *et al.*, 2009). As propriedades físicas e mecânicas da madeira estrutural decorrem justamente dessa composição.

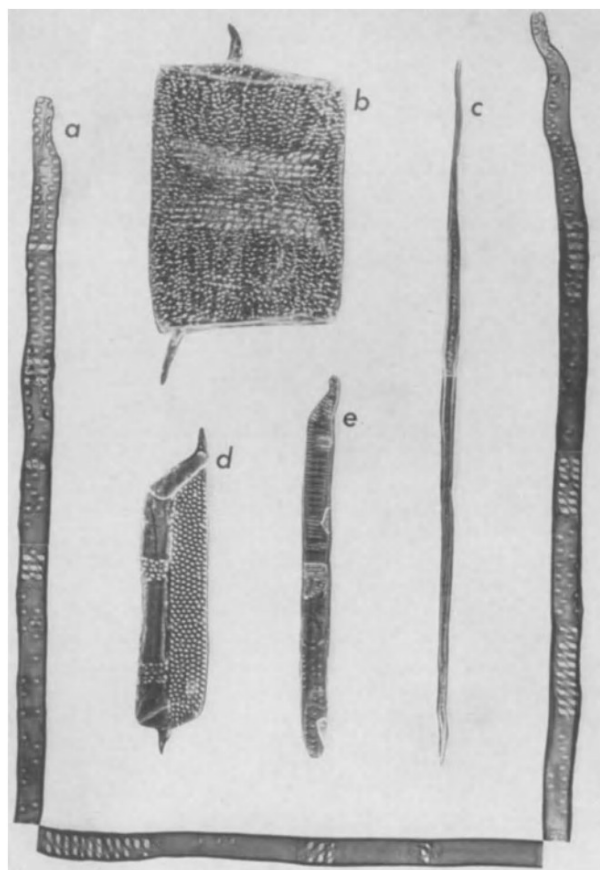
As estruturas de madeira apresentam vantagens relevantes, pois, além de menor impacto ambiental quando comparadas a estruturas de outros materiais, possibilitam ampla variedade de arranjos estruturais e arquitetônicos (Miotto; Dias, 2006), com ênfase no aspecto estético proporcionado pelo acabamento natural (Paiva Filho *et al.*, 2018). Ademais, a madeira estrutural apresenta elevada durabilidade: quando submetida a tratamentos adequados e manutenções periódicas, pode conservar suas propriedades físicas e mecânicas por longos períodos (Vidal *et al.*, 2015; Youngs, 2009).

Apesar das potencialidades já mencionadas, a madeira destinada ao uso estrutural apresenta algumas limitações que desafiam o projeto, execução e uso adequado do material. Em termos de propriedades físicas e mecânicas, não se observa homogeneidade, uma vez que tais características variam em função da espécie, da anatomia, do teor de umidade e da orientação das fibras (grã) (Ferro *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2012).

Mesmo quando se considera uma única espécie, podem ser verificadas diferenças significativas entre madeiras provenientes de distintas regiões de crescimento. Essa variação decorre de fatores como disponibilidade de água, minerais no solo e luz solar. Ademais, dentro de uma mesma árvore também se observam variações relevantes nas propriedades, de acordo com a região da qual é extraído o material analisado (Araújo, 2007).

O estudo da microestrutura da madeira pode ser realizado com auxílio do microscópio óptico. Quando se observam seções delgadas, a composição celular torna-se claramente visível. As células são mantidas unidas por uma substância intercelular denominada lamela média (Dias; Lahr, 2004; Kuniyoshi *et al.*, 2024). Quando essa substância é dissolvida por meio de tratamento químico, processo conhecido como polpação¹, as células se separam em elementos individuais. A análise microscópica de amostras de madeira folhosa (*hardwood*) e madeira conífera (*softwood*) evidencia diferenças significativas quanto ao tamanho e ao formato das células constituintes (Klock; De Andrade, e Vidaurre *et al.*, 2023). Na Figura 1 é possível conhecer os elementos parenquimáticos da madeira.

Figura 1 – Aspectos constituintes das madeiras: (a) células traqueídes, (b) vasos, (c) fibra, (d) e (e) vasos



Fonte: Kollmann; Cote (1968)

Na Figura 1, o elemento “a” é a célula traqueíde de uma madeira conífera que pode chegar a mais de 7,0 mm de comprimento. O formato das células traqueídes de uma dicotiledônia são semelhantes, porém seu comprimento é em torno de 1,5 mm.

¹ Processo pelo qual são rompidas, quimicamente, as ligações entre as microestruturas da madeira, separando as fibras. É um processo muito utilizado pela indústria do papel.

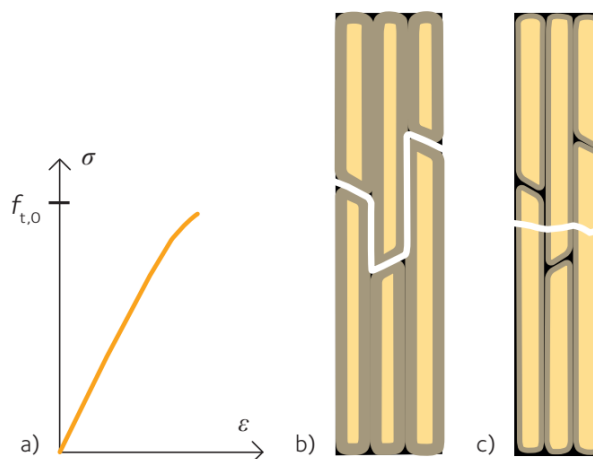
Na mesma figura 1, os elementos referentes a “b”, “d” e “e” correspondem aos vasos, cujas dimensões variam de acordo com a espécie e a posição no incremento de crescimento. Em madeiras com poros anelares, por exemplo, os vasos da madeira de primavera apresentam grande diâmetro, enquanto os da madeira de verão são consideravelmente menores.

Na Figura 1, o elemento “c” é ilustra a fibra, em especial a fibra libriforme, caracterizada por paredes espessas, lúmen estreito e alongado. Diferentemente do vaso, esse elemento celular é adaptado à resistência e ao suporte, uma vez que possui extremidades cônicas imperfuradas e pequenas pontuações simples em forma de fenda.

Em relação ao comportamento mecânico, a madeira — por ser um material fibroso — apresenta duas respostas distintas quando solicitada axialmente: na compressão, comportamento elastoplástico; na tração, comportamento elastofrágil (Calil Neto *et al.*, 2017).

Os ensaios de tração pura na direção das fibras indicam uma relação tensão-deformação quase linear até a ruptura (Swedish Forest Industries Federation, 2022), conforme ilustrado na Figura 2 a).

Figura 2 – Diagrama e modos de falha da madeira tracionada axialmente: (a) diagrama tensão x deformação, (b) rompimento da lamela média e (c) fratura da fibra



Fonte: Swedish Forest Industries Federation, 2022

Na Figura 2 “b” e “c” estão dispostos os mecanismos de ruptura. Em termos práticos, a falha pode ocorrer pelo rompimento da lamela média, promovendo o destacamento das fibras; pela fratura das próprias fibras; ou ainda pela combinação de ambos os fenômenos. Na Figura 3 são mostrados corpos de prova rompidos à tração: os dois primeiros (de cima para baixo) de madeira Paricá e os outros três de Pinus.

Figura 3 – Corpos de prova rompidos à tração



Fonte: Próprio autor, 2023

Teoricamente, a tensão é determinada pela relação entre a força aplicada e a área da seção resistente ao esforço, como mostrado na Equação 1.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Entretanto, considerando-se as condições de ruptura e os resultados da Figura 3, observa-se que a área efetiva resistente é superior à considerada nos cálculos. Nesse contexto, questiona-se: o coeficiente de minoração γ_w adotado para estados-limite últimos decorrentes de tensões normais, com valor básico $\gamma_w = 1,4$ conforme a seção 5.8.5 da norma vigente da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 7190-1, 2022) é suficiente para corrigir as discrepâncias entre resistências teóricas e experimentais? A resposta a essa questão depende da possibilidade de melhor aproximação entre a área efetiva real e a área prevista no ensaio de tração da madeira.

No Brasil, os princípios e critérios de dimensionamento são estabelecidos pela ABNT NBR 7190-1 (2022), que trata dos projetos de estruturas de madeira. Essa norma define tanto os procedimentos para cálculo das dimensões das peças no estado limite último (ELU), quanto as verificações para as situações de serviço (ELS).

No contexto do projeto estrutural, as informações relativas à resistência à tração da madeira desempenham papel fundamental, pois possibilitam que os projetistas utilizem de forma otimizada a capacidade de cada classe, resultando em soluções simultaneamente seguras e economicamente viáveis. Nesse sentido, a investigação da possibilidade de induzir

a ruptura em uma região mais restrita, aproximando a resistência teórica da resistência real, configura-se como uma questão relevante a ser explorada.

1.2 OBJETIVOS

Com base na contextualização apresentada, o objetivo principal deste trabalho é avaliar qual configuração geométrica conduz o plano de falha a se posicionar o mais próximo possível da direção perpendicular às fibras, ou pelo menos mais localizado na região central, em peças de madeira submetidas à tração axial.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Investigar se a inserção de concentradores de tensão direciona a ruptura para um plano de interesse previamente definido;
- Avaliar se, sob a perspectiva de uma nova proposta de ensaio, a relação entre as resistências $f_{c0,k}$ e $f_{t0,k}$ se mantém no valor de 0,77, conforme previsto na norma ABNT NBR 7190-3 (2022);
- Testar a hipótese de que os cortes laterais alinhados a 0° são a melhor solução para reduzir a amplitude da região de ruptura;
- Verificar se o comportamento das rupturas observado, para corpos de prova com inserção de cortes laterais, é válido para distintas classes de resistência da madeira.

1.3 JUSTIFICATIVA

As investigações desenvolvidas nesta pesquisa justificam-se pelos benefícios potenciais relacionados ao uso da madeira como material estrutural. A seguir são destacados os pontos mais relevantes para o estudo desenvolvido.

A relação entre densidade e resistência de elementos estruturais de madeira configura-se como um fator essencial para o melhor entendimento do comportamento mecânico desse material, ao mesmo tempo em que, como apontado por Molina e Junior (2010), seu processo de produção demanda menor consumo energético quando comparado a outros materiais estruturais.

Grande redução do impacto ambiental em comparação à produção de cimento e aço.

Comportamento da madeira em situações de incêndio;

Diminuição significativa da eficiência das trocas/transformações de CO_2 em O_2 em árvores adultas (que já não se encontram em fase de crescimento);

Soma-se a isso a redução do impacto ambiental decorrente da utilização da madeira em substituição a materiais cuja produção é mais poluente, como cimento e aço, bem como o desempenho satisfatório da madeira em situações de incêndio, conforme discutido por Figueroa e Moraes, (2009). Outro ponto relevante refere-se à diminuição significativa da eficiência das trocas de CO_2 por O_2 em árvores adultas que já não se encontram em fase de crescimento (DALMAGRO ET AL., 2011; MARENCO ET AL., 2014; PALHARES; FRANCO; ZAIDAN, 2010).

Nesse contexto, destaca-se ainda o potencial da madeira como eficiente depósito de carbono, uma vez que, ao ser empregada em elementos estruturais, mantém armazenada a massa de carbono e impede sua liberação ao meio ambiente (CAMPOS; PUNHAGUI; JOHN, 2011, DE ARAÚJO ET AL. 2020).

No contexto da floresta amazônica, não há consenso quanto ao número total de espécies arbóreas. Estima-se que esse número seja da ordem de 16 mil espécies, o que evidencia a necessidade de estudos mais aprofundados para a utilização racional dessa biodiversidade;

No caso específico da floresta amazônica, a ausência de consenso sobre o número total de espécies arbóreas – estimado em aproximadamente 16 mil, segundo Steege et al., (2016) – evidencia a necessidade de estudos mais aprofundados que subsidiem o uso racional dessa vasta biodiversidade.

A proposta prioriza a utilização de árvores maduras, acima de 50 anos de idade, que são mais usualmente selecionadas em manejos sustentáveis para renovar a floresta sem impactá-la diretamente.

Adicionalmente, a revisão da literatura realizada até o momento revelou a escassez de pesquisas publicadas em formato digital, que investiguem experimentalmente a madeira submetida à tração paralela às fibras, associando a análise numérica à proposição de modificações no corpo de prova, de modo a se obter um ajuste mais adequado à fórmula clássica de cálculo da tensão média.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

No capítulo 1 desenvolve-se na seção 1.1 a contextualização sobre a madeira para uso estrutural com vistas em seu potencial e suas limitações de utilização. Nesse contexto a questão sobre o padrão de falha produzido na madeira sob tração paralela às fibras e a fórmula usual para o cálculo da tensão é explorada, sendo a principal motivação do estudo proposto nesta.

No capítulo 2 foi estruturada a revisão da literatura. Inicialmente, foram revisados aspectos fundamentais sobre a madeira estrutural. Na seção 2.2 foi apresentada a dinâmica para procura de referências pertinentes a esta pesquisa. São mostrados os principais órgãos normalizadores que indicam métodos para estimar a resistência da madeira tracionada paralelamente às fibras e expostas as sínteses de trabalhos que propuseram modificações nos experimentos padrões das normas. Na seção 2.4 é feita a conclusão acerca dessa revisão, sendo mais específica para o tema investigado no trabalho.

No capítulo 3 são mostrados os métodos utilizados na pesquisa. Por se tratar de um trabalho com proposta experimental e numérica a seção 3.1 foi estabelecida para expor os detalhes e procedimentos experimentais, enquanto na seção 3.2 foram discutidos sobre os aspectos fundamentais e considerações adotadas para simulação numérica, incluindo o teste de malha realizado.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Para melhor organização na seção 4.1 foram inseridos os dados referentes à parte experimental, incluindo o enquadramento nas classes de resistências das espécies de madeira utilizadas. Na seção 4.2 foram exibidas as respostas da modelagem computacional. Na seção 4.3 fez-se o aprofundamento para o valor de uma espécie em duas configurações de corpos de prova.

No capítulo 5 estão inseridas as considerações finais, seguidas pela apresentação das referências bibliográficas utilizadas em todo o trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS FUNDAMENTAIS SOBRE A MADEIRA

Do ponto de vista taxonômico, as madeiras são classificadas em dois grandes grupos: as Gimnospermas e as Angiospermas. As primeiras, usualmente denominadas coníferas, resinosas, não porosas ou *softwoods*, caracterizam-se pela presença de sementes expostas, como indicado pela etimologia grega “gimno” (nu) e “*sperma*” (semente). Já as Angiospermas, conhecidas como folhosas, porosas ou *hardwoods*, possuem sementes protegidas por estruturas envolventes, derivando de “angio” (cápsula) e “*sperma*” (semente) (Joly, 1979).

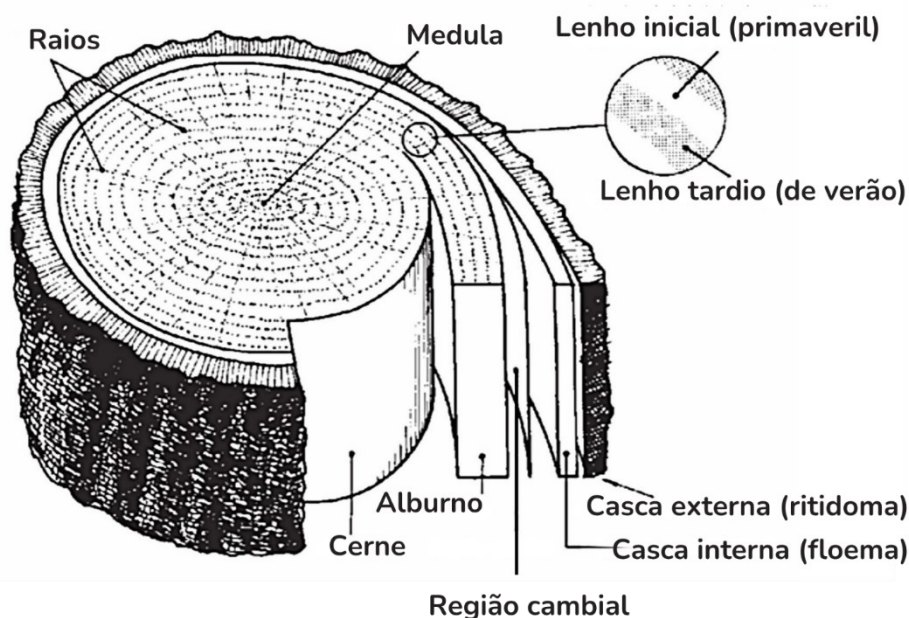
O grupo das Angiospermas representa um dos conjuntos mais expressivos de plantas superiores, responsáveis pela produção de flores e pela maior diversidade botânica do planeta, abrangendo aproximadamente 350 famílias e mais de 200 mil espécies. No Brasil, apenas três espécies nativas pertencem ao grupo das coníferas, enquanto as demais, cerca de 40 mil, são classificadas como folhosas, o que evidencia a predominância desse grupo na flora nacional (Joly, 1979). Ressalta-se que, embora sejam dados clássicos, tais números podem variar conforme atualizações taxonômicas recentes.

Sob a perspectiva anatômica, a madeira é um material naturalmente heterogêneo, constituído por diferentes tipos celulares especializados no desempenho de funções vitais, como crescimento, condução de seiva, armazenamento de substâncias e sustentação do vegetal (Panshin; De Zeeuw, 1970). A compreensão dessa estrutura é de particular relevância para a engenharia civil, uma vez que as propriedades tecnológicas da madeira — tais como resistência mecânica, durabilidade e trabalhabilidade — derivam diretamente de sua constituição anatômica.

As células que compõem o tecido lenhoso apresentam grande similaridade em sua fase inicial. À medida que ocorre o crescimento, passam a se especializar em diferentes tipos, como fibras, vasos, e células de parênquima axial e radial. Cada uma delas desempenha funções fisiológicas e mecânicas específicas: as fibras contribuem para a sustentação estrutural da planta; as células do parênquima atuam principalmente no armazenamento de substâncias nutritivas; e os vasos do xilema (lenho) são responsáveis pelo transporte da seiva bruta, constituída de água e sais minerais absorvidos pelas raízes (Lisboa, 1991).

Em um corte transversal típico de tronco, podem ser identificadas diferentes regiões anatômicas, tais como: casca (ritidoma e floema), zona cambial, anéis de crescimento (lenho inicial e tardio), albarno, cerne, raios e medula (Figura 4).

Figura 4 – Corte transversal de um tronco de árvore



Fonte: Adaptado de White (1980)

A casca é composta por duas camadas principais: o floema, responsável pelo armazenamento e pela condução de nutrientes, e o ritidoma (ou córtex), cuja função é proteger o vegetal contra o ressecamento, variações climáticas, danos mecânicos e ataques de organismos patogênicos. Entre o floema e o albarno localiza-se a região cambial, formada por células meristemáticas² que asseguram o crescimento em espessura, originando tanto os tecidos do lenho quanto os da casca (BURGER; RICHTER, 1991).

Os anéis de crescimento representam o incremento anual da madeira, permitindo determinar a idade aproximada de uma árvore. O cerne, situado na porção central do tronco, geralmente apresenta coloração mais escura em razão da perda da atividade fisiológica de suas células e da subsequente deposição de substâncias como taninos, resinas, gorduras e carboidratos. Essa modificação celular resulta em uma estrutura mais compacta, com menor porosidade e menor teor de nutrientes, conferindo ao cerne maior resistência mecânica e maior durabilidade frente ao ataque de organismos xilófagos.

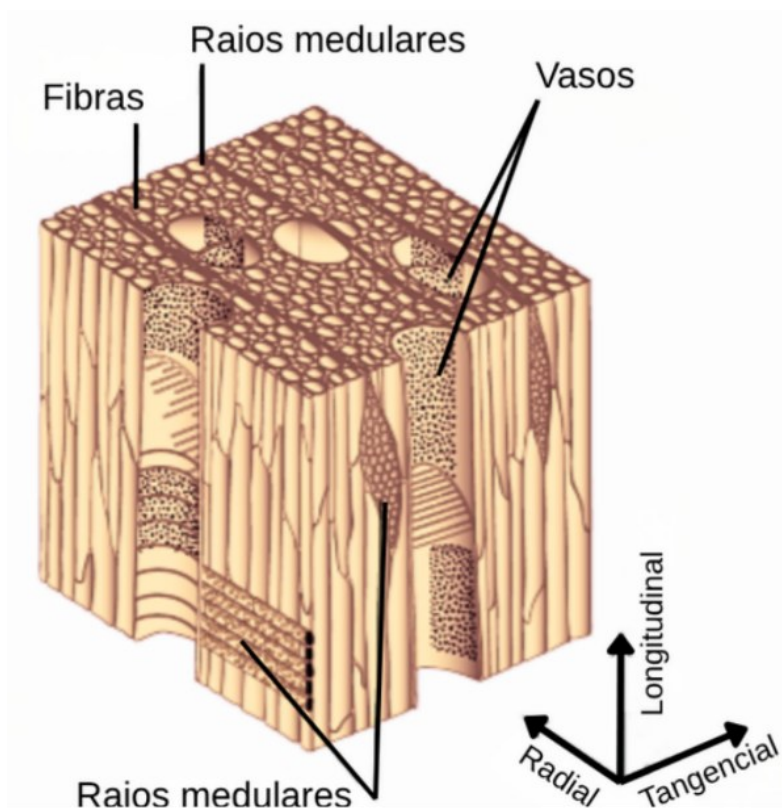
² Células vegetais indiferenciadas e com alta capacidade de divisão celular (mitose), responsáveis pelo crescimento e formação dos tecidos adultos das plantas. Possuem papel semelhantes às células-tronco.

O albarno, por sua vez, constitui a parte biologicamente ativa do tronco. Nele, as células apresentam elevado teor de água e nutrientes, mas baixa impregnação de compostos enrijecedores, características que o tornam estruturalmente menos resistente e mais vulnerável ao ataque biológico. Os raios, formados por faixas celulares orientadas radialmente, exercem funções de transporte lateral e armazenamento de água e substâncias nutritivas. A medula, localizada no centro do tronco, também desempenha papel de armazenamento, sendo, contudo, altamente susceptível a organismos xilófagos devido ao seu teor nutritivo.

No caso das folhosas (Angiospermas), o lenho é composto por quatro elementos celulares principais: (a) fibras, longas e estreitas, responsáveis pela sustentação estrutural do vegetal; (b) vasos ou poros, organizados longitudinalmente, cuja função é a condução de água e nutrientes; (c) parênquima axial, situado ao longo dos vasos, com função predominante de armazenamento; e (d) parênquima radial e raios, orientados horizontalmente do câmbio em direção à medula, que desempenham funções de condução e armazenamento de substâncias no sentido radial (LEPAGE, 1986).

A Figura 5 ilustra a disposição dessas estruturas nos três planos anatômicos de observação.

Figura 5 – Lenho de uma folhosa em observação espacial



Fonte: Adaptado de Youngs (2009)

No estudo anatômico da madeira procede-se habitualmente três cortes – transversal, tangencial e radial – que deixam à vista planos distintos do interior do lenho, permitindo observar estruturas de aspecto diferente consoante a superfície observada.

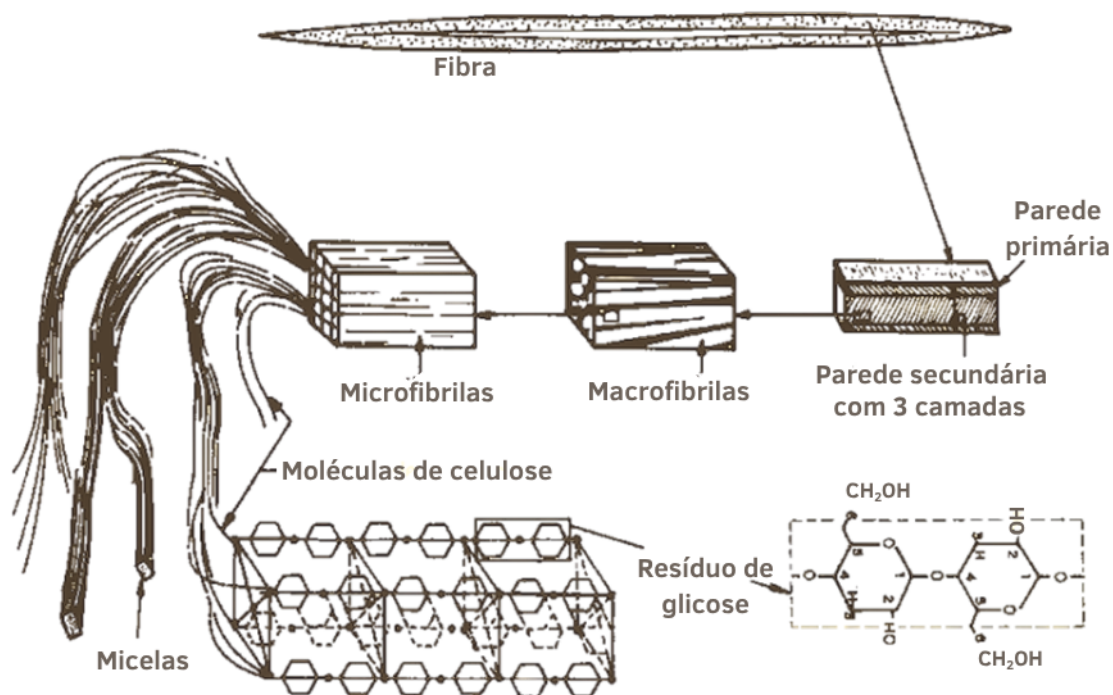
Ao relacionar-se com a Engenharia Civil, esse detalhamento anatômico adquire relevância prática, pois a distribuição e a proporção desses elementos celulares influenciam diretamente as propriedades físicas e mecânicas da madeira, tais como resistência, durabilidade e estabilidade dimensional, aspectos essenciais para seu emprego como material de construção.

Em relação à composição química, a madeira pode ser definida como um biopolímero tridimensional, cuja composição é dominada por três componentes principais: celulose, hemiceluloses e lignina. A celulose, componente predominante, corresponde a um polissacarídeo complexo, insolúvel em água, formado por longas cadeias de moléculas de glicose (Lepage, 1986). Esse constituinte é fundamental para a integridade estrutural, pois compõe a parede celular e responde pela maior parte das propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira.

Sob uma perspectiva estrutural, a celulose funciona como um esqueleto, imerso em uma matriz de hemiceluloses e lignina, esta última desempenhando papel de agente aglutinante. O menor elemento dessa rede é a fibrila elementar, constituída por um conjunto paralelo de 36 moléculas de celulose interconectadas por pontes de hidrogênio. Essas fibrilas, também chamadas micelas, organizam-se em microfibrilas, visíveis em microscopia eletrônica, que, por sua vez, se agrupam em macrofibrilas e nas lamelas correspondentes às paredes primária e secundária da célula. Nos espaços intersticiais, encontram-se moléculas de celulose desordenadas, além de lignina e hemiceluloses, que completam a estrutura da parede celular (ETALE *et al.*, 2023).

As hemiceluloses apresentam-se como compostos amorfos, embora orientados na mesma direção das microfibrilas de celulose, enquanto a lignina, também amorfa, distingue-se por sua isotropia. A interação entre esses três constituintes garante à parede celular a combinação de rigidez e flexibilidade característica da madeira (Figura 6).

Figura 6 – Estrutura fibrilar da parede celular de uma célula de madeira



Fonte: Adaptado de Siau,(1984)

A composição química elementar da madeira é relativamente estável entre espécies, apresentando em média 49 a 50% de carbono, 6% de hidrogênio, 44% de oxigênio e 0,1 a 0,5% de nitrogênio. Todavia, o teor de minerais como cálcio, magnésio, sódio, potássio, ferro, silício, fósforo e enxofre pode variar, embora em proporções pouco expressivas. Mais relevante é a variabilidade na fração de seus constituintes químicos, cujos intervalos típicos são: lignina (22 a 40%), celulose (30 a 50%), pentosanas (9 a 28%), mananas e galactanas (0 a 12%) e extrativos (0,2 a 20%) (BRITO; BARRICHELO, 1981).

Sob a ótica da engenharia civil, tais variações químicas possuem grande impacto prático. A proporção relativa de celulose, hemiceluloses e lignina influencia diretamente propriedades como resistência mecânica, higroscopicidade, estabilidade dimensional e durabilidade natural da madeira. Assim, o conhecimento da composição química não apenas auxilia na caracterização científica do material, mas também fundamenta a seleção adequada de espécies para diferentes aplicações construtivas, desde estruturas de maior desempenho mecânico até elementos sujeitos a condições ambientais agressivas.

2.1.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

As propriedades da madeira dividem-se em físicas e mecânicas, sendo ambas fundamentais para sua caracterização e aplicação tecnológica. Entre as propriedades físicas destacam-se a massa específica e a estabilidade dimensional, diretamente relacionadas ao

teor de umidade. Entre as mecânicas, ressaltam-se as resistências à compressão, flexão, tração, cisalhamento e fendilhamento, parâmetros indispensáveis para a avaliação de seu desempenho estrutural.

A determinação dessas propriedades exige ensaios laboratoriais realizados segundo normas técnicas que estabelecem metodologias, dimensões e formatos de corpos de prova. As referências normativas mais utilizadas incluem documentos normativos de diversas entidades e organismos normalizadores como *American Society for Testing and Materials* (ASTM), *British Standards Institution* (BSI), *International Organization for Standardization* (ISO) e *Comisión Panamericana de Normas Técnicas* (COPANT). No Brasil, prevalecem as normas da ABNT, que fornecem parâmetros de padronização para aplicações na construção civil e na indústria madeireira.

Essas propriedades constituem critérios decisivos na escolha da madeira para diferentes usos. Aliadas a aspectos como durabilidade natural, trabalhabilidade, custo e estética, permitem classificar espécies quanto à sua adequação para estruturas, revestimentos internos e externos, mobiliário, painéis e embalagens.

A densidade é reconhecida como a propriedade mais representativa. Ela é definida como medida da quantidade de material lenhoso na parede celular, estando fortemente correlacionada às propriedades físicas e mecânicas (Nahuz, 2013). Nas espécies tropicais de alta densidade, essa característica impacta diretamente a exploração, o processamento, o transporte e o uso final. Para alguns autores ela é considerada a propriedade tecnológica mais importante, pois influencia a resistência mecânica, a estabilidade dimensional e outras características correlatas (Burger; Richter, 1991). Em função da variação anatômica, a massa específica das madeiras oscila entre 0,13 e 1,40 g.cm⁻³, embora Kollmann e Côté Júnior (1968) tenham demonstrado que a densidade intrínseca da parede celular sólida permanece praticamente constante em torno de 1,50 g.cm⁻³.

A madeira, por ser higroscópica, absorve e libera água em função das condições ambientais, apresentando fenômenos de contração e inchamento. A água pode estar presente (i) na parede celular, entre as cadeias de celulose, ou (ii) livre, preenchendo cavidades celulares e elementos condutores (SIAU, 1984). O ganho de umidade provoca afastamento das cadeias celulósicas, resultando em inchamento; a perda de água, por sua vez, gera aproximação das moléculas, causando contração (PANSIN; DE ZEEUW, 1970).

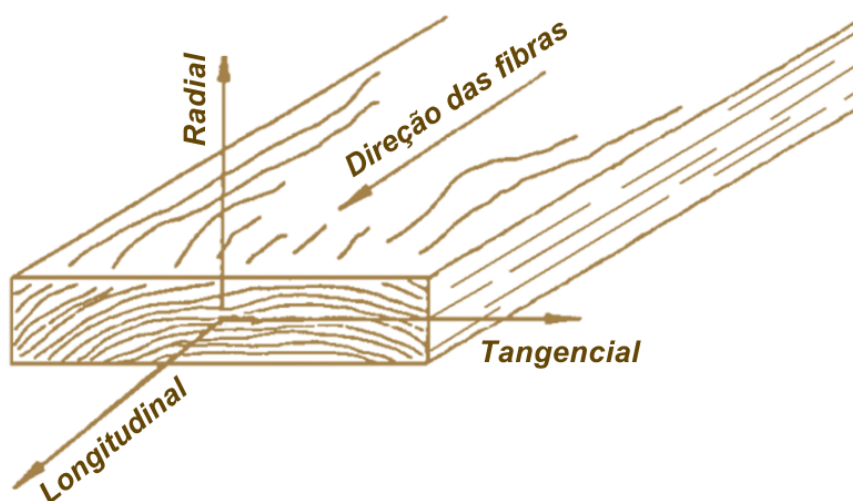
Outro aspecto de grande relevância é a permeabilidade, determinada por fatores anatômicos como diâmetro, frequência e distribuição dos poros, além da presença de substâncias obstrutivas. Essa propriedade influencia diretamente a secagem e a preservação da madeira, sendo que espécies de alta densidade tendem a apresentar maior dificuldade de

impregnação com soluções preservativas. A condução de líquidos ocorre, principalmente, pelos elementos anatômicos especializados na condução da seiva (PANSHIN; DE ZEEUW, 1970).

Uma limitação intrínseca à madeira é sua heterogeneidade e variabilidade. Nem mesmo amostras retiradas da mesma árvore apresentam valores idênticos de propriedades físicas e mecânicas. Essas diferenças podem ser atribuídas à posição da amostra no tronco (altura, proximidade da medula, posição no anel de crescimento), à presença de defeitos e a fatores genéticos e ambientais (PANSHIN; DE ZEEUW, 1970; ROCHA, 1994; WANGAARD, 1950). Rocha (1994) enfatiza que a combinação da diversidade anatômica, da composição química e das condições de crescimento (clima, solo e genética) resulta na ampla variabilidade observada, o que torna essencial a padronização por meio de ensaios e normas técnicas.

A madeira é um material anisotrópico e essa característica é resultado de sua estrutura fibrosa e sua natureza ortotrópica 3D, conforme pode ser observado nas Figura 7 e Figura 8.

Figura 7 – Eixos principais da madeira em relação às fibras e aos anéis de crescimento



Fonte: Adaptado de (*Forest Products Laboratory*, 1999)

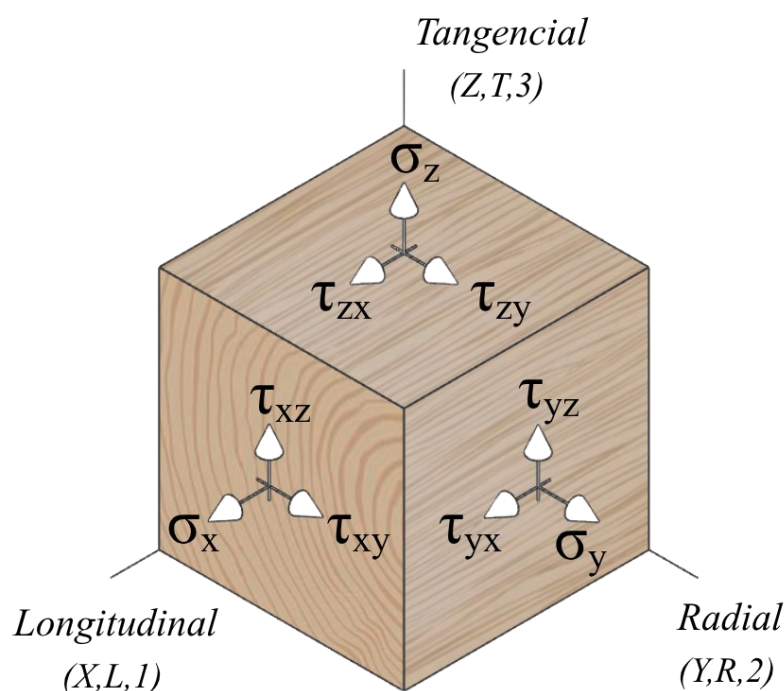
Devido às suas características anisotrópicas, o comportamento mecânico da madeira depende da direção das fibras e do tipo de carga (CHEN, 2011). As propriedades mecânicas da madeira mudam conforme a temperatura, a umidade e o tempo de carga (MACKERLE, 2005). Além disso, características de crescimento, como inclinação do veio e nós, afetam significativamente o comportamento mecânico dos produtos à base de madeira.

Também, em decorrência da sua anisotropia, a madeira apresenta diferentes magnitudes de contração e inchamento nas direções radial, tangencial e longitudinal. Siau

(1984) observou que a contração longitudinal é mínima (0,1–0,3%), enquanto a tangencial corresponde, em média, ao dobro da radial, sendo responsável por dois terços da variação volumétrica. A menor contração radial é explicada pela ação dos raios lenhosos, que alternam camadas de madeira juvenil de baixa densidade com madeira tardia de maior densidade (PANSHIN; DE ZEEUW, 1970).

Em termos de projeto e dimensionamento a madeira pode ser descrita como um material ortotrópico – considerado como um subgrupo de materiais anisotrópicos, possuindo simetria em três direções ortogonais – ou seja, possui propriedades mecânicas únicas e independentes nas direções de três eixos mutuamente perpendiculares: longitudinal, radial e tangencial. O eixo longitudinal L é paralelo à fibra (grã); o eixo radial R é normal aos anéis de crescimento (perpendicular à grã na direção radial); e o eixo tangencial T é perpendicular às fibras, mas tangente aos anéis de crescimento, essa distinção é bem compreendida na Figura 7. Em termos das tensões desenvolvidas (normais e cisalhantes) nas direções ortogonais, a Figura 8 esclarece de forma muito adequada a disposição de cada uma delas.

Figura 8 – Componentes de tensão 3D e direções ortogonais para um elemento de madeira



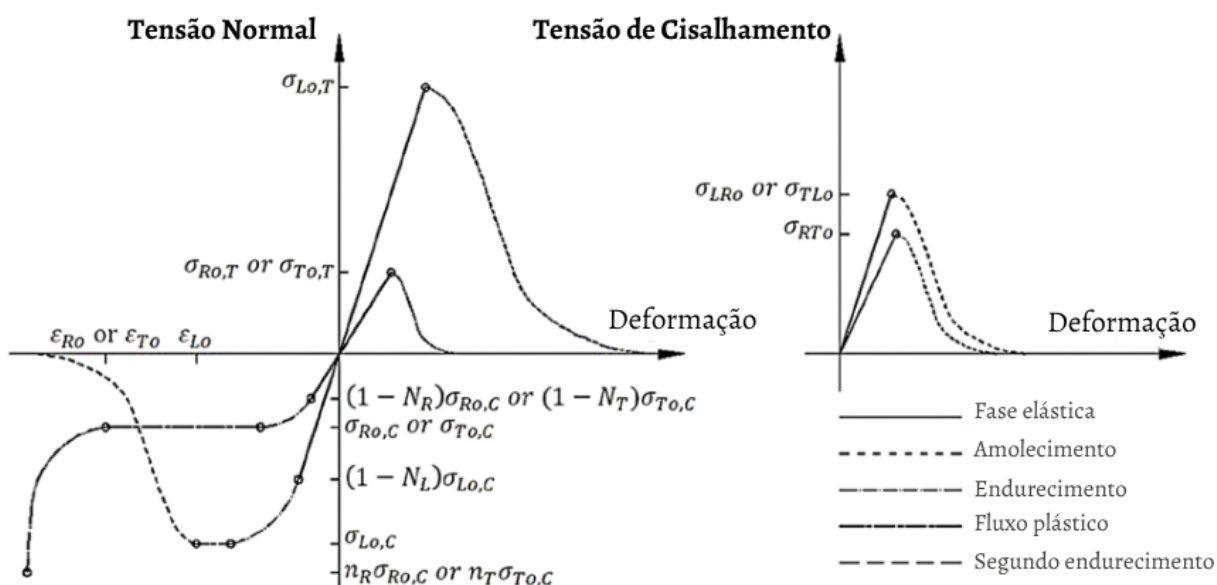
Fonte: Adaptado de Gharib *et al.*(2017)

Os modos de falha e as relações tensão-deformação da madeira dependem da direção da carga em relação às fibras e do tipo de carga (axiais ou cisalhantes). Conforme ilustrado na Figura 9, para madeira submetida a tensão ou cisalhamento, a relação tensão-deformação é tipicamente elástica linear e a falha é quase frágil; para madeira em compressão, a relação

tensão-deformação é tipicamente não linear e a falha é dúctil (CHEN; TUNG; KARACABEYLI, 2022).

Para modelar o comportamento mecânico de produtos à base de madeira sob várias forças, o modelo constitutivo deve incluir os seguintes componentes: (a) propriedades elásticas; (b) critério de resistência; (c) amolecimento pós-pico para modos de falha quase frágeis; (d) fluxo plástico e regra de endurecimento para modos de falha por deformação; e (e) segundo endurecimento (densificação) perpendicular às fibras.

Figura 9 – Comportamento típico de tensão-deformação da madeira



Fonte: Chen; Tung; Karacabeyli (2022)

Nota: σ_{i0} é a resistência axial na direção i [MPa]; $\sigma_{i0,T}$ e $\sigma_{i0,C}$ são a resistência à tração e a resistência à compressão na direção i [MPa]; σ_{ij0} é a resistência ao cisalhamento no plano $i - j$ [MPa]; N_i e n_i são parâmetros para determinar a superfície de escoamento inicial e final, respectivamente; ϵ_{Lo} é a deformação inicial por dano para compressão paralela às fibras; ϵ_{Ro} e ϵ_{To} são a deformação inicial de segundo endurecimento para compressão perpendicular às fibras.

Dependendo das complexidades, cenários e exigências da modelagem, podem ser adotados diferentes modelos constitutivos com várias combinações desses componentes. Por exemplo, um modelo constitutivo que consiste em propriedades elásticas geralmente é suficiente para determinar a deflexão e a distribuição de tensão de um elemento à base de madeira quando a carga é pequena; no entanto, o critério de resistência precisa ser incluído no modelo constitutivo quando a capacidade de carga, o modo de falha ou ambos são

necessários. Se o comportamento pós-resistência for de interesse, o amolecimento pós-pico, o endurecimento e a deformação — ou todos — são necessários no modelo constitutivo.

Propriedades elásticas

São necessárias doze constantes (nove são independentes) para descrever o comportamento elástico da madeira: três módulos de elasticidade E , três módulos de rigidez G e seis coeficientes de Poisson μ . Os módulos de elasticidade e os coeficientes de Poisson estão relacionados por expressões da forma, como disposto na equação 2 (*Forest Products Laboratory, 1999*).

$$\frac{\mu_{ij}}{E_i} = \frac{\mu_{ji}}{E_j}, \quad i \neq j \quad i, j = L, R, T \quad (2)$$

As relações gerais entre tensão e deformação para um material ortotrópico homogêneo podem ser encontradas em textos sobre elasticidade anisotrópica.

Módulo de elasticidade

A elasticidade implica que as deformações produzidas por baixa tensão são completamente recuperáveis após a remoção das cargas. Quando submetido a níveis de tensão mais elevados, ocorre deformação plástica ou falha. Os três módulos de elasticidade, denotados por E_L , E_R e E_T , respectivamente, são os módulos elásticos ao longo dos eixos longitudinal, radial e tangencial da madeira. Esses módulos são geralmente obtidos a partir de testes de compressão; no entanto, os dados para E_R e E_T em documentos digitais são escassos.

O módulo de elasticidade determinado a partir da flexão, E_L , em vez de um teste axial, pode ser o único módulo de elasticidade disponível para uma espécie. O E_L da flexão pode ser aumentado em 10% para remover esse efeito aproximadamente.

Coefficiente de Poisson

Quando um elemento é submetido a uma carga axial, a deformação perpendicular à direção da carga é proporcional à deformação paralela à direção da carga. A razão entre a deformação transversal e a deformação axial é chamada de razão de Poisson. Os coeficientes de Poisson são indicados por μ_{LR} , μ_{RL} , μ_{LT} , μ_{TL} , μ_{RT} e μ_{TR} . A primeira letra do subscrito refere-se à direção da tensão aplicada e a segunda letra à direção da deformação lateral. Por exemplo, μ_{LR} é o coeficiente de Poisson para deformação ao longo do eixo radial causada por tensão ao longo do eixo longitudinal. Os valores para μ_{RL} e μ_{TL} são determinados com menos precisão do que os valores para os outros coeficientes de Poisson. Os coeficientes de Poisson variam dentro e entre as espécies e são afetados pelo teor de umidade e pela gravidade específica.

Módulo de rigidez

O módulo de rigidez, também chamado de módulo de cisalhamento, indica a resistência à deflexão de um membro causada por tensões de cisalhamento. Os três módulos de rigidez denotados por GLR, GLT e GRT são as constantes elásticas nos planos LR, LT e RT, respectivamente. Por exemplo, GLR é o módulo de rigidez baseado na deformação de cisalhamento no plano LR e nas tensões de cisalhamento nos planos LT e RT.

Tal como acontece com os módulos de elasticidade, os módulos de rigidez variam dentro e entre espécies e com o teor de umidade e a gravidade específica.

2.1.2 PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA

As propriedades mecânicas mais ensaiadas e representadas como “propriedades de resistência” para o projeto incluem o módulo de ruptura em flexão, a tensão máxima em compressão paralela às fibras, a tensão de compressão perpendicular às fibras e a resistência ao cisalhamento paralela às fibras. Medições adicionais são frequentemente feitas para avaliar o trabalho até a carga máxima em flexão, a resistência ao impacto em flexão, a resistência à tração perpendicular às fibras e a dureza.

Módulo de ruptura — Reflete a capacidade máxima de carga de um elemento em flexão e é proporcional ao momento máximo suportado pela amostra. O módulo de ruptura é um critério de resistência aceito, embora não seja uma tensão real, pois a fórmula pela qual é calculado é válida apenas até o limite elástico.

Resistência à compressão paralela às fibras — Tensão máxima suportada por uma amostra de compressão paralela à grã com uma relação entre o comprimento e a menor dimensão inferior a 11.

Tensão de compressão perpendicular às fibras — Relatada como tensão no limite proporcional. Não há tensão máxima claramente definida para essa propriedade.

Resistência ao cisalhamento paralela às fibras — Capacidade de resistir ao deslizamento interno de uma parte sobre outra ao longo das fibras. Os valores apresentados são a resistência média nos planos de cisalhamento radial e tangencial.

Flexão por impacto — No ensaio de flexão por impacto, um martelo com um peso determinado é deixado cair sobre uma viga a partir de alturas sucessivamente maiores até ocorrer a ruptura ou a viga se desviar 152 mm (6 pol.) ou mais. A altura máxima da queda, ou a queda que causa a falha, é um valor comparativo que representa a capacidade da madeira de absorver choques que causam tensões além do limite proporcional.

Resistência à tração perpendicular às fibras — Resistência da madeira às forças que atuam transversalmente à grã e que tendem a rachar uma peça.

Dureza — Geralmente definida como resistência à indentação usando um teste de dureza Janka modificado, medida pela carga necessária para embutir uma esfera de 11,28 mm (0,444 pol.) até metade do seu diâmetro. Os valores apresentados são a média das penetrações radiais e tangenciais.

Resistência à tração paralela às fibras – Tensão máxima de tração suportada na direção paralela às fibras. Existem relativamente poucos dados disponíveis sobre a resistência à tração de várias espécies de madeira clara paralela às fibras.

Sob a ótica da Engenharia Civil, compreender essa gama de propriedades, bem como a variabilidade é fundamental para a previsão do desempenho estrutural da madeira. A correlação entre massa específica, teor de umidade, anisotropia e permeabilidade explica, em grande medida, o comportamento mecânico e a durabilidade do material, permitindo sua aplicação em projetos que demandam segurança, confiabilidade e desempenho a longo prazo.

2.2 PESQUISAS DIRECIONADAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

A fundamentação teórica deste estudo baseia-se em uma Revisão Bibliográfica, conduzida com o propósito de sintetizar o conhecimento disponível acerca de pesquisas e normativas relacionadas à resistência à tração paralela às fibras da madeira. O objetivo deste capítulo é apresentar uma visão abrangente, reunindo as principais contribuições acadêmicas e trabalhos pertinentes que sustentam e contextualizam a proposta desta pesquisa, bem como os aspectos fundamentais do ensaio de caracterização da madeira.

O roteiro metodológico da revisão envolveu, inicialmente, a busca de normas internacionais diretamente nas plataformas oficiais de organismos normativos e, em seguida, a procura de trabalhos voltados ao estudo da madeira submetida à tração paralela às fibras.

O levantamento normativo teve início nas principais entidades reguladoras, como ISO, Eurocode e ASTM, utilizando-se as palavras-chave *timber*, *lumber* e *wood*. Embora todos esses termos possam ser traduzidos literalmente como “madeira”, cada um possui usos específicos conforme a região.

No Reino Unido, Nova Zelândia e Austrália, *timber* refere-se à madeira serrada e a produtos processados empregados em construções, revestimentos, decks e móveis. Já *lumber* é utilizado para designar a madeira recém-cortada, em estado mais rústico, geralmente ainda com casca. O termo *timber*, portanto, indica maior grau de processamento

em comparação ao *lumber*. Por sua vez, *wood* descreve a substância fibrosa que constitui a árvore, sendo também utilizado de maneira genérica para designar madeira em diferentes aplicações, como pisos, revestimentos e objetos.

Após essa etapa inicial, foram identificados nos documentos normativos os termos complementares: *structures*, *strength tension* e *tension parallel*.

Na segunda vertente da revisão da literatura, buscou-se reunir estudos científicos sobre a madeira tracionada paralelamente às fibras, publicados em âmbito nacional e internacional. As pesquisas foram realizadas nas bases CAPES Periódicos, SCOPUS, Web of Science, SciELO e no Google Scholar, empregando os seguintes descritores: madeira estrutural; tração paralela às fibras; propriedades físicas e mecânicas da madeira; madeira nativa; *timber structure*; *mechanical properties*; *mechanical characterization wood*; *tension tests parallel to grain*; *tensile strength*.

Foram adotados como critérios de inclusão apenas artigos disponíveis integralmente nas bases consultadas e publicados no período de 2010 a 2025. A leitura dos artigos selecionados possibilitou o retorno à busca por documentos normativos de outros países, como Índia e Rússia, inicialmente não considerados.

Para dar fluidez à leitura, este capítulo foi estruturado nas seguintes subseções:

- Códigos normativos;
- Trabalhos desenvolvidos na área de estudo;
- Considerações sobre a revisão bibliográfica.

2.2.1 CÓDIGOS NORMATIVOS

A madeira é um elemento biológico produzido por diversas espécies de árvores. As propriedades desse material são significativamente sensíveis às condições de ambiente em que as árvores estão inseridas. Diante dessa variabilidade é importante que as normas de caracterização das madeiras, para uso estrutural, conduzam os pesquisadores e projetistas a obterem os parâmetros tão fidedignamente quanto possível.

A compreensão normativa é mais bem desenvolvida quando se tem em mente a organização dos códigos em níveis de abrangência e graus de restrição. Essa tarefa é simplificada quando se observa a Figura 10.

Figura 10 – Níveis de abrangência e restrições normativas



Fonte: Calegari *et al.* (2013)

Para o projeto estrutural, os parâmetros a serem estabelecidos são definidos em função das solicitações que o elemento estrutural deverá suportar. Com o enfoque de conhecer as resistências das madeiras solicitadas à tração paralela às fibras, foram pesquisadas por normas internacionais que fizessem indicações de procedimentos de ensaio para obtenção de valores de resistência.

As referidas normas e suas instruções são indicadas a seguir:

- ISO 13061: *Physical and mechanical properties of wood*;
- Eurocode 5: *Design of timber structures*;
- ASTM D143: *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*;
- Indian Standard 1708: *Methods Of Testing of Small Clear Specimens of Timber*;
- Norma Russa 16483: *Method for determination of ultimate strength in tension along the grain*;
- ABNT NBR 7190: Critérios de dimensionamento.

2.2.1.1 ISO 13061

A ISO (*International Organization for Standardization*) é uma entidade na qual estão inseridas as associações de padronização/normalização de mais 162 países incluindo o Brasil e Portugal. A sede da ISO está situada em Genebra na Suíça.

Com relação aos procedimentos para estimativa da resistência última à tração paralela à grã, a (ISO 13061-6, 2014) recomenda que o corpo de prova tenha seção transversal retangular com dimensões de 10 mm a 30 mm na direção radial e de 5 mm a 10 mm na direção tangencial. O comprimento de referência do corpo de prova, considerando a região em que se espera ocorrer a ruptura, deve ser de 50 mm a 100 mm.

As extremidades dos corpos de prova devem ter uma forma que garanta que a falha ocorra dentro da região central e minimize a concentração de tensão área na transição. Também é permitido o uso de corpos de prova com extremidades laminadas.

Com relação à umidade, os corpos de prova podem ser ensaiados em verde ou secos ao ar. O teor de umidade dos corpos de prova ensaiados na condição verde deve ser igual ou superior ao teor de fibra ponto de saturação (PSF).

Os corpos de prova ensaiados em condições de secos ao ar devem ser condicionados a uma massa constante em uma atmosfera com umidade relativa de (65 ± 5) % e temperatura de (20 ± 2) °C. Considera-se que massa constante é atingida quando os resultados de duas pesagens sucessivas, realizadas num intervalo de 8 horas, não diferem em mais de 0,2 % da massa do corpo de prova.

Após serem preparados, os corpos de prova devem ser armazenados em condições que garantam que o teor de umidade permaneça inalterado até o teste

O ensaio deve ser realizado a uma taxa constante de carregamento ou de deslocamento da garra da prensa. O teste da peça deverá falhar em não menos que 0,5 min e não mais que 5 min a partir do início da aplicação do carregamento.

Os resultados obtidos em peças que falham fora da porção central do corpo de prova devem ser descartados.

Logo que o teste for concluído, corte a porção central do corpo de prova para a determinação do teor de umidade e densidade da madeira.

2.2.1.2 EUROCODE 5

O Eurocode representa a maior parte dos países da Europa e consiste no conjunto de normas europeias de responsabilidade do Comité Europeu de Normalização. Esse sistema visa unificar critérios e normativas de cálculo e dimensionamento de estruturas.

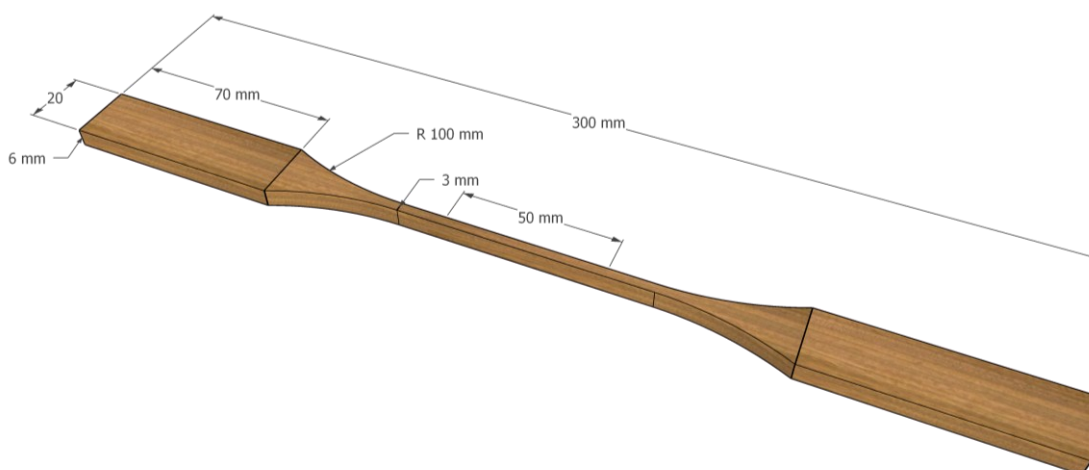
Com o enfoque na resistência à tração o EUROCODE 5, 1995 – *Design of timber structures* indica que a condição de resistência à tração paralela de cálculo deve ser superior à solicitação à tração de cálculo. Contudo, os parâmetros de para se chegar ao valor dessa resistência não é explícito diretamente nessa norma.

Para obtenção dos valores de resistência, bem como as geometrias e método de ensaio, o (EUROCODE 5, 1995) faz alusão às normas EN 338, EN 383, EN 384, EN 408, EN 14081-1,2,3,4. Contudo, em função da grande variação, nos diversos aspectos característicos da madeira, não são encontrados de forma explícita as geometrias dos corpos de provas e procedimentos de ensaio.

Vários métodos para determinar a resistência paralela às fibras da madeira estão em uso. De forma geral, todos requerem uma para o ensaio uma peça curvada de modo a induzir a ruptura por tração dentro de uma seção mínima paralela.

Alguns dos países possuem normas desenvolvidas a partir do Eurocode ou mesmo da ISO, a exemplo disso tem-se as normas britânicas as quais foram desenvolvidas como uma norma europeia (EN) e depois adotada pelo Reino Unido como uma Norma Britânica. A geometria do corpo de prova para tração paralela está inserida na BS 373, 1957, conforme pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Corpo de prova britânico para ensaio de tração paralela



Fonte: Adaptado de BS 373, 1957

Para o procedimento, a indicação de carregamento previsto na norma é que se faça a uma velocidade constante da cabeça de 0,05 pol/min.

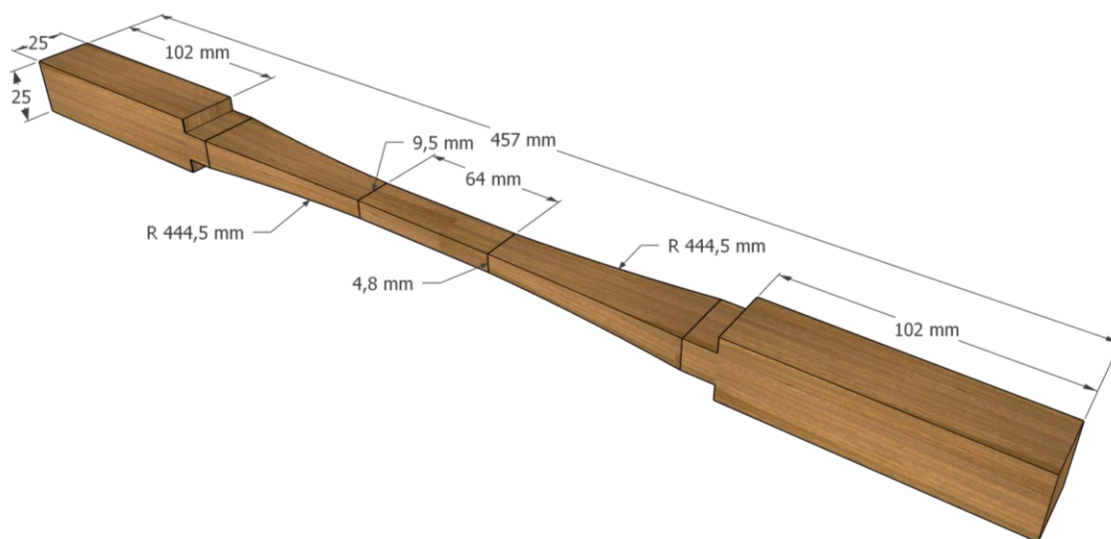
2.2.1.3 ASTM D143

A ASTM (*American Society for Testing and Materials*) é um órgão estadunidense de normalização. Esse órgão não é o único do País, porém tem um papel

dominante entre os padrões de desenvolvedores nos EUA. Além disso, atua também como suporte a milhares de comitês técnicos voluntários de todo o mundo e possui escritórios na Bélgica, Canadá, China, Peru entre outros.

Com relação à tração paralela o documento normativo (ASTM D143, 2014) indica que o corpo de tenha as dimensões expostas na Figura 12.

Figura 12 – Corpo de prova da ASTM para ensaio de tração paralela

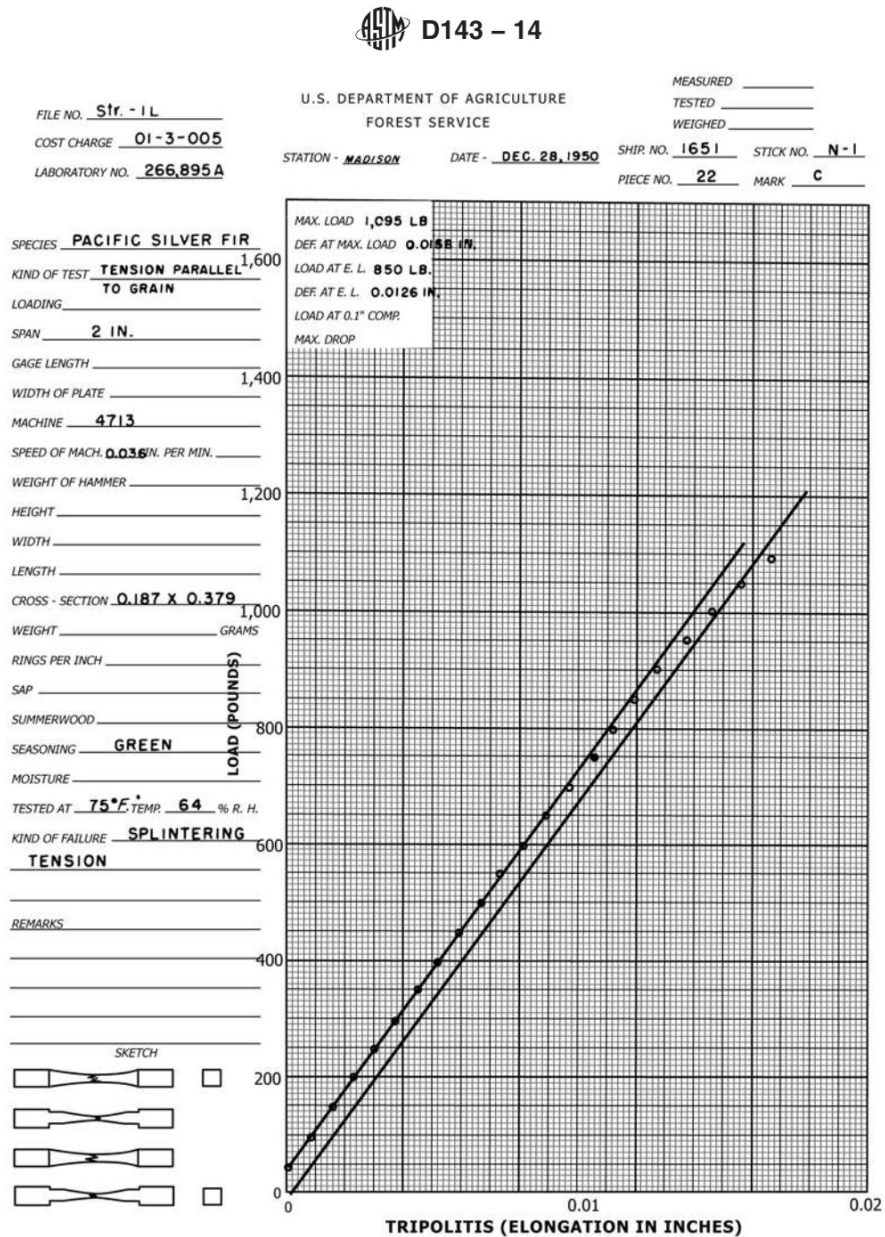


Fonte: Adaptado de ASTM D143, 2014

Para o procedimento é indicado que o carregamento seja aplicado continuamente durante todo o teste a uma taxa de movimento da garra móvel de 1mm/min. Devem ser feitas leituras de deslocamento e força até que o limite proporcional seja ultrapassado. A falha deverá ser esboçada na folha de registros.

O teor de umidade deve ser estabelecido a partir de uma amostra com cerca de 76 mm de comprimento, ser cortada da seção reduzida perto da falha. Um exemplo de planilha de registros do ensaio pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 – Exemplo de registro de resultados ASTM

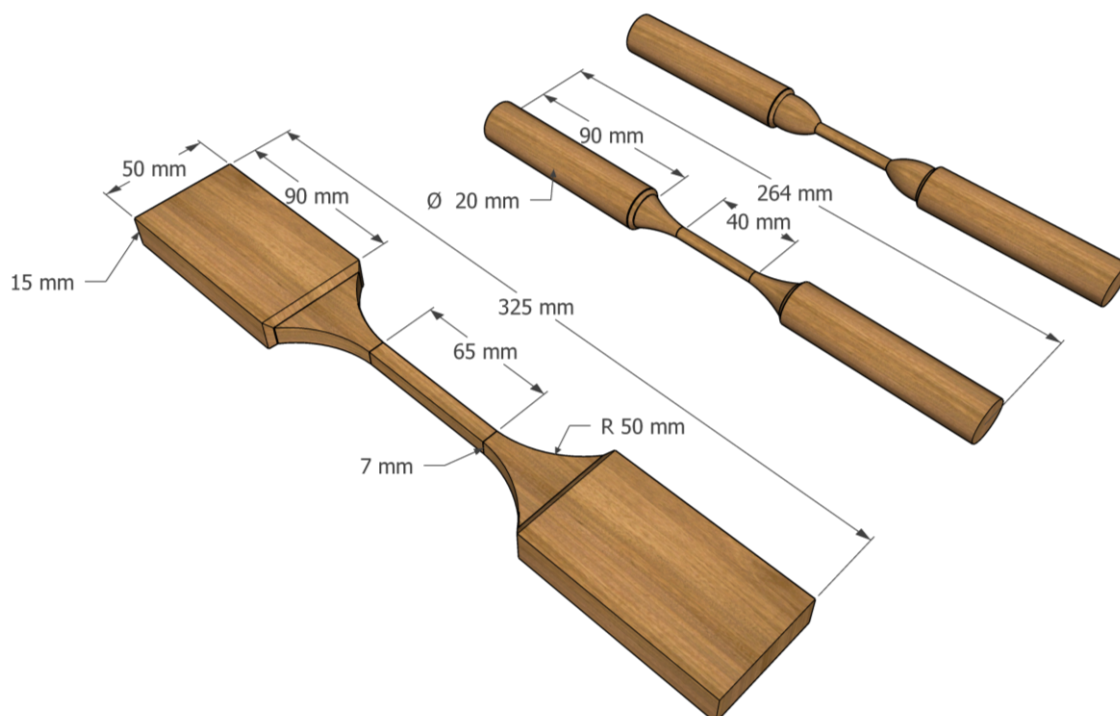


Fonte: (ASTM D143, 2014)

2.2.1.4 BUREAU OF INDIAN STANDARD 1708

O BIS (*Bureau of Indian Standards*) é o órgão nacional de padronização da Índia. O documento IS 1708, 1986 define que os corpos de provas pode ser um dos que estão na da Figura 14.

Figura 14 – Corpo de prova indiano para tração paralela



Fonte: Adaptado de IS 1708, (1986)

Para o procedimento o carregamento deve ser aplicado continuamente durante o teste, de modo que a cabeça móvel se desloque a uma taxa constante de um milímetro por minuto para ambos os tamanhos.

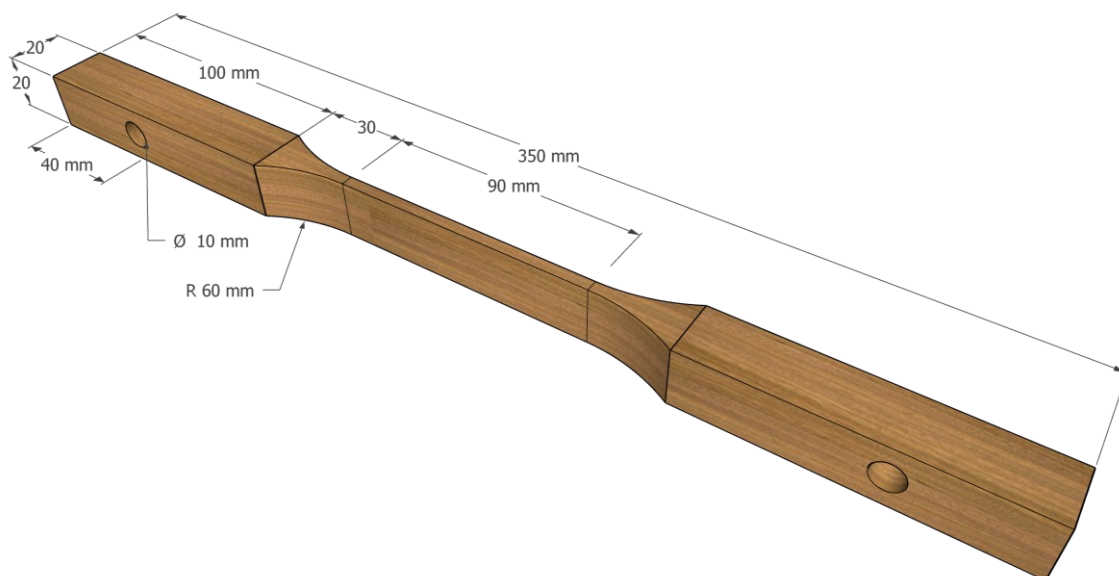
O alongamento deve ser medido até o limite de proporcionalidade para o deslocamento máximo previsto. A leitura final da carga na falha deverá ser registrada. Seria preferível remover o dispositivo de medição de alongamento antes que a carga máxima fosse atingida. A curva de tensão x deformação deve ser traçada.

2.2.1.5 NORMA RUSSA ГOCT 16483

O MEGANORM (*МЕГАНОРМ*) é o sistema de documentos normativos da Rússia que organiza as normas aceitas tem pela federação Russa. Dentre os documentos tidos como referência, são expostos os documentos estaduais do tipo GOST R (*ГOCT P*), que contemplam informações referentes às construções.

A norma (GOST 16483, 1973) se aplica à madeira e especifica um método para determinar resistência à tração ao longo das fibras. O padrão da norma, segundo a comissão responsável por ela, é compatível com a ISO 3345-75. No texto normativo é apresentada a geometria que pode ser vista na Figura 15.

Figura 15 – Corpo de prova russo para tração paralela



Fonte: Adaptado de GOST 16483, 1973

Na preparação da amostra o texto diz que os espaços em branco devem ser perfurados. É permitida a utilização de amostras constituídas por um prisma com seção transversal de 4 x 20 mm e comprimento de 350 mm e placas laterais coladas em suas extremidades (ao longo da face) com espessura de 8 mm e formato de acordo com o desenho da Figura 15. A resistência de colagem não deve ser inferior à resistência ao lascamento da madeira ao longo das fibras.

A precisão de fabricação, parâmetros de umidade e número de amostras devem atender aos requisitos do GOST 16483.0-89 (*ГОСТ Р*).

O procedimento de realização do teste é feito em uma velocidade tal que a amostra falhe dentro de 1,5 a 2 minutos a partir do momento do carregamento. Se forem utilizadas máquinas com acionamento eletromecânico, é permitido carregar a amostra uniformemente a uma velocidade de (15000 ± 4000) N/min ou, se o teste for em velocidade de deslocamento, a cabeça móvel deverá atuar à taxa de 10 mm/min.

Os testes são realizados até que a amostra seja destruída. A carga máxima é determinada com precisão de acordo com a divisão da escala do medidor de força. Os resultados dos testes de amostras, que falharam em uma parte que não esteja compreendida na região central, não são levados em consideração.

Após o teste a umidade das amostras é determinada de acordo com GOST 16483.7-71. A parte funcional do corpo de prova é tomada como amostra para determinar a umidade. É permitido determinar o teor de umidade de cada quatro amostras.

2.2.2 ABNT NBR 7190

De acordo com as diretrizes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os documentos normativos passam por um processo constante de revisão, e em média, a cada cinco anos são lançadas as atualizações do período. A norma brasileira para o projeto de estruturas de madeira teve uma significativa mudança e entrou em vigor no ano de 2022, substituindo a versão que vigorava desde 1997.

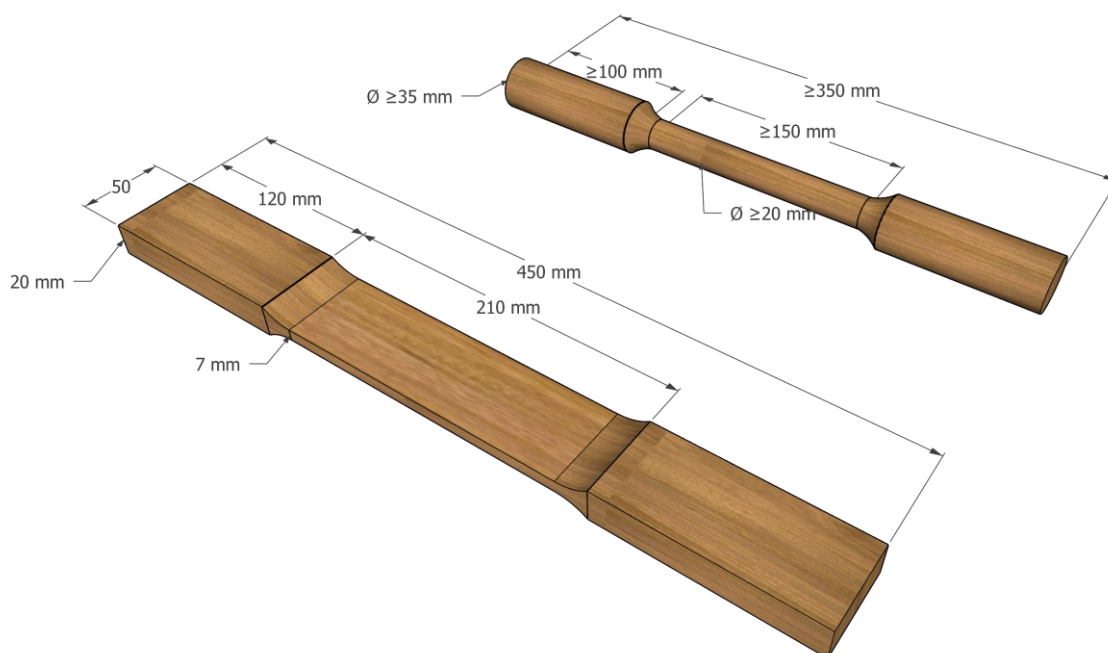
Dentre as diversas mudanças destaca-se o fato de que agora o documento está estruturado em sete partes, as quais estão indicadas a seguir:

- ABNT NBR 7190-1, Critérios de dimensionamento;
- ABNT NBR 7190-2, Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira;
- ABNT NBR 7190-3, Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas;
- ABNT NBR 7190-4, Métodos de ensaio para caracterização de peças estruturais;
- ABNT NBR 7190-5, Métodos de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos;
- ABNT NBR 7190-6, Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural;
- ABNT NBR 7190-7, Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada cruzada estrutural.

As informações e considerações fundamentais para esse trabalho estão inseridas na parte três. No escopo da ABNT NBR 7190-3, 2022 destaca-se que os métodos são aplicáveis para corpos de prova isentos de defeitos, provenientes de florestas nativas.

Na seção 3 estão dispostos os parâmetros para a estimativa da resistência na tração paralela às fibras de um lote de madeira, considerado homogêneo. A geometria a ser adotada para os corpos de prova pode ser uma das que são mostradas na Figura 16.

Figura 16 – Corpos de prova da ABNT para ensaio de tração paralela



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-3 (2022)

As medidas indicadas na figura, particularmente no trecho central, devem ser feitas com precisão de 0,1 mm. Para o ajuste do corpo de prova à máquina, devem ser usados pares de garra simétricos.

De acordo com a ABNT NBR 7190, a caracterização da resistência de um lote de madeira serrada pode ser realizada em três amplitudes diferentes, completa, mínima e simplificada. Resumidamente, a caracterização completa detalha todas as propriedades da madeira, demanda no mínimo 30 corpos de prova; a caracterização mínima fornece um conjunto menor de propriedades e são necessários no mínimo 12 corpos de prova; a caracterização simplificada aborda um conjunto ainda mais restrito de propriedades, buscando a otimização de custos e tempo, demandando no mínimo 6 corpos de prova. Os detalhes dessas caracterizações estão dispostos a seguir.

2.2.2.1 CARACTERIZAÇÃO COMPLETA DA MADEIRA SERRADA

A caracterização completa é feita a partir da determinação de uma série de propriedades, conforme apresentado na sequência, referentes à condição padrão de umidade ($U = 12\%$):

a) resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$) a ser determinada em ensaios de compressão uniforme, com duração total entre 3 min e 8 min, de corpos de prova com seção transversal quadrada de 5 cm de lado e com comprimento de 15 cm;

b) rigidez longitudinal – módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}) a ser determinada em ensaios de compressão uniforme, com duração total entre 3 min e 8 min, de corpos de prova com seção transversal quadrada de 5 cm de lado e com comprimento de 15 cm;

c) resistência à tração paralela às fibras ($f_{t,0}$) a ser determinada em ensaios de tração uniforme, com duração total de 3 min a 8 min, de corpos de prova alongados, com trecho central de seção transversal uniforme de área A e comprimento não menor que 8 A, com extremidades mais resistentes que o trecho central e com concordâncias que assegurem a ruptura no trecho central;

d) resistência à compressão perpendicular às fibras ($f_{c,90}$) a ser determinada em um ensaio de compressão uniforme, com duração total de 3 min a 8 min, de corpos de prova de seção quadrada de 5 cm de lado e com comprimento de 10 cm;

e) rigidez perpendicular às fibras – módulo de elasticidade na compressão perpendicular às fibras (E_{c90}) a ser determinada em um ensaio de compressão uniforme, com duração total de 3 min a 8 min, de corpos de prova de seção quadrada de 5 cm de lado e com comprimento de 10 cm;

f) resistência à tração perpendicular às fibras ($f_{t,90}$) a ser determinada por meio de ensaios padronizados;

g) resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v,0}$) a ser determinada pelo ensaio de cisalhamento paralelo às fibras;

h) resistência de embutimento paralelo às fibras ($f_{e,0}$) e resistência de embutimento perpendicular às fibras ($f_{e,90}$) a serem determinadas por meio de ensaios padronizados;

i) resistência ao fendilhamento (f_{s0}) a serem determinadas por meio de ensaios padronizados;

j) resistência à flexão (f_M) a serem determinadas por meio de ensaios padronizados;

k) densidade aparente (ρ_{ap}), determinada com os corpos de prova a 12% de umidade.

NOTA Admite-se que a resistência e a rigidez da madeira não sofram variações significativas para umidade acima de 25%, e admite-se como desprezível a influência da temperatura na faixa usual de utilização de 10 °C a 65 °C

2.2.2.2 CARACTERIZAÇÃO MÍNIMA DA RESISTÊNCIA DE ESPÉCIES DE MADEIRA POUCO CONHECIDAS

Para projeto estrutural, a caracterização mínima de espécies pouco conhecidas deve ser feita por meio da determinação dos valores indicados a seguir, referentes à condição-padrão de umidade, de acordo com a ABNT NBR 7190-3 (2022):

a) resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$);

b) resistência à tração paralela às fibras ($f_{t,0}$): permite-se admitir, na impossibilidade da realização do ensaio de tração uniforme, que este valor seja igual ao da resistência convencional na flexão;

c) resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v,0}$);

d) densidade aparente.

2.2.2.3 CARACTERIZAÇÃO SIMPLIFICADA DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA SERRADA

É permitida a caracterização simplificada das resistências da madeira de espécies usuais a partir dos ensaios de compressão paralela às fibras. Para as resistências a esforços normais, admite-se um coeficiente de variação de 18% e para as resistências a esforços tangenciais um coeficiente de variação de 28%. Para as espécies usuais, na falta da determinação experimental, permite-se adotar as seguintes relações para os valores característicos das resistências, conforme as Equações de 3 a 8.

$$\frac{f_{c0,k}}{f_{t0,k}} = 0,77 \quad (3)$$

$$\frac{f_{c90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25 \quad (4)$$

$$\frac{f_{e0,k}}{f_{c0,k}} = 1,0 \quad (5)$$

$$\frac{f_{e90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25 \quad (6)$$

$$\frac{f_{tM,k}}{f_{t0,k}} = 1,0 \quad (7)$$

$$\frac{f_{t90,k}}{f_{t0,k}} = 0,05 \quad (8)$$

2.2.2.4 CARACTERIZAÇÃO DA RIGIDEZ DA MADEIRA

A caracterização completa de rigidez das madeiras é feita por meio da determinação dos seguintes valores, que devem ser referidos à condição-padrão de umidade ($U = 12\%$):

a) valor médio do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras: $E_{c0,med}$ determinado com pelo menos dois ensaios;

b) valor médio do módulo de elasticidade na compressão perpendicular às fibras: $E_{c90,med}$ determinado com pelo menos dois ensaios.

Admite-se que sejam estatisticamente equivalentes os valores médios dos módulos de elasticidade à compressão e à tração paralelas às fibras: $E_{c0,med} = E_{t0,med}$. A caracterização simplificada da rigidez das madeiras pode ser feita apenas na compressão paralela às fibras, admitindo-se a relação dada na Equação 9.

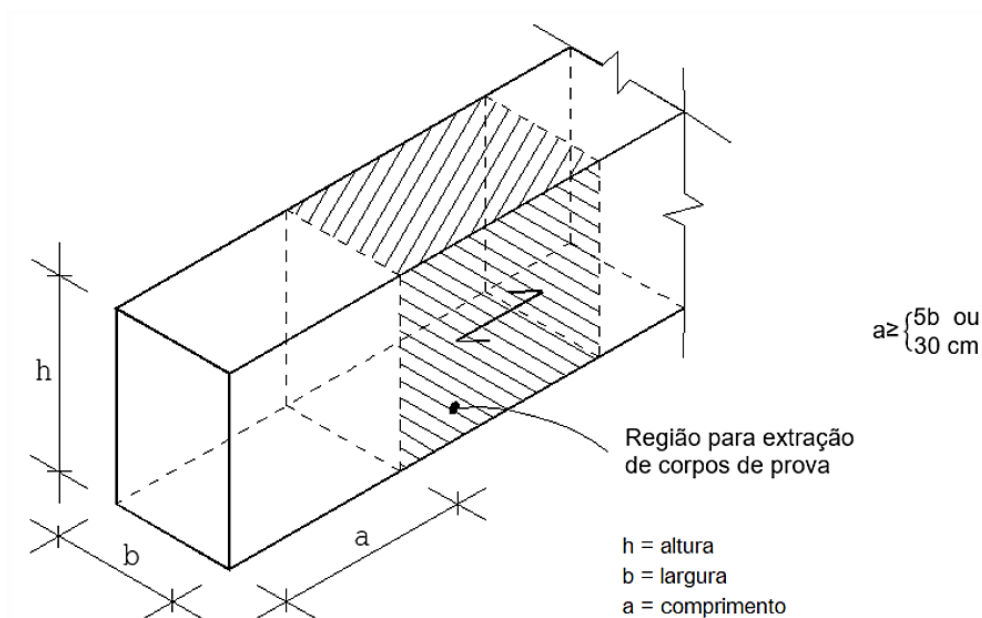
$$E_{c90} = \frac{1}{20} E_{c0} \quad (9)$$

Os corpos de prova são aplicáveis à madeira serrada com seção transversal retangular, sujeita a uma carga de curta duração (cerca de 1 min). O procedimento de avaliação não se destina ao controle de qualidade ou à aceitação de lotes de madeira.

Os corpos de prova devem ser retirados de regiões afastadas das extremidades das peças de pelo menos 5 vezes a menor dimensão da seção transversal, mas não inferior a 30 cm (ver Figura 17).

Para a investigação direta de lotes de madeira serrada considerados homogêneos, cada lote não pode ter volume superior a 12 m³.

Figura 17 – Diagrama para extração dos corpos de prova



Fonte: ABNT NBR 7190-3 (2022)

2.2.3 TRABALHOS DESENVOLVIDOS NA ÁREA DE ESTUDO

Nessa seção está disposta a síntese dos trabalhos desenvolvidos nos últimos quinze anos e que têm relação com a presente tese. Os artigos foram organizados cronologicamente.

Calegari et al. (2013) estudaram sobre as normalizações técnicas e seus níveis de abrangência. No trabalho concentraram-se nas normas técnicas destinadas à caracterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira maciça a partir de corpos de prova livres de defeitos. A proposta teve como princípio a ideia de que, com a padronização os resultados poderiam ser comparáveis em diferentes épocas e locais. Como conclusão afirmaram que diante da quantidade de estudos já desenvolvidos a partir de corpos de prova isento de defeitos, bem como pela facilidade de execução e pelo reduzido custo financeiro, tais procedimentos dificilmente serão substituídos ou extintos dos laboratórios de tecnologia da madeira. Além disso, destacaram que diante de situações específicas como a falta de equipamentos ou disponibilidade e procedimentos mais expeditos, as normas técnicas podem ser utilizadas com adaptações desde que descritas no relatório técnico (CALEGARI *et al.*, 2013).

Chen *et al.* (2015) desenvolveram um trabalho com intuito de conhecer o efeito do tamanho do corpo de prova nas propriedades mecânicas do bambu na tração. Foram testadas fibras individuais e feixes de fibras de bambu obtidos tanto da maceração química como da maceração mecânica. A resistência à tração da fibra de bambu simples macerada quimicamente foi maior do que a das fibras maceradas mecanicamente. Além disso, verificaram também que as propriedades mecânicas das tiras de bambu foram inferiores às das amostras feitas a partir da porção externa do bambu, mas superiores às de amostras feitas da porção interna do bambu.

Com o interesse em avaliar efeito da taxa de carregamento nas propriedades micromecânicas de madeira de carvalho, Büyüksari (2017) construiu corpos de prova com micro dimensões e realizou ensaios de resistência à flexão, módulo de elasticidade na flexão, resistência à compressão paralela à grã e a resistência à tração paralela à grã. Foram aplicadas três taxas de carregamento diferentes para cada teste. As primeiras taxas de carregamento determinadas de acordo com os padrões ISO a segunda e terceira taxas de carregamento foram determinadas por metade e um quarto das taxas de carregamento padrão. Os resultados mostraram que, estatisticamente a taxa de carregamento afetou significativamente o módulo de elasticidade, a resistência à tração e a resistência à compressão da madeira de carvalho, enquanto a resistência à flexão não foi afetada. Em geral, os valores de resistência e módulo de elasticidade diminuíram com a redução da taxa de carregamento.

Com o objetivo de investigar propriedades micromecânicas do carvalho (*Quercus petraea*) e comparar com valores de corpos de prova de tamanho padrão, Büyüksari (2017) construíram corpos de prova com micro dimensões e com dimensões padrão e realizaram ensaios de resistência à flexão, módulo de elasticidade na flexão, resistência à compressão e

à tração paralela à grã. Os resultados indicaram que a resistência à flexão, módulo de elasticidade e resistência à compressão das amostras de tamanho micro foram menores em comparação com as amostras de tamanho padrão, enquanto a resistência à tração foi maior nas amostras de tamanho micro. Os valores de resistência à compressão de amostras de tamanho micro e padrão não foram significativamente diferentes. As análises de regressão indicaram uma regressão linear positiva entre as propriedades mecânicas de amostras de tamanho micro e padrão. Na conclusão do artigo afirmaram que amostras com micro dimensões podem ser usadas para estimar as propriedades mecânicas da madeira de carvalho quando a obtenção de corpos de prova de tamanho padrão não é possível.

Gašparík; Gaff; Babiak (2017) realizaram simulações de tração de camadas de madeira usando o método de elementos finitos. No trabalho foi investigado qual a influência da espessura do material na composição da camada individual solicitada à tração. A simulação foi realizada tanto para madeiras macias (representado pelo álamo tremedor) quanto madeiras duras (representado pela faia) e em função das espessuras de camadas. Diante dos resultados obtidos, puderam concluir que o material macio foi o elo mais fraco, e que material duro pode suportar maior tensão de tração e deformação sem quebrar. Logo, a resistência à tração final, de todo o material em camadas, depende diretamente disso.

Crespo *et al.* (2020) desenvolveram um trabalho para estimar as propriedades mecânicas de pequenos corpos de prova de *Eucalyptus globulus Labill.* A proposta do trabalho foi atender uma necessidade crescente sobre a aplicação de parâmetros necessários à modelagem numérica, dessa madeira, por elementos finitos para o desenvolvimento de produtos de madeira engenheirada. Os resultados obtidos indicaram o grande potencial do eucalipto para aplicações estruturais. As melhores correlações entre tensão última e módulo de elasticidade foram encontradas na flexão e na tensão paralela à grã.

De La Cruz *et al.* (2020) avaliaram os protocolos da ISO 22157, do método Pittsburgh e da ASTM D143 com uma modificação no procedimento, para determinar a resistência à tração paralela nas fibras do Bambu. O estudo teve como principal desafio a falha prematura dos testes devido à força de fixação e falha por deslizamento nas garras. Para comparação metodológica, foram levados em conta a duração do teste, a taxa de carga e transmissão, a preparação da amostra, fabricação de equipamentos e execução dos três protocolos. As propriedades físicas dos bambus, como teor de umidade, densidade e encolhimento, também foram medidas no estudo. Com os resultados puderam concluir que o método da ASTM D143 modificado é o mais viável para usar em testes de resistência à tração paralela à fibra dos bambus. O ASTM D143 modificado produziu a maior resistência à tração em comparação com amostras testadas pela ISO 22157 e pelo teste de Pittsburgh produziu a menor resistência à tração. Além disso, o método ASTM D143 modificado produziu o menor intervalo

de confiança que implicava em boa consistência e foi o teste com menor duração e o mais fácil de executar.

Chen *et al.* (2022) avaliaram o comportamento na tração anisotrópica, de 240 pequenas amostras de *Eucalyptus nitens*, com uma diversidade de ângulos de grã tanto em condições secas quanto úmidas. As amostras tiveram uma caracterização de tração altamente anisotrópica tanto em baixa teor de umidade ($U = 12\%$) quanto alto teor de umidade ($U >$ seu ponto de saturação da fibra). Os resultados mostraram que, em condições de alto teor de umidade, a madeira apresentou menor resistência à ruptura e mais ductilidade em todos os ângulos de grã do que em condições de baixo teor de umidade. Dentre as conclusões, indicaram que os fatores de modificação da umidade da madeira de eucalipto, em um nível médio são superiores aos do material de construção tradicional, o *Pinus radiata*, e que que o *E. nitens* é promissor como material a ser utilizado em membros elásticos em condições de saturação de água.

Karwat *et al.* (2022) realizaram um trabalho no qual foi analisada a influência do formato das amostras na resistência à tração paralela às fibras da madeira de faia. Para tal, construíram amostras cilíndricas com afilamento cônico e com afilamento em funil que foram comparadas com amostras padrão cônicas unilaterais com seção transversal retangular. O resultado experimental indicou que as amostras cilíndricas têm maior resistência à tração do que as amostras retangulares padrões. Já o formato do afilamento nas amostras cilíndricas (cônica ou funil) não foi estatisticamente significativo.

Zhang *et al.* (2022) realizaram um estudo sobre o comportamento da madeira de *Paulownia sp.* sujeita a esforços de compressão e tração paralelo à grã em temperaturas elevadas. As propriedades da madeira de *Paulownia sp.*, à temperatura ambiente, são bem conhecidas na China, porém, o comportamento mecânico em temperaturas elevadas é muito limitado. Para resolver esse problema, foi realizada análise térmica na qual investigaram a perda de massa e o calor de reação durante a evaporação da água. Também, foram realizados ensaios de compressão e tração paralelos às fibras, conduzido em amostras com temperaturas variando de 20 °C a 220 °C.

Verificou-se que a torção era o principal modo de ruptura dos corpos de prova comprimidos, enquanto a ruptura transversal foi frequentemente observada nos corpos de prova tracionados. Com relação as resistências houve um aumento significativo à medida que a temperatura subiu de 100 °C para 140 °C, isso se deveu à evaporação da água e ao endurecimento da lignina seca. Por fim concluíram que a curva de projeto, sugerida pela EN 1995-1-2, é muito conservadora (até 76%) na estimativa da resistência de compressão paralela à grã forças e, ligeiramente, não conservadora (menos de 6%) na previsão da

resistência à tração paralela à grã quando a temperatura estava abaixo de 60 °C. Além disso, constataram uma significativa redução (aproximadamente 40%) na capacidade de deformação foi encontrada quando a temperatura foi superior a 180 °C.

2.2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

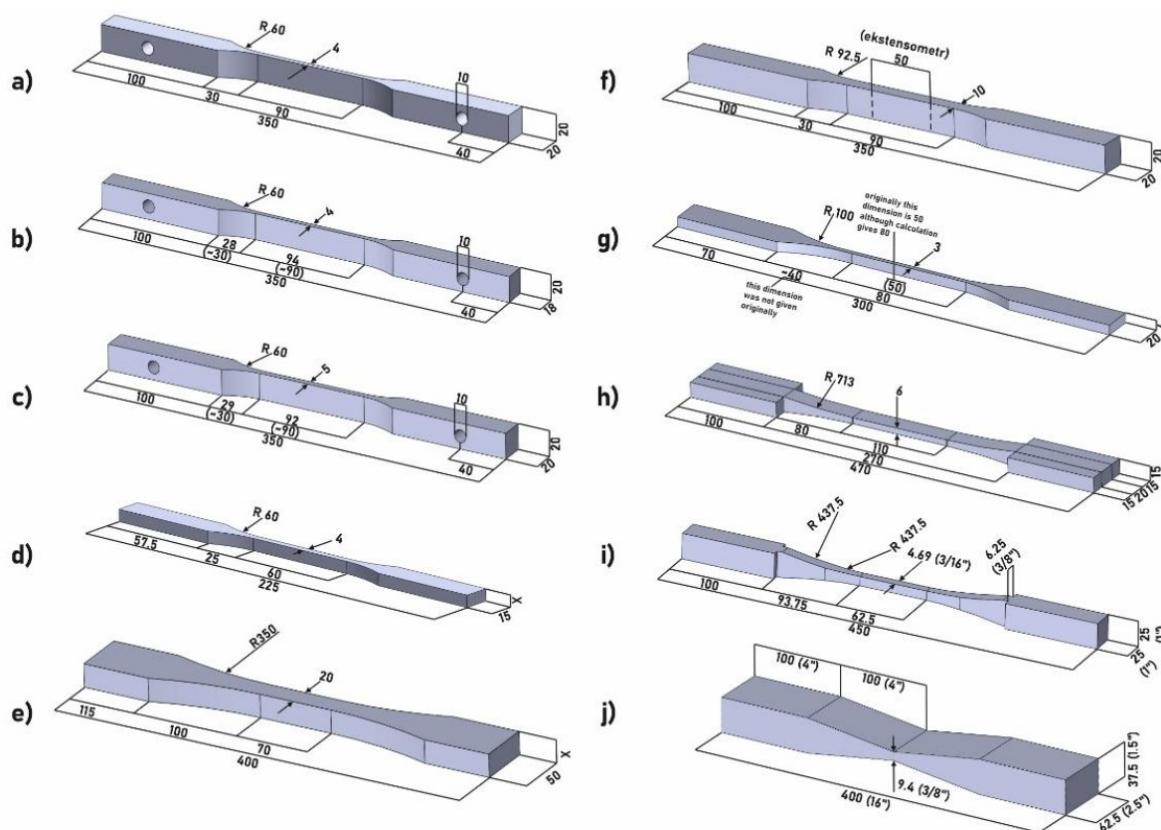
A construção do capítulo de revisão bibliográfica, produziu seções que contribuíram significativamente para o desenvolvimento do estudo em questão. A primeira parte que permitiu o aprofundamento em conceitos essenciais incoerentes, levando a exploração do tema dessa pesquisa. A segunda parte, intitulada “Código normativos”, explorou os aspectos fundamentais de normas que propõem métodos para estimar a resistência à tração paralela da madeira. A terceira, nomeada de “Trabalhos desenvolvidos na área de estudo”, ofereceu uma análise criteriosa das principais pesquisas realizadas nos últimos 15 anos, permitindo elucidar lacunas no conhecimento existente e reconhecer a originalidade da pesquisa aqui proposta.

Com relação às propostas normativas vistas na seção 2.2.1, foi possível entender que desde que a madeira tem sido utilizada como elemento estrutural, conhecer suas propriedades físicas e mecânicas é algo extremamente importante. Em função das diversas variações que este material possui, que vão desde a produção e os aspectos anatômicos, até a classificação e estimativa de valores de resistência, a necessidade de padronização é algo de extrema importância.

Além disso, percebeu-se que com o passar do tempo algumas modificações foram feitas nos corpos de prova. A motivo dessas modificações são bastante variados, em geral contemplam os avanços tecnológicos dos equipamentos de ensaio, os aspectos da evolução na utilização da madeira estrutural, quesitos de padronização nos procedimentos de carregamento e leitura dos dados entre outros.

Na Figura 18 podem ser vistos diversos corpos de prova, alguns ainda em uso e outros que foram substituídos nas indicações normativas.

Figura 18 – Corpos de prova normalizados para resistência à tração paralela: (a) GOST 16483.23 [1973], (b) PN-D-04107 [1954], (c) PN-D-04106 [1981], (d) amostra menor de compensado do CT CЭB 2377-80 [1980], (e) amostra maior de compensado do CT CЭB 2377-80 [1980], (f) PN-D-04118 [1959], (g) BS 373:1957 [1957], (h) DIN 52188 [1979], (i) ASTM D 143 [1994, 2014], (j) antiga amostra americana em forma de cunha Hatt W. K. [1906]



Fonte: Karwat *et al.* (2022)

Além dos códigos normativos já mencionados há, ainda, diversas outras normas que dão enfoque na madeira tracionada axialmente. Tais normas estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Recopilação normativa para madeira tracionada

Organismo Normalizador	Denominação	Título
International Standardization Organization – ISO	ISO 3345, 1975	Wood – Determination of ultimate tensile stress parallel to grain
Comisión Panamericana de Normas Técnicas – COPANT	COPANT 742, 1975	Maderas: método de ensayo de tracción paralela al grano
Instituto Nacional de Normalización – INN	NCh975, 2018	Madera – Determinación de las propiedades mecánicas – Ensayo de tracción perpendicular a las fibras
Asociación Española de Normalización y Certificación – AENOR	UNE 56538, 1978	Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular a las fibras
Association Française de Normalisation – AFNOR	NF B51-010, 1942	Bois – Essai de traction perpendiculaire aux fibres
Deutsches Institut für Normung – DIN	DIN 52188, 1979	Prüfung von Holz; Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser

Fonte: Adaptado de Calegari *et al.* (2013)

Com relação às normas inseridas na Tabela 1, destaca-se que o INN, a AENOR e a AFNOR apesar de abordarem a madeira tracionada, não possuem um ensaio para a estimativa da tração paralela de forma direta.

Tudo isso mostra que as normas são produzidas de forma que seja possível realizar ensaios com resultados cada vez mais precisos, garantindo a segurança e economia no uso da madeira estrutural. Nesse contexto, o enfoque dessa tese, quando o elemento é tracionado de paralelamente às fibras, também é inserido.


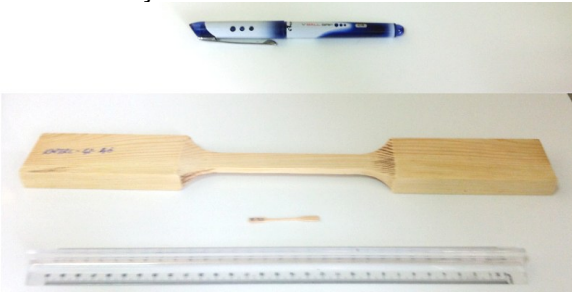
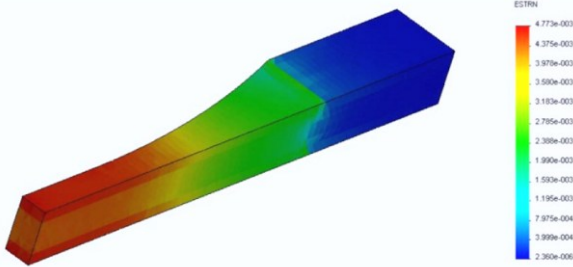
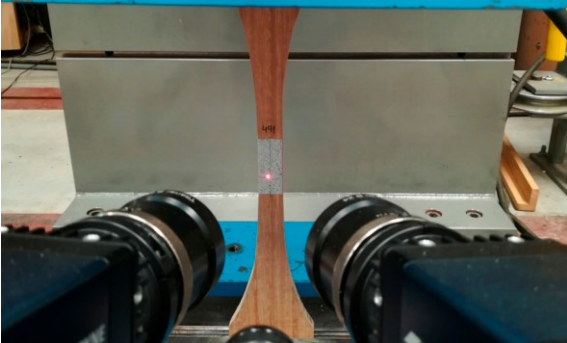
Em uma análise geral sobre a seção 2.2, foi possível perceber que, apesar da madeira ser um material estrutural muito antigo, com indicações de que foi o primeiro material estrutural utilizado acerca de mais de 10.000 anos, o estudo da madeira estrutural é um campo muito amplo. A pesquisa nessa área está em plena expansão e há muito a ser conhecido com maiores riqueza de detalhes e precisão.

Muitos têm sido os avanços no uso da madeira estrutural, como por exemplo as madeiras lameladas coladas e o uso de compósitos que atuam nos aspectos aos quais a madeira por si só não desempenha tão bem, ou ainda, apresenta potencial para melhorar.

Mesmo quando se tem a madeira com melhorias nas técnicas de cultivo, ou exploração racional das florestas nativas, as estimativas das propriedades de resistência desse material natural e seus compósitos, ainda passam por grandes desafios. Especialmente para a madeira tracionada paralelamente às fibras, as respostas dos ensaios são muito diversificadas.

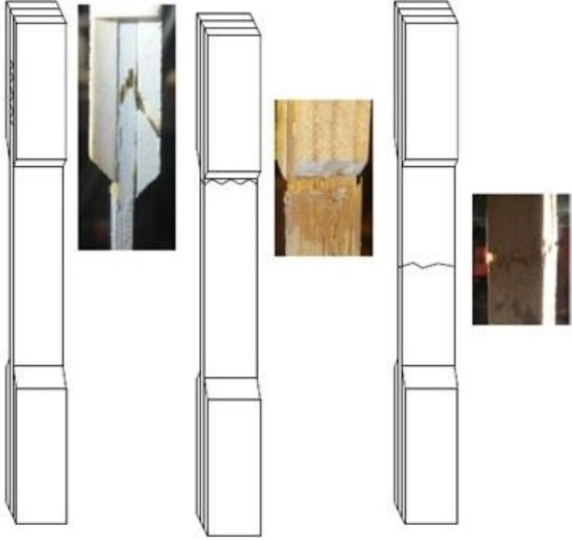
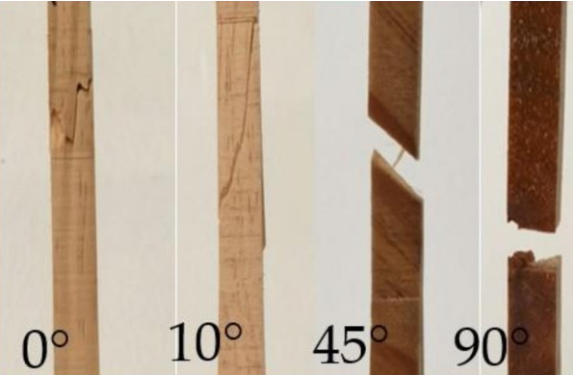
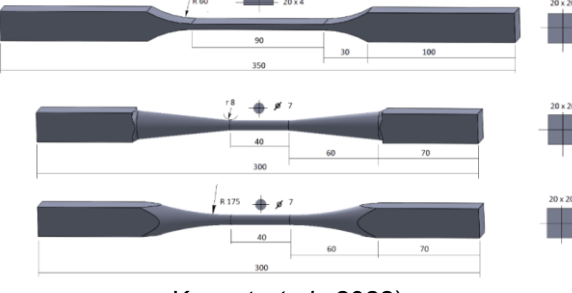

Diante disso, foi dado enfoque nas pesquisas por trabalhos específico com modificações de geometria ou significativas alterações de procedimentos. Os artigos com essas características estão resumidos na seção 2.2.2 e no Quadro 1 são mostradas as principais modificações. Em suma, não foram encontrados trabalhos com novas sugestões ou ajustes para ensaio da resistência à tração como é proposto no desenvolvimento do estudo proposto para essa tese.

Quadro 1 – Resumo das modificações nos ensaios de tração paralela

<p>Modificação: Escala reduzida da amostra</p>  <p>Chen <i>et al.</i> (2015)</p>	<p>Modificação: Escala reduzida da amostra</p>  <p>Büyüksari <i>et al.</i> (2017)</p>
<p>Modificação: Espessuras das camadas de composição da amostra</p>  <p>Gašparík; Gaff; Babiak (2017)</p>	<p>Modificação: Escala reduzida da amostra</p>  <p>Crespo <i>et al.</i> (2020)</p>

Continua...

Continuação Quadro 1

<p>Modificação: Procedimento de ensaio com diferentes taxas carregamento</p>  <p>De La Cruz <i>et al.</i> (2020)</p>	<p>Modificação: Procedimento de ensaio com variações nos ângulos em relação às fibras</p>  <p>0° 10° 45° 90°</p> <p>Chen <i>et al.</i> (2022)</p>
<p>Modificação: Diferentes formatos dos afileamentos de transição das extremidades para o centro</p>  <p>Karwat <i>et al.</i>, 2022)</p>	<p>Modificação: Procedimento com variação de temperaturas (elevadas)</p>  <p>20 60 100 120 140 160 180 200 220</p> <p>Zhang <i>et al.</i> (2022)</p>

Fonte: Indicadas nas figuras

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Com a finalidade de orientar a reprodução dos experimentos, compreender melhor a análise dos resultados e, permitir estudos com outras espécies de madeira, este capítulo tem o objetivo de apresentar a estrutura metodológica da pesquisa. Os aspectos principais considerados na elaboração desse capítulo foram organizados em duas seções: análise experimental e análise numérica.

3.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Com o interesse em conhecer o comportamento das modificações nos corpos de prova para diversas classes de resistência, foram utilizadas quatro espécies de madeiras de florestas nativas, com o intuito de avaliar a resposta de ruptura para diferentes grupos de resistência, as quais estão indicadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Espécies de madeiras estudadas na pesquisa

Nome popular	Nome científico	Sigla adotada ¹
Cambará Rosa	<i>Erismia uncinatum</i>	Erun
Cupiúba	<i>Goupia glabra</i>	Goup
Angelim Pedra	<i>Hymenolobium petraeum</i>	Hype
Tatajuba	<i>Bagassa guianensis</i>	Bagu

¹ Para construção dos gráficos

Fonte: Autoria própria (2025)

Destaca-se que as madeiras foram adquiridas de empresas do ramo madeireiro, situadas na região central do estado de São Paulo, e que as árvores foram extraídas de áreas certificadas localizadas na região sul do estado do Pará.

Os lotes com pranchas de madeiras, com volume máximo de 12 m³, foram estocados nas dependências do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP). No LaMEM também foram produzidos e ensaiados todos os corpos de prova utilizados na pesquisa. Destaca-se que os corpos de prova testados estavam isentos de defeitos, conforme exigido pela normativa brasileira.

A caracterização da madeira é uma etapa precedente à sua utilização estrutural. Nesse processo obtém-se os dados quantitativos relacionados às propriedades físicas, como

o teor de umidade (U) e a densidade (ρ), bem como às propriedades mecânicas, incluindo resistências e módulos de elasticidade. Esses parâmetros foram, posteriormente, utilizados na modelagem numérica e como referência comparativa dos estudos paramétricos.

Diante da quantidade e variedade de Corpos de prova utilizados no estudo e, com o intuito de tornar a leitura mais fluida, o quantitativo de amostras foram organizados na Tabela 3. Os detalhes de geometria, procedimentos dos ensaios e particularidades são apresentados, posteriormente, nesta seção.

Tabela 3 – Quantidade de amostras para estimar as propriedades

Propriedade estimada	Geometria	Quantidade de amostras
U e ρ_{ap}	Figura 19a	8
E_{c0}	Figura 19b	3
E_{t0}	Figura 24	3
f_{c0}	Figura 19b	12
f_{t0}	Figura 24 e Figura 26	48*
TOTAL		74

* Para cada configuração de geometria foram consideradas 12 amostras.

Fonte: A autoria própria (2025)

Como foram investigadas quatro espécies de madeira, o número total de amostras da pesquisa foi 296, das quais 192 amostras foram especificamente utilizadas para os ensaios de tração na direção paralela às fibras.¹¹

Todos os Corpos de prova utilizados na pesquisa foram produzidos com precisão geométrica de 0,1 mm. Para o ajuste dos Corpos de prova de tração à máquina, foram usados pares de garra simétricos. E em todos os ensaios o carregamento foi aplicado de forma monotônica e a uma taxa de 10 MPa/min.

3.1.1 TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade da madeira corresponde à relação entre a massa da água nela contida e a massa da madeira seca. Esse parâmetro permite o ajuste das propriedades mecânicas de resistência e de rigidez. A umidade (U) é então determinada conforme a Equação 10 .

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (10)$$

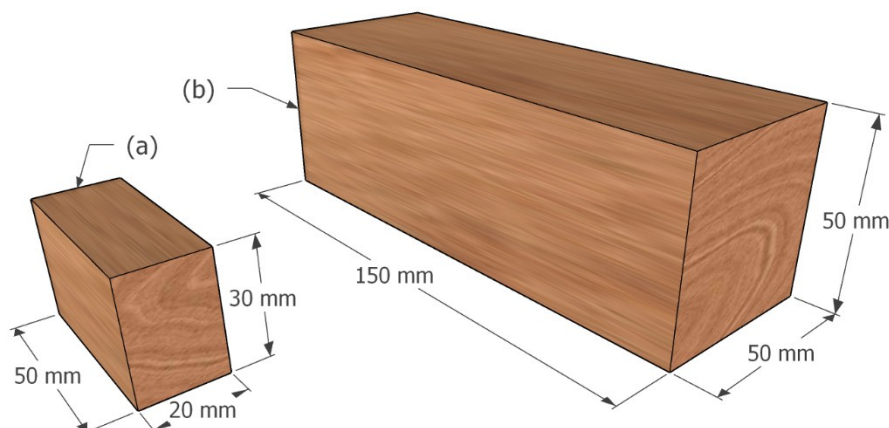
em que:

m_i : massa inicial do corpo de prova, expressa em gramas (g);

m_s : massa da madeira do corpo de prova, expressa em gramas (g).

A geometria dos corpos de prova prismáticos é apresentada na Figura 19.

Figura 19 – Geometria dos corpos de prova prismáticos: (a) densidade e umidade (b) resistência e módulo de elasticidade à compressão



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190-3 (2022)

O procedimento para estimar o teor de umidade no lote de madeira segue as etapas descritas a seguir:

- a) Determina-se a massa inicial do corpo de prova (m_i) com uma precisão de 0,01 g.
- b) O corpo de prova é então inserido em uma câmara de secagem, mantida a uma temperatura máxima de $103\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$.
- c) Durante o processo de secagem, a massa do corpo de prova é medida a cada intervalo de 6 horas, até que ocorra uma variação, entre duas medidas consecutivas, menor ou igual a 0,5% da última massa medida. Essa última massa é considerada como a massa seca (m_s).
- d) Determina-se a umidade conforme a Equação 10.

3.1.2 DENSIDADE APARENTE

A densidade consiste na relação entre a massa e volume do corpo de prova. O método de ensaio tem como objetivo a determinação da densidade aparente na umidade de referência de 12% em um lote de madeira considerado homogêneo. O procedimento de ensaio segue as seguintes etapas:

- a) Quantificação da massa e do volume em Corpos de prova com um teor de umidade de 12%.
- b) Cálculo da densidade aparente (ρ_{ap}) pela razão entre a massa (m) e o volume (V) a 12% de umidade, conforme descrito pela Equação 11.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (11)$$

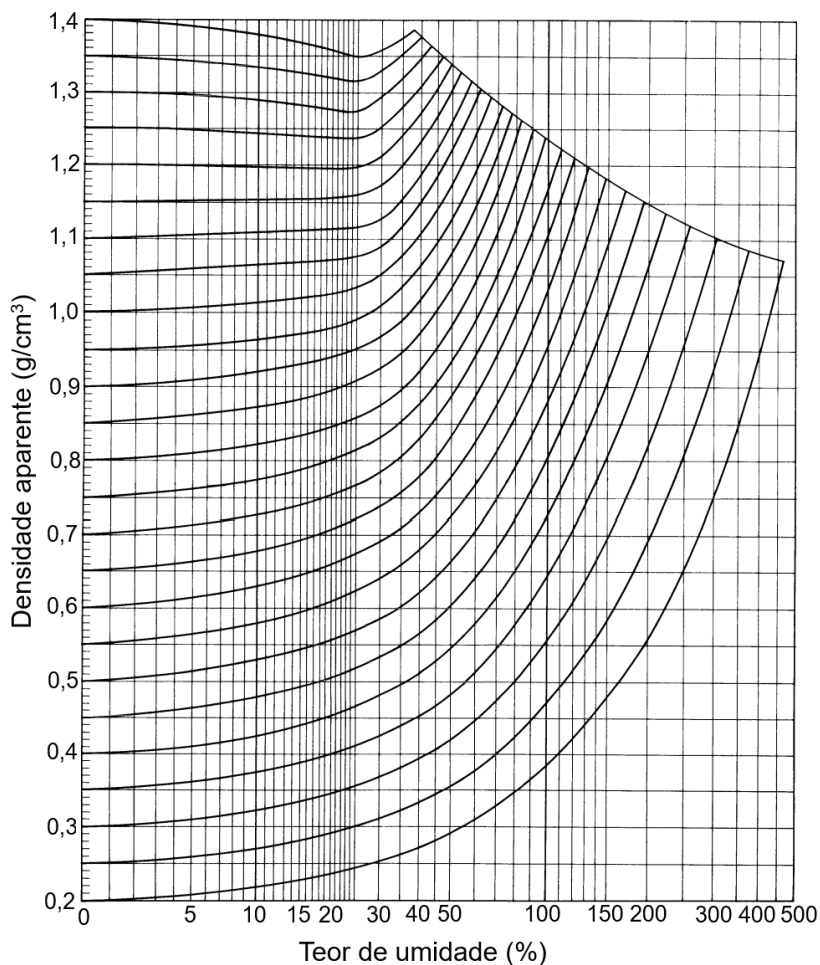
em que:

m_{12} : massa do corpo de prova a 12 % de umidade, expressa em quilogramas (kg);

V_{12} : volume do corpo de prova a 12 % de umidade, expressa em metros cúbicos (m^3).

- c) Para umidades diferentes do valor de referência (12%), ajusta-se a densidade aparente mediante o Diagrama de Kollmann, ilustrado na Figura 20 a seguir.

Figura 20 – Diagrama de Kollmann



Fonte: Adaptado de Kollmann e Côté Junior (1984)

3.1.3 RESISTÊNCIA E RIGIDEZ

Os métodos de ensaio descritos a seguir, oriundos da A ABNT NBR 7190-3 (2022), têm como objetivo a determinação das resistências e módulos de elasticidade da madeira em um lote considerado homogêneo. Os experimentos são similares, com algumas diferenças específicas que são detalhadas a seguir.

Todos os ensaios de resistência (f) e rigidez (E) foram realizados em Corpos de prova com teores de umidade variando na faixa entre 10% e 20%. Os ensaios destrutivos dos corpos

de provas foram realizados na máquina de teste universal AMSLER, com capacidade de 250 kN.

O cálculo das resistências (f) é estimado pela razão entre a força máxima aplicada durante o ensaio ($F_{m\acute{a}x}$) e a área inicial da seção transversal (A), conforme expresso na Equação 12.

$$f_{c0} = \frac{f_{c0,max}}{A}; f_{t0} = \frac{f_{t0,max}}{A} \quad (12)$$

em que:

f_{c0} : Resistência à compressão paralela às fibras (0°);

f_{t0} : Resistência à tração paralela às fibras (0°).

Posteriormente, os resultados de ensaios (f_U e E_U) realizados em diferentes teores de umidade foram corrigidos para o teor de umidade padrão de 12% (f_{12} e E_{12}), como indica a seção 5.6.1 da norma ABNT NBR 7190 (2022), por meio da Equação 13.

$$f_{12} = f_U \left[1 + \frac{3(U-12)}{100} \right]; E_{12} = E_U \left[1 + \frac{2(U-12)}{100} \right] \quad (13)$$

Os resultados obtidos diretamente dos ensaios mecânicos são valores considerados médios. Para o enquadramento em classes de resistência e para considerações de projeto, é necessário calcular o valor característico para os n Corpos de prova ensaiados. De forma geral a estimativa das propriedades mecânicas da madeira (X_{wk}) são quantificados com a Equação 14.

$$f_{wk} = \left(2 \cdot \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{\left(\frac{n}{2}-1\right)}}{\frac{n}{2} - 1} - f_{\frac{n}{2}} \right) \cdot 1,10 \quad (14)$$

em que:

n : quantidade de amostras ensaiadas;

$f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_n$: resultados amostrais de resistência ordenados de forma crescente.

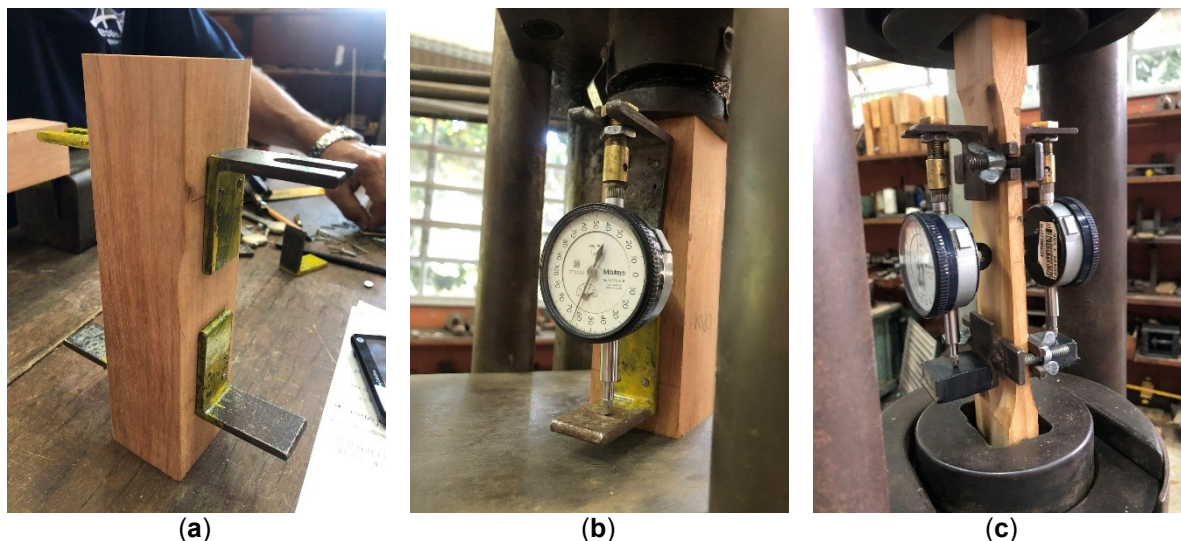
Sendo que não se deve tomar para f_{wk} valor inferior a f_1 nem a 70% do valor médio da amostra completa (X_m), nem superior a X_m .

Em seguida, os lotes foram enquadrados nas classes de resistência de madeiras de florestas nativas da norma brasileira (Tabela 6).

No que se refere aos Coeficientes de Variação (CV), a ABNT NBR 7190-3 (2022) recomenda um valor máximo de 18% para as resistências a esforços normais e um valor máximo de 28% para as resistências a esforços tangenciais.

Para obter os módulos de elasticidade exibidos na Tabela 6 foram utilizadas três amostras como indicado na Tabela 3. No primeiro corpo de prova foi realizado o ensaio destrutivo para estimar o valor da tensão de ruptura ($f_{0,est}$), e os outros dois Corpos de prova foram instrumentados com extensômetros, como mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Instrumentação para a estimativa dos módulos de elasticidade: (a) suporte fixador dos relógios comparadores (b) ensaio de módulo de elasticidade à compressão (c) ensaio de módulo de elasticidade à tração.



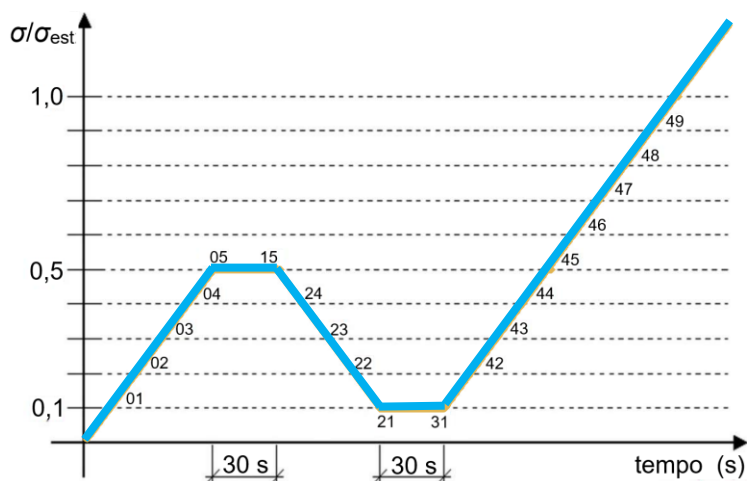
Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 21 são ilustrados o corpo de prova prismático com os suportes de fixação dos relógios comparadores (a), o corpo de prova de compressão submetido aos ciclos de carregamento (b) e, o corpo de prova de tração submetido aos ciclos de carregamento (c).

O carregamento foi realizado em dois ciclos. No primeiro ciclo foi aplicada a tensão de 50% do valor de $f_{0,est}$, manteve-se essa tensão por 30 s, aliviou-se a tensão até 10% do valor de $f_{0,est}$, manteve-se essa tensão por 30 s, aplicou-se a tensão de até 70% do valor de $f_{0,est}$, foram retirados os relógios comparadores, elevou-se o carregamento até a ruptura da amostra.

Todos os valores de deslocamento para cada variação de 10% do valor de $f_{0,est}$, bem como os valores ao final dos 30 s foram registrados. A taxa de carregamento e alívio de tensão foi fixada em 10 MPa/min. Um esboço do diagrama do módulo de elasticidade é apresentado na Figura 22.

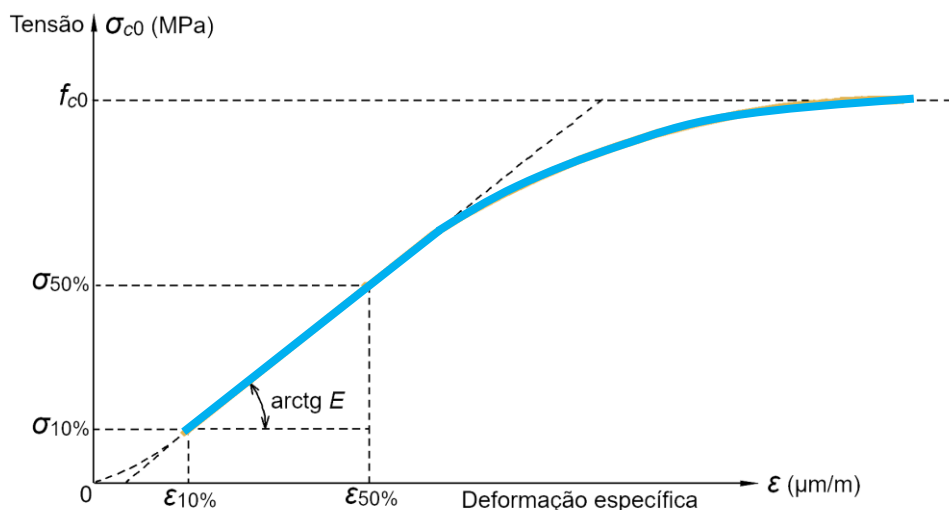
Figura 22 – Diagrama de carregamento para a determinação da rigidez da madeira



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190-3 (2022)

O módulo de elasticidade é obtido a partir da análise do trecho linear do diagrama tensão x deformação específica. A título de ilustração, apresenta-se, por exemplo, o diagrama tensão x deformação específica no ensaio de resistência à compressão paralela às fibras na Figura 23.

Figura 23 – Diagrama tensão × deformação específica para a determinação da rigidez da madeira na compressão paralela às fibras



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190-3 (2022)

Em todos os experimentos, o procedimento é análogo. Para essa finalidade, a rigidez é quantificada a partir da inclinação da reta secante à curva tensão x deformação específica. Essa reta é definida pelos pontos $(\epsilon_{10\%}; \sigma_{10\%})$ e $(\epsilon_{50\%}; \sigma_{50\%})$, que correspondem, respectivamente, a 10% e 50% da resistência medida no ensaio. O módulo de elasticidade (E) é então calculado segundo a Equação 15.

$$E = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad (15)$$

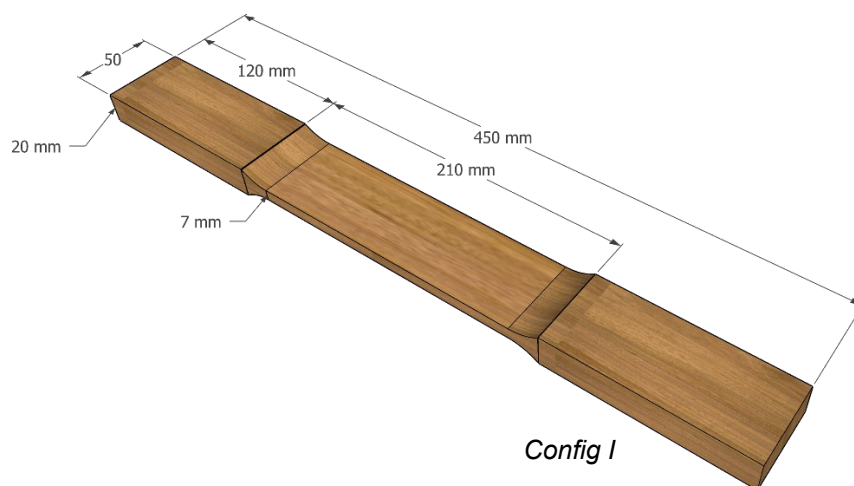
em que:

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$: Tensões correspondentes a 10% e 50% da resistência, representadas pelos pontos 31 e 45 do diagrama de carregamento da Figura 22;

$\epsilon_{10\%}$ e $\epsilon_{50\%}$: Deformações específicas correspondentes às tensões de $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$.

A geometria padrão da ABNT NBR 7190-3 para estimativa do módulo de elasticidade e da resistência à tração na direção paralela às fibras é ilustrado na Figura 24.

Figura 24 – Corpo de prova padrão para o ensaio de tração na direção paralela às fibras



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190-1 (2022)

Na Figura 25 são mostrados detalhes da fabricação dos corpos de prova.

Figura 25 – Confeccção dos Corpos de prova de tração paralela às fibras



Fonte: Autoria própria (2025)

De posse dos valores de resistência e rigidez, a espécie estudada pode ser então enquadrada em uma classe de resistência, em função do valor característico da resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$), conforme especificado na Tabela 4.

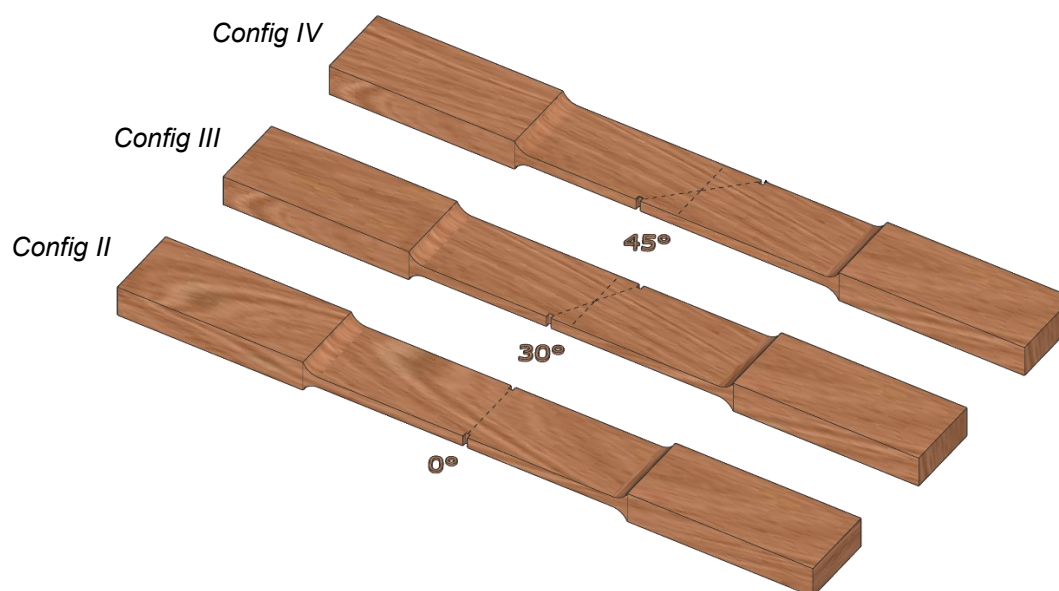
Tabela 4 – Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos

Classes	$f_{c0,k}$ (MPa)
D20	$20 \leq f_{c0,k} < 30$
D30	$30 \leq f_{c0,k} < 40$
D40	$40 \leq f_{c0,k} < 50$
D50	$50 \leq f_{c0,k} < 60$
D60	$f_{c0,k} \geq 60$

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190-1 (2022)

A produção dos Corpos de prova propostos com as modificações seguiu rigorosamente os mesmos procedimentos adotados para confecção do modelo padrão da norma. Na Figura 26 são mostrados os detalhes de defasagem dos cortes laterais dos corpos de prova alternativos. Além disso, a geometria completa com detalhes de medidas para reprodução fidedigna das dimensões está disposta no Apêndice A.

Figura 26 – Propostas de modificações do corpo de prova padrão



Fonte: Autoria própria (2025)

Para padronizar a nomenclatura, os corpos de prova íntegros (sem cortes) foram definidos como configuração I e os corpos de prova com cortes alinhados a 0°, desalinhados a 30° e a 45° de configuração II, III e IV, respectivamente. Cabe destacar que os ângulos

indicados são formados entre o eixo transversal da amostra e pela reta que passa pelo centro dos cortes.

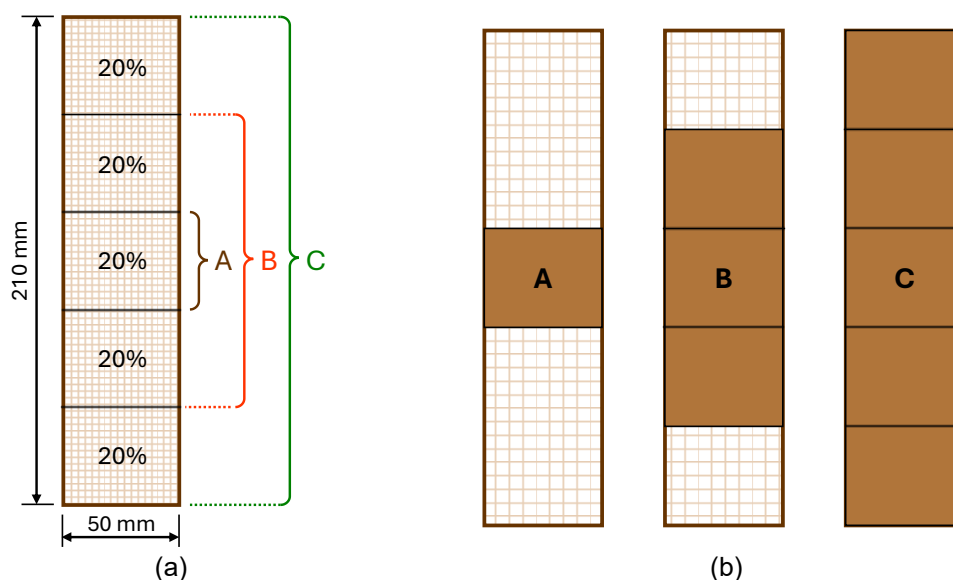
A escolha da configuração IV foi justamente por conta de que, no estado plano de tensões, o valor máximo da resistência ao cisalhamento é a 45° . Já a configuração III foi definida para obtenção de uma resposta entre o intervalo de 0° e 45° .

Os métodos de caracterização da madeira aqui apresentados constituem etapa fundamental na validação de sua aplicação em soluções estruturais. Esses procedimentos viabilizam não somente a segurança, mas também a eficácia da madeira em aplicações estruturais.

3.1.4 AVALIAÇÃO QUALIQUANTITATIVA

Em virtude da aleatoriedade no padrão de falha da madeira tracionada, foi proposta uma abordagem (Figura 41) que permitiu quantificar a porcentagem de concentração das linhas de falha nas regiões setorizadas ao longo do comprimento do corpo de prova. Por conta da simetria geométrica do corpo de prova, as áreas superiores e inferiores foram agrupadas em regiões A, B e C, as quais podem ser vistas na Figura 27.

Figura 27 – Esquema das regiões para avaliação da ruptura (a) dimensões (b) regiões destacadas



Fonte: Autoria própria (2025)

A análise quali quantitativa foi realizada dividindo a largura de 50 mm do corpo de prova em 20 partes, e o comprimento de 210 mm em 55 partes. Cada porção de 20% da amostra possui 220 divisões (20 x 11). A dimensão de cada retângulo é de 2,50 mm na horizontal e 3,82 mm na vertical (sentido das fibras). A área de cada divisão é de 9,55 mm².

As regiões A, B e C, com 20%, 60% e 100%, respectivamente, da área útil do corpo de prova, foram definidas para compreender a distribuição da linha de ruptura. A setorização do comprimento total da linha de ruptura medido ao longo de toda a amostra permitiu quantificar a região de predominância da linha de falha, o que colaborou por auxiliar na identificação da relação entre a falha com os tipos de descontinuidade (cortes laterais) inseridos nas amostras.

3.2 ANÁLISE NUMÉRICA

Os corpos de prova analisados experimentalmente (Figura 24 e Figura 26) foram simulados via o método dos elementos finitos com o auxílio do software Abaqus/CAE. Para tanto, uma análise não linear material foi considerada para o melhor entendimento da influência dos cortes na distribuição das tensões e deformações internas.

3.2.1 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E MODELO CONSTITUTIVO DA MADEIRA

Para viabilizar a simulação, considerando o comportamento ortotrópico idealizado para a madeira (Mascia; Lahr, 2006), as propriedades obtidas no estudo experimental (E_L = módulo de elasticidade longitudinal ou na direção das fibras; f_t = resistência a tração longitudinal na direção das fibras) foram utilizadas para se estimar as demais propriedades físicas e mecânicas a serem consideradas. Destaca-se que essa prática é comumente encontrada em estudos similares (Alves *et al.*, 2024) pelas complexidades envolvidas na caracterização completa da madeira (Almeida *et al.*, 2020; Dias; Lahr, 2004). As correlações adotadas foram obtidas do documento normativo brasileiro (ABNT NBR 7190, 2022) e são apresentadas nas equações de equações (16) a (19), em que E e G consistem no módulo de elasticidade longitudinal e no módulo de elasticidade transversal, L , R e T denotam as direções dos eixos longitudinal, radial e transversal, respectivamente, e f_v é a resistência ao cisalhamento.

$$E_R = E_T = \frac{E_L}{20} \quad (16)$$

$$G_{LR} = G_{LT} = G_{RT} = \frac{E_L}{16} \quad (17)$$

$$f_{tR} = f_{tT} = 0,05 \cdot f_{tL} \quad (18)$$

$$f_{vLR} = f_{vLT} = f_{vRT} = 0,12 \cdot f_{cL} = 0,12 \cdot (0,77 \cdot f_{tL}) = 0,0924 \cdot f_{tL} \quad (19)$$

A madeira foi simulada com comportamento elastoplástico ortotrópico, modelado por uma curva bilinear, em que a tensão de escoamento (σ_0) foi obtida a partir dos ensaios experimentais (Tabela 7 – Tabela 10), e a tensão última (σ_u) foi definida como $1.01 \cdot \sigma_0$, com a deformação plástica correspondente adotada como 0,1‰, valor comumente encontrado na

literatura para representar a transição entre os regimes elástico e plástico. Como critério de falha, foi utilizado o critério de Hill (Hill, 1998), amplamente empregado em simulações de elementos de madeira por se tratar de uma generalização do critério de von Mises para materiais anisotrópicos, formulado conforme o tensor apresentado na Equação (20) (CHRISTOFORO *et al.*, 2025).

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{2 \cdot R_2^2} + \frac{1}{2 \cdot R_3^2} - \frac{1}{2 \cdot R_1^2} \right) \cdot (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + \\ & \left(\frac{1}{2 \cdot R_3^2} + \frac{1}{2 \cdot R_1^2} - \frac{1}{2 \cdot R_2^2} \right) \cdot (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + \\ & \left(\frac{1}{2 \cdot R_1^2} + \frac{1}{2 \cdot R_2^2} - \frac{1}{2 \cdot R_3^2} \right) \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \\ & \frac{3}{R_{23}^2} \cdot \tau_{23}^2 + \frac{3}{R_{13}^2} \cdot \tau_{13}^2 + \frac{3}{R_{12}^2} \cdot \tau_{12}^2 = 1 \end{aligned} \quad (20)$$

Da equação (7), σ_1 , σ_2 , σ_3 são as tensões normais atuantes nos eixos ortogonais da madeira e τ_{12} , τ_{13} , τ_{23} são as tensões de cisalhamento em cada plano. A equação (20) pode ser reescrita em função dos coeficientes de plasticidade (R), que são determinados pela razão entre as componentes de tensão atuantes em um ponto no volume do sólido e a tensão de escoamento (σ_0), conforme apresentando nas equações 21, 22, 23, 24, 25 e 26.

$$R_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \quad (21)$$

$$R_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_0} \quad (22)$$

$$R_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_0} \quad (23)$$

$$R_{12} = \frac{\tau_{12} \cdot \sqrt{3}}{\sigma_0} \quad (24)$$

$$R_{13} = \frac{\tau_{13} \cdot \sqrt{3}}{\sigma_0} \quad (25)$$

$$R_{23} = \frac{\tau_{23} \cdot \sqrt{3}}{\sigma_0} \quad (26)$$

Na Tabela 5 são apresentados os valores obtidos dos coeficientes de plasticidade considerando-se as correlações entre propriedades adotadas.

Tabela 5 – Valores obtidos dos coeficientes de plasticidade do critério de falha de Hill

R_1	R_2	R_3	R_{12}	R_{13}	R_{23}
1	0,05	0,05	0,16	0,16	0,16

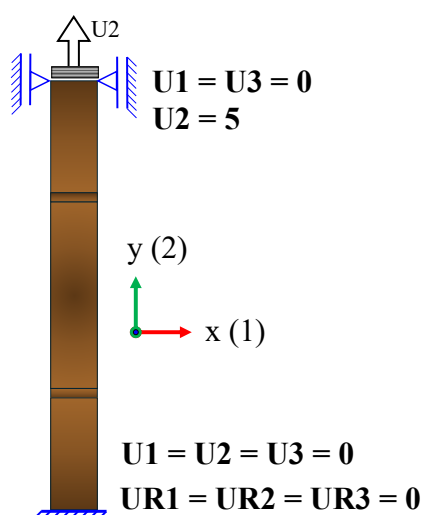
Fonte: Autoria própria (2025)

3.2.2 CONFIGURAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

3.2.2.1 SIMULAÇÃO PARA OS VALORES MÉDIOS E TODAS AS CONFIGURAÇÕES

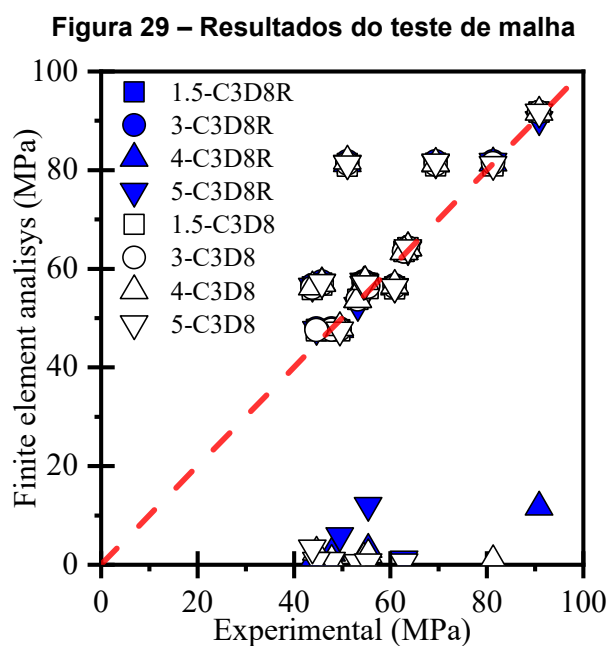
As simulações foram realizadas considerando o método Newton-Raphson (método incremental-iterativo) com incrementos inicial, máximo e mínimo definidos como 10^{-4} , 10^{-3} e 10^{-15} , respectivamente. As condições de contorno foram definidas conforme ilustrado na Figura 28, com a aplicação de um deslocamento no sentido longitudinal responsável pelo comportamento não linear físico da madeira.

Figura 28 – Condições de contorno do modelo numérico



Fonte: Autoria própria (2025)

A validação do modelo numérico se deu pela comparação da resistência à tração obtida em cada simulação ($f_{t,num}$) com os resultados experimentais ($f_{t,exp}$) considerando-se as diferentes espécies de madeira e as localizações dos cortes. Nesta etapa, a malha de elementos finitos foi também avaliada. Foram adotados elementos finitos hexaédricos com oito nós, tanto com integração reduzida (C3D8R) quanto sem integração reduzida (C3D8), e o tamanho dos elementos variou entre 1,5 mm, 3 mm, 4 mm e 5 mm. Os resultados obtidos das simulações para a análise da malha são apresentados na Figura 29.

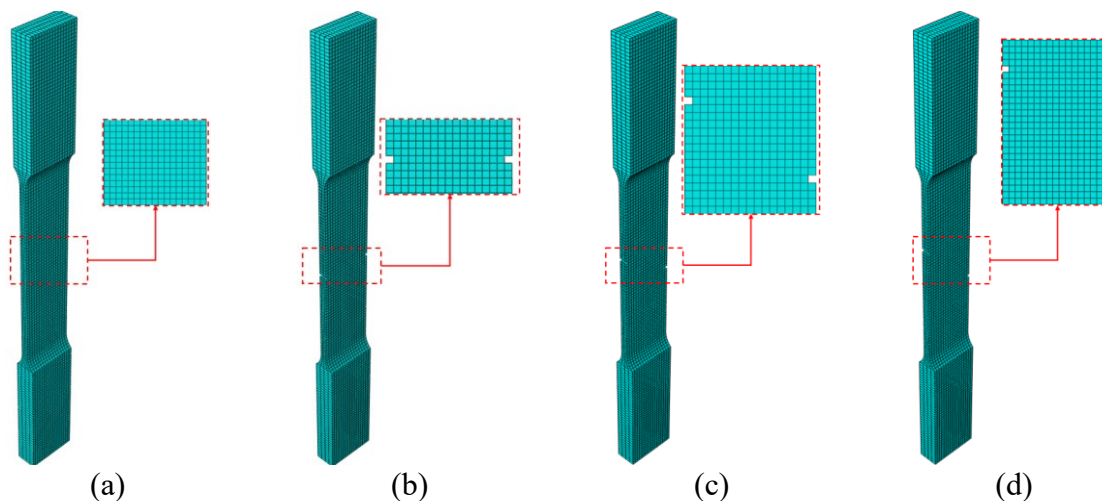


Conforme apresentado na Figura 29, o uso de elementos finitos de maior dimensão (4 mm e 5 mm) resultou em erros elevados, principalmente devido a problemas de convergência causados pela falta de uniformidade na distribuição da malha.

Por outro lado, elementos com 3 mm e 1,5 mm não apresentaram problemas de convergência, resultando em valores do MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) e do CV (coeficiente de variação) similares. Considerando o elemento finito C3D8, os erros foram 10,49% (Coeficiente de Variação – CV = 22,03%) e 10,19% (CV=22,1%), enquanto o elemento C3D8R, os valores foram 10,08% (CV=22,12%) e 9,89% (CV=22,21%), respectivamente. Em contrapartida, os modelos com 4 mm e 5 mm apresentaram um MAPE de 37,40% (CV=67,77%) e 32,61% (CV=59,29%) para os elementos C3D8, e 39,67% (CV=71,88%) e 44,35% (CV=82,53%) para os elementos C3D8R, evidenciando uma redução de precisão com essa configuração.

Embora os elementos C3D8R (com integração reduzida) tenham produzido resultados equiparáveis aos elementos C3D8, seu custo computacional foi inferior, justificando sua escolha para a modelagem final. Além disso, a malha de 3 mm apresentou um desempenho equivalente à malha mais refinada (1,5 mm), porém com tempo de processamento reduzido, o que levou à sua seleção para a continuidade do estudo numérico. A Figura 30 apresenta os modelos validados com a malha de elementos finitos que passou pelo teste de sensibilidade.

Figura 30 – Modelos numéricos validados: (a) configuração I, (b) configuração II, (c) configuração III e (d) configuração IV



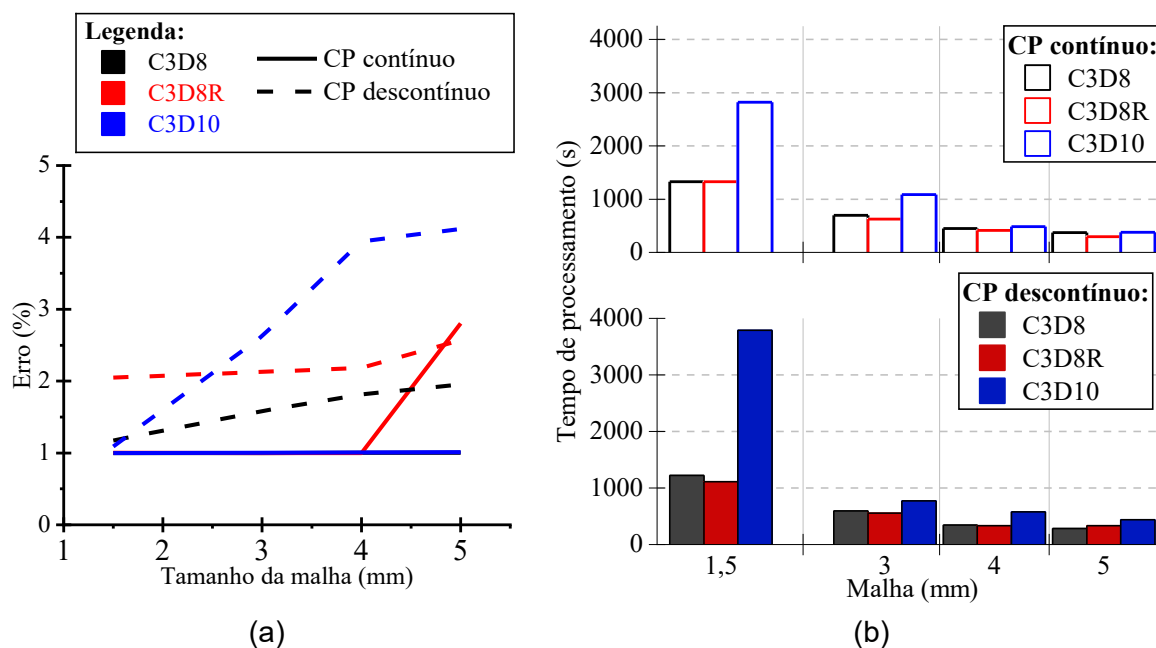
Fonte: Autoria própria (2025)

3.2.2.2 SIMULAÇÃO EXPLORATÓRIA PARA UMA ESPÉCIE E DUAS CONFIGURAÇÕES

Em virtude dos resultados indicativos para o potencial uso de cortes alinhados lateralmente, foi realizada uma nova avaliação considerando as mesmas condições de contorno da Figura 28.

A validação do modelo numérico se deu pela comparação da resistência à tração obtida em cada simulação ($f_{t,num}$) com os resultados experimentais ($f_{t,exp}$), considerando uma espécie de madeira e dois Corpos de prova – um íntegro (contínuo) e outro com presença dos cortes (descontínuo). Nesta etapa, a malha de elementos finitos foi avaliada: foram adotados elementos hexaédricos com oito nós, tanto com integração reduzida (C3D8R) quanto sem integração reduzida (C3D8), e elementos tetraédricos com dez nós (C3D10). O tamanho dos elementos variou entre 1,5 mm, 3 mm, 4 mm e 5 mm. O resultado obtido é apresentado na Figura 31.

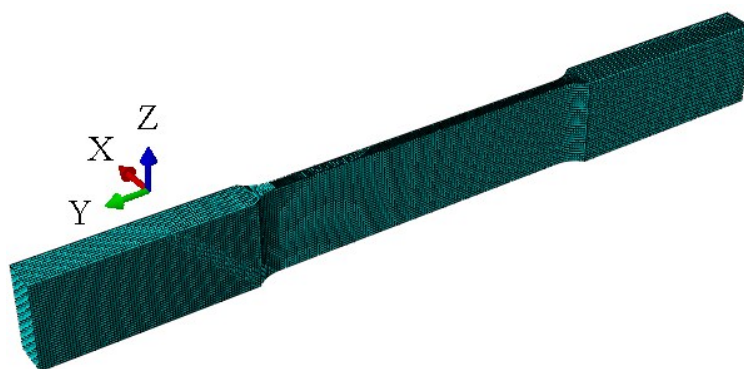
Figura 31 – Resultado do teste de malha: (a) erro e (b) tempo de processamento



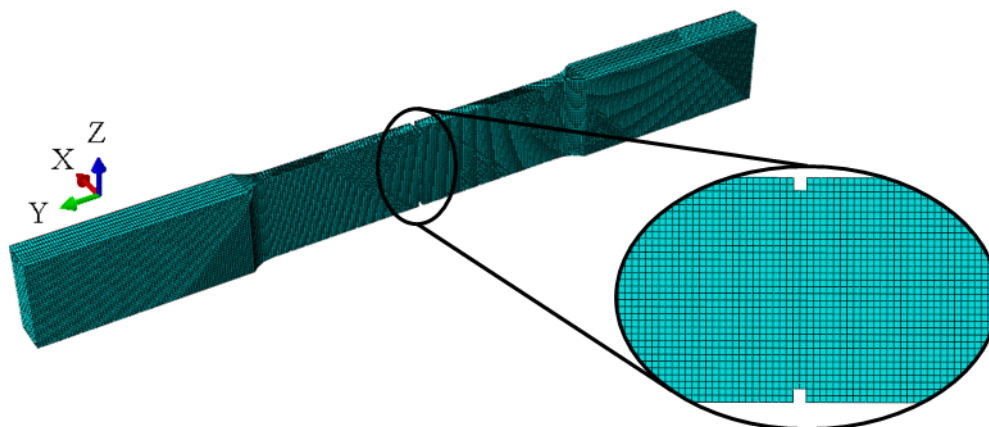
Fonte: Autoria própria (2025)

Conforme apresentado na Figura 31, o uso de elementos finitos de maior dimensão (4 mm e 5 mm) resultou em erros maiores em todos os corpos de prova com cortes e no modelo contínuo com malha C3D8R com 5 mm. Não foi observada variação no erro entre os elementos C3D8 e C3D10, porém o tempo de processamento com os elementos tetraédricos foi superior em todas as simulações. O erro encontrado apresentou maior variação nos Corpos de prova com descontinuidade, passando de 4% de erro no modelo de malha C3D10 com 5 mm. Desse modo, a malha adotada para análise foi composta pelo elemento C3D8 com 1,5 mm com um erro de 0,99% no modelo contínuo e 1,17% no modelo descontínuo, sendo similar a outros estudos que simularam ensaios de tração longitudinal (NUKALA *et al.*, 2023). A Figura 32 apresenta os modelos validados com a malha de elementos finitos que passou pelo teste de sensibilidade.

Figura 32 – Modelo numérico validado: corpo de prova contínuo (a) e corpo de prova descontínuo (b)



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2025)

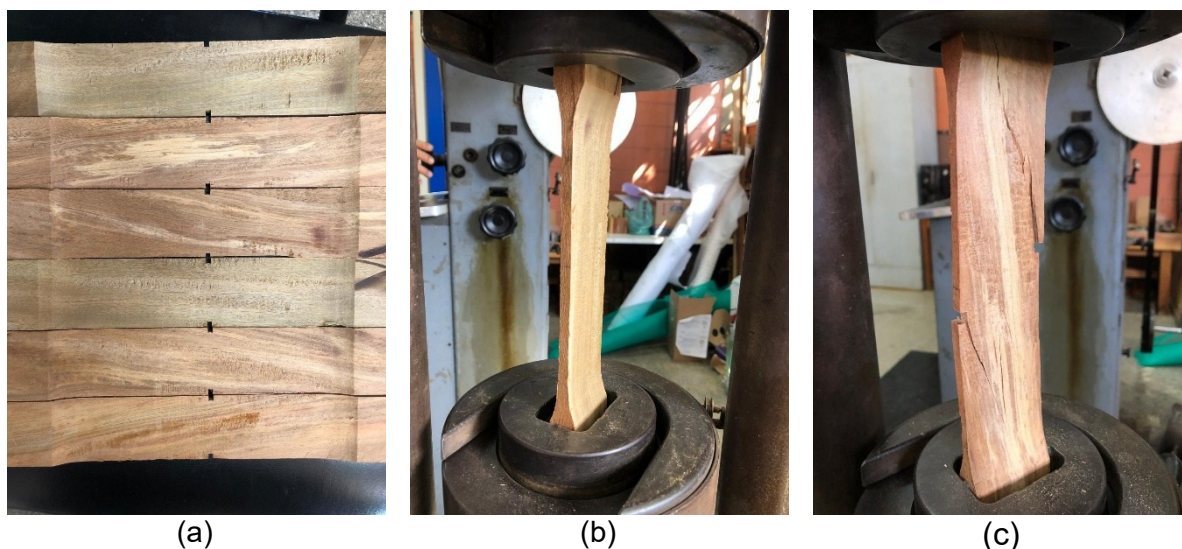
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são mostrados os resultados obtidos com base na metodologia apresentada. Esta seção foi estruturada da seguinte forma: resultados experimentais (4.1), análise numérica (4.2) e aprofundamento sobre o mecanismo de falha (4.3).

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Em função das inúmeras atividades para a realização dos ensaios, o planejamento consistiu em fazer o agrupamento de todas as ações por espécie. A Figura 33 mostra fotos para algumas etapas desenvolvidas no laboratório.

Figura 33 – Etapas do procedimento experimental à tração: (a) antes do ensaio, (b) início do carregamento e (c) após a ruptura



Fonte: Autoria própria (2025)

4.1.1 ENQUADRAMENTO EM CLASSES, VALORES DE RESISTÊNCIAS E MÓDULOS DE ELASTICIDADE

Os resultados experimentais dos módulos de elasticidade longitudinal, o valor característico de resistência a compressão e o enquadramento das espécies nas classes de resistência da norma brasileira são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Módulos de elasticidade e enquadramento das espécies em classes de resistência

Espécie	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	$f_{c0,k}$ (MPa)	Classe
Erun	8925	9214	24,7	D20
Goup	13958	14250	37,4	D30
Hype	12884	12258	42,8	D40
Bagu	17302	16876	55,0	D50

Fonte: Autoria própria (2025)

Em que:

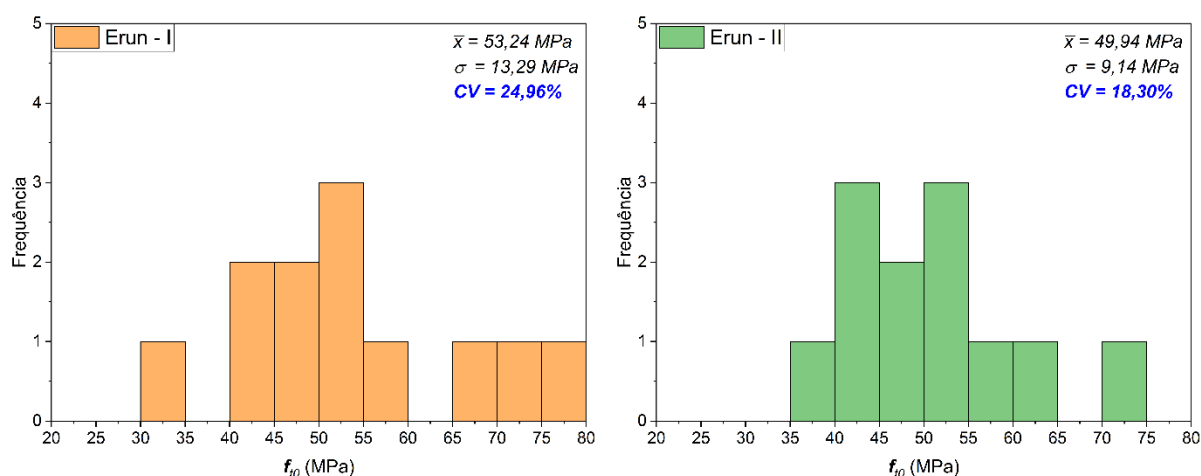
E_{c0} : Módulo de elasticidade na compressão medido na direção paralela às fibras;

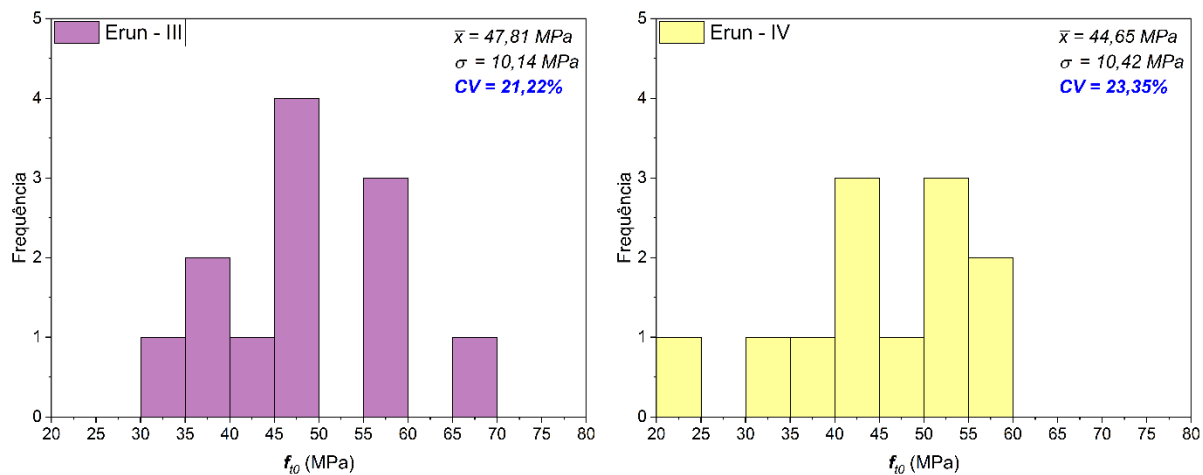
E_{t0} : Módulo de elasticidade na tração medido na direção paralela às fibras;

$F_{c0,k}$: Valor característico da resistência à compressão;

Cabe destacar que o enquadramento das espécies em classes de resistência, como preconiza a ABNT NBR 7190-1, foi realizado a partir dos valores de $f_{c0,k}$ da Tabela 6.

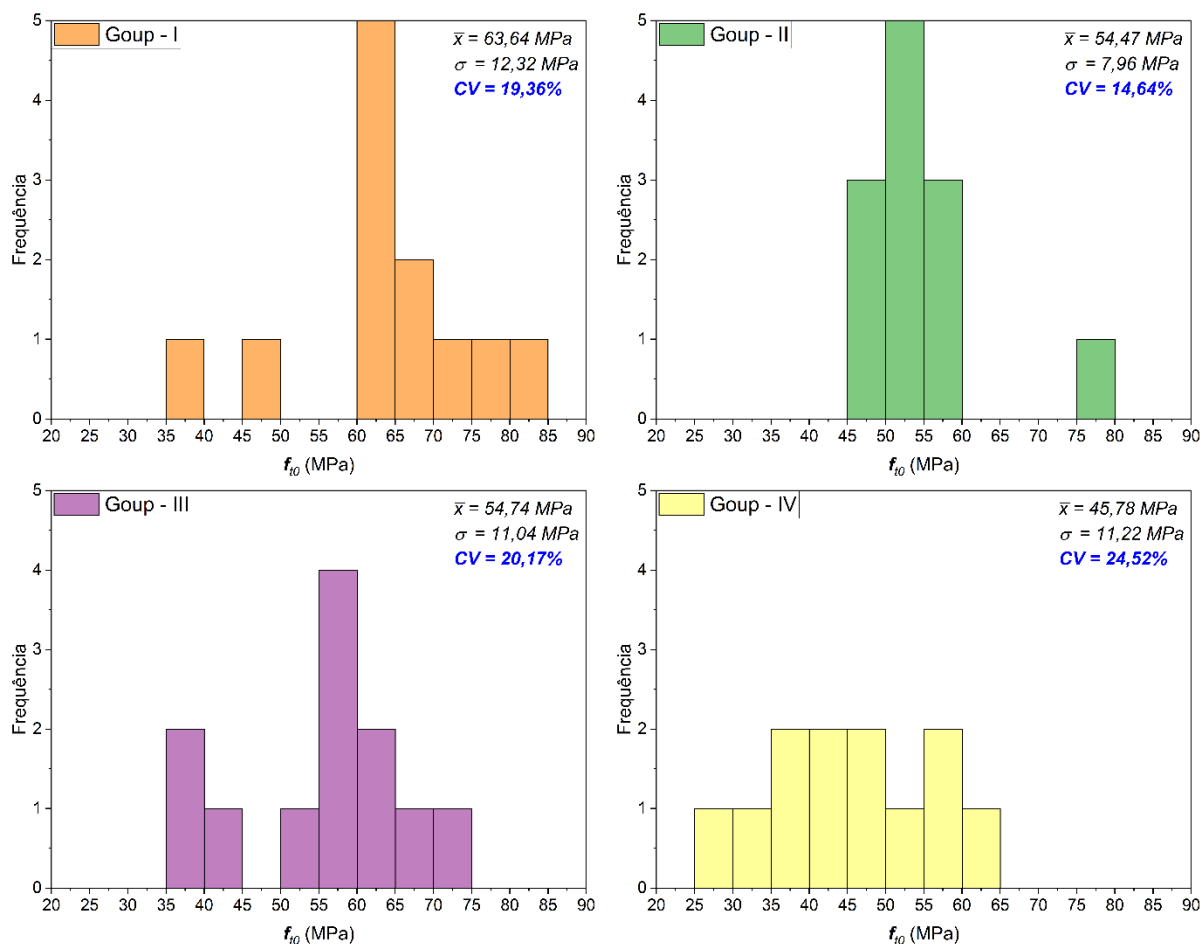
Nas figuras a seguir (Figura 34 a Figura 37) estão dispostos os histogramas de frequência para cada conjunto de 12 Corpos de prova, com suas respectivas espécies e configurações.

Figura 34 – Histogramas de resistências para o Cambará Rosa



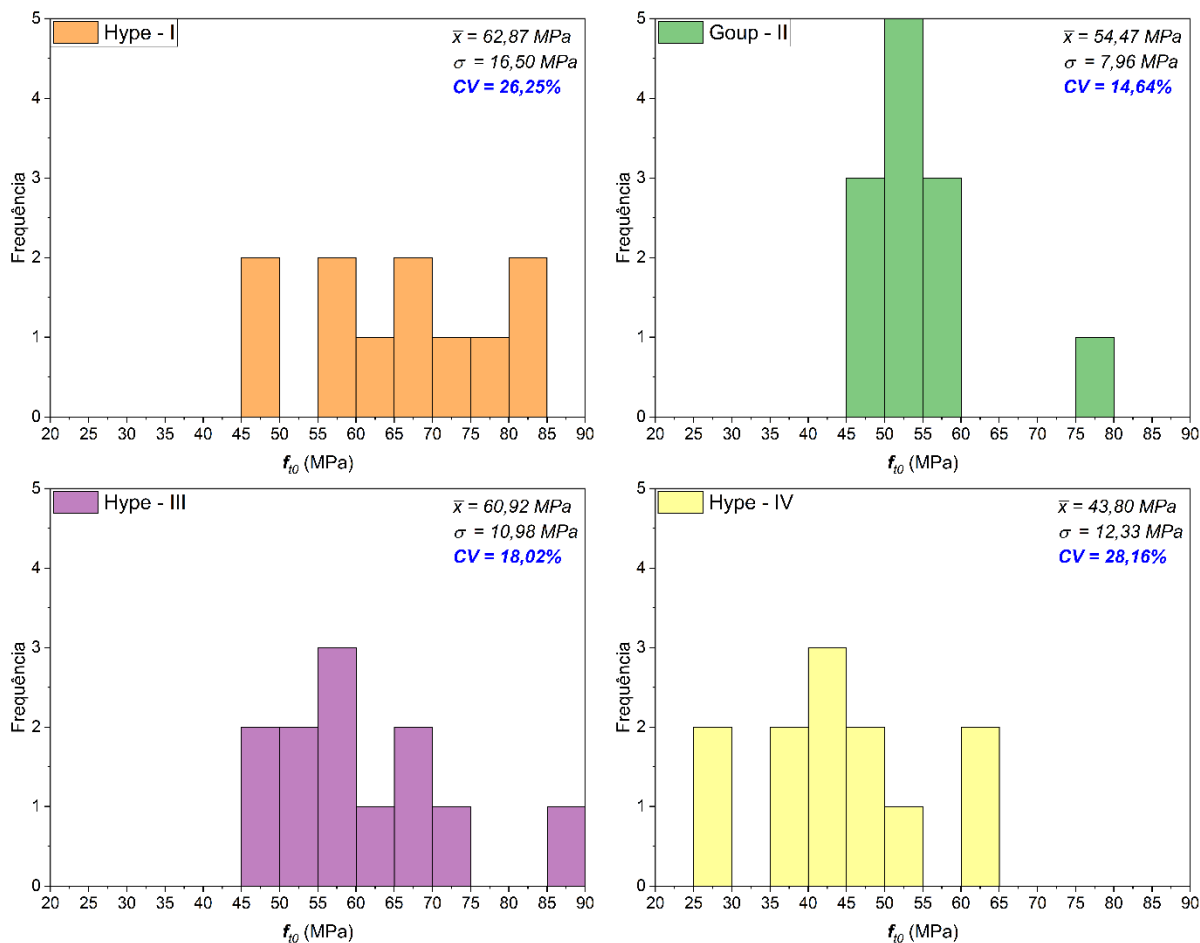
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 35 – Histogramas de resistências para a Cupiúba



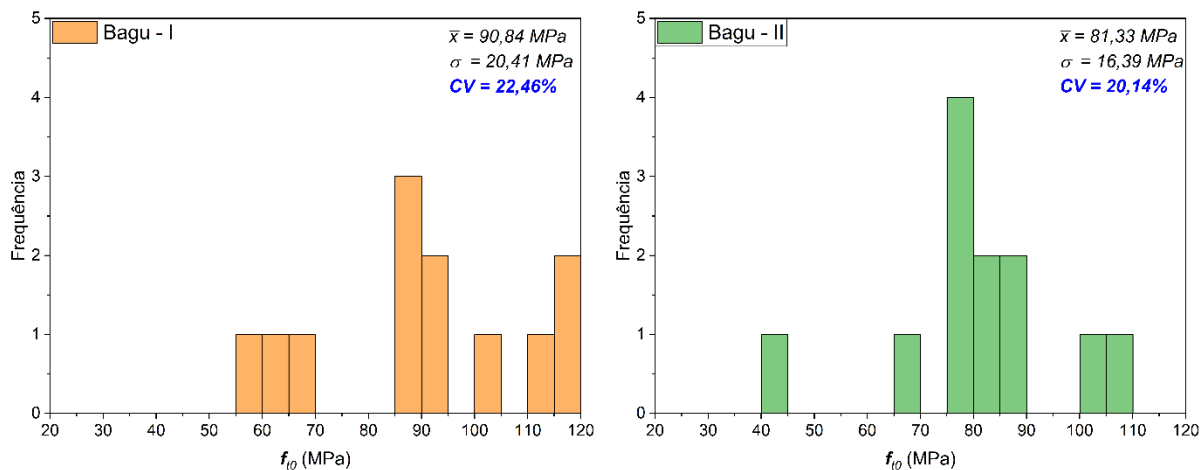
Fonte: Autoria própria (2025)

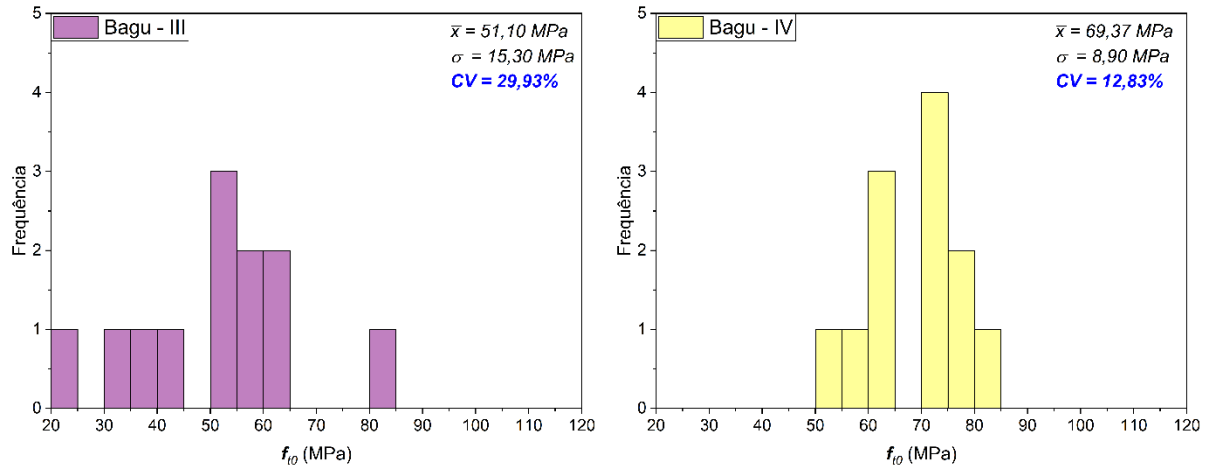
Figura 36 – Histogramas de resistências para o Angelim pedra



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 37 – Histogramas de resistências para a Tatajuba



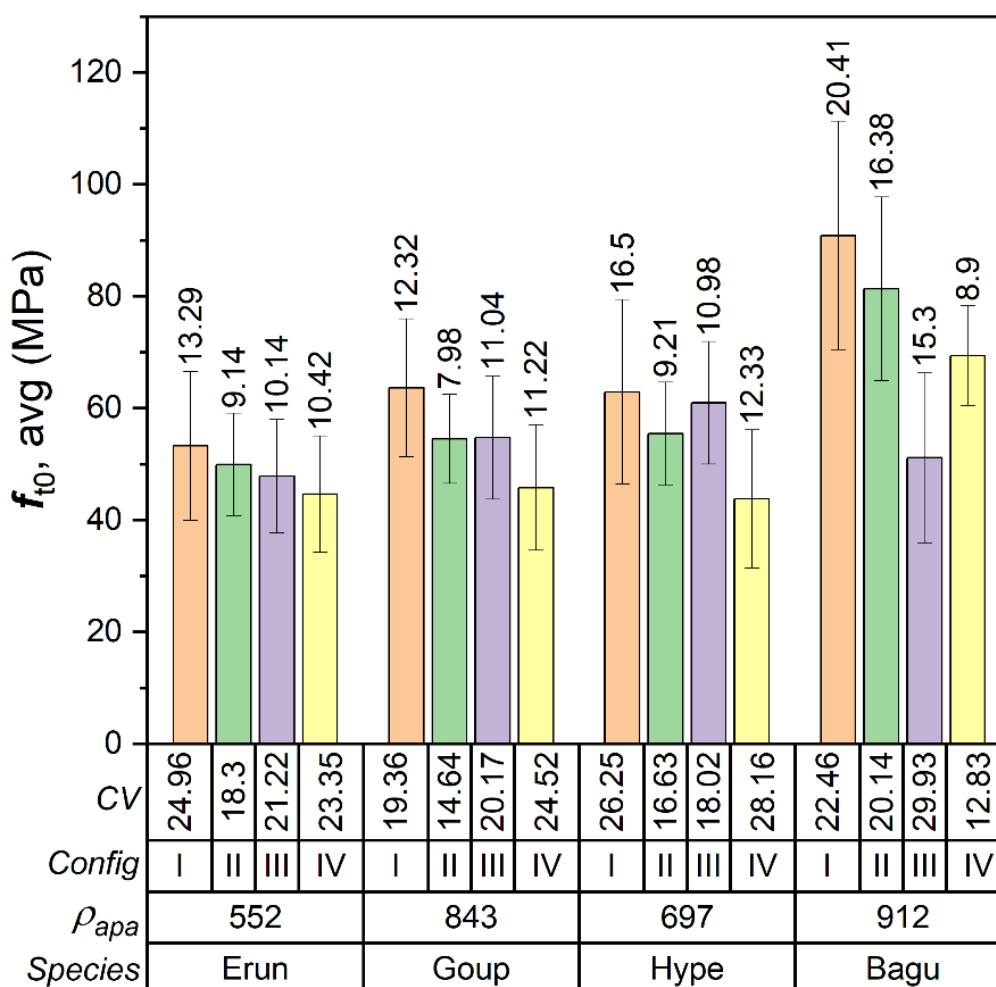


Fonte: Autoria própria (2025)

Nos gráficos que vão da Figura 34 até a Figura 37 estão dispostos os histogramas, nos quais também são apresentados os valores da média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados experimentais.

Os valores médios ($f_{t0,avg}$) da resistência à tração paralela as fibras de todas as espécies e considerando-se todas as configurações de cortes avaliadas são apresentados na Figura 38, cabendo destacar que os valores médios da resistência à tração paralela foram obtidos para um conjunto de doze corpos de prova.

Figura 38 – Resultados da resistência a tração paralela média para todas as espécies e configurações



Fonte: Autoria própria (2025)

No gráfico da Figura 38, o valor sobre as barras é o desvio padrão (σ), sendo CV o coeficiente de variação. Os resultados obtidos mostram que o valor de $f_{t0,avg}$ foi maior para todos os Corpos de prova na configuração I, ou seja, na condição íntegra (sem a presença de cortes). Contudo, na configuração I, o σ também foi o maior e, para as espécies *Erismia uncinatum* e *Hymenolobium petraeum*, existem valores que extrapolam o máximo e mínimo da configuração II. Logo, para uma condição de projeto, os coeficientes de segurança poderiam ser reduzidos na configuração II em virtude de uma menor variabilidade dos resultados em relação à média.

Outra estatística descritiva muito importante a ser considerada é o CV. De acordo com a norma brasileira (ABNT NBR 7190-3, 2022), no caso de solicitações normais, admite-se um CV de 18%. Os resultados da Figura 38 mostram que na configuração II os valores do CV são mais adequados para contemplar o que é preconizado na norma de dimensionamento.

No gráfico da Figura 38 pode ser feita a análise de resistência à tração paralela em decorrência da inclusão dos cortes por meio da razão entre o valor do corpo de prova modificado pelo valor do corpo de prova de referência (Configuração I). Considerando essa relação para a configuração II (Config II/ Config I) tem-se os seguintes valores: *Erismia uncinatum*, 0,938; *Goupia glabra* 0,856; *Hymenolobium petraeum*, 0,881 e; *Bagassa Guianensis* 0,895. Assim, tem-se que o fator médio de redução de resistência dessa análise é de 0,893. Ou seja, com a inserção de cortes alinhados horizontalmente (configuração II) o valor da resistência média à tração paralela às fibras é reduzido em 10,7%.

Com relação aos valores obtidos para a densidade aparente, esses estão em consonância com os resultados que aparecem na versão de 1997 da norma brasileira (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), no catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil (NAHUIZ, 2013) e em trabalhos acerca da estimativa de propriedades mecânicas em função da densidade aparente (ALMEIDA *et al.*, 2020; DIAS; LAHR, 2004).

A seguir estão dispostas tabelas com os valores característicos da resistência à tração paralela obtidos para todas as espécies e os valores das relações $f_{c0,k} / f_{t0,k}$.

Tabela 7 – Resistências características axiais para o Cambará Rosa

$f_{t0,k}$ (MPa)	Config – I	Config – II	Config – III	Config – IV
MÉDIA*	53,241	49,941	47,807	44,647
Calculado	35,720	38,750	31,466	28,843
0,7 x Méd	37,269	34,959	33,465	31,253
x1	31,437	38,896	30,083	22,985
Resistências características				
$f_{t0,k}$ (MPa)	37,269	38,896	33,465	31,253
Relações entre resistências				
$f_{c0,k} / f_{t0,k}$	0,663	0,635	0,738	0,790

* O valor não é característico, apresentou-se o valor médio para otimizar a leitura da tabela. Configurações conforme Figura 26: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

Vale destacar o fato de que, apesar da resistência média na configuração I ser maior do que o da configuração II em torno de 6,6%, o valor característico – parâmetro de referência para projetos – na configuração II foi cerca de 4,4% superior. Isso é decorrência da menor discrepância de valores em função da redução da região de falha.

Tabela 8 – Resistências características axiais para a Cupiúba

$f_{t0,k}$ (MPa)	Config – I	Config – II	Config – III	Config – IV
MÉDIA*	63,641	54,474	54,735	45,775
Calculado	48,529	50,464	35,492	27,385
0,7 x Méd	44,548	38,132	38,314	32,042
x1	35,554	46,423	35,494	29,809
Resistências características				
$f_{t0,k}$ (MPa)	48,529	50,464	38,314	32,042
Relações entre resistências				
$f_{c0,k} / f_{t0,k}$	0,770	0,740	0,975	1,166

Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

Novamente destaca-se que a resistência média na configuração I foi maior do que o da configuração II em torno de 16,8% e que o valor característico na configuração II foi cerca de 4,0% superior.

Tabela 9 – Resistências características axiais para o Angelim Pedra

$f_{t0,k}$ (MPa)	Config – I	Config – II	Config – III	Config – IV
MÉDIA*	62,867	55,386	60,920	43,800
Calculado	35,786	47,983	51,080	25,463
0,7 x Méd	44,007	38,770	42,644	30,660
x1	26,609	40,043	45,374	25,091
Resistências características				
$f_{t0,k}$ (MPa)	44,007	47,983	51,080	30,660
Relações entre resistências				
$f_{c0,k} / f_{t0,k}$	0,972	0,892	0,838	1,395

Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

Igualmente destaca-se que a resistência média na configuração I foi maior do que o da configuração II em torno de 13,5% e que o valor característico na configuração II foi cerca de 9,0% superior.

Tabela 10 – Resistências características axiais para a Tatajuba

$f_{t0,k}$ (MPa)	Config – I	Config – II	Config – III	Config – IV
MÉDIA*	90,840	81,325	21,100	69,370
Calculado	64,905	62,887	27,350	55,618
0,7 x Méd	63,588	56,928	35,770	48,559
x1	58,627	42,997	22,841	51,640
Resistências características				

$f_{t0,k}$ (MPa)	64,905	62,887	35,770	55,618
Relações entre resistências				
$f_{c0,k} / f_{t0,k}$	0,848	0,875	1,539	0,990

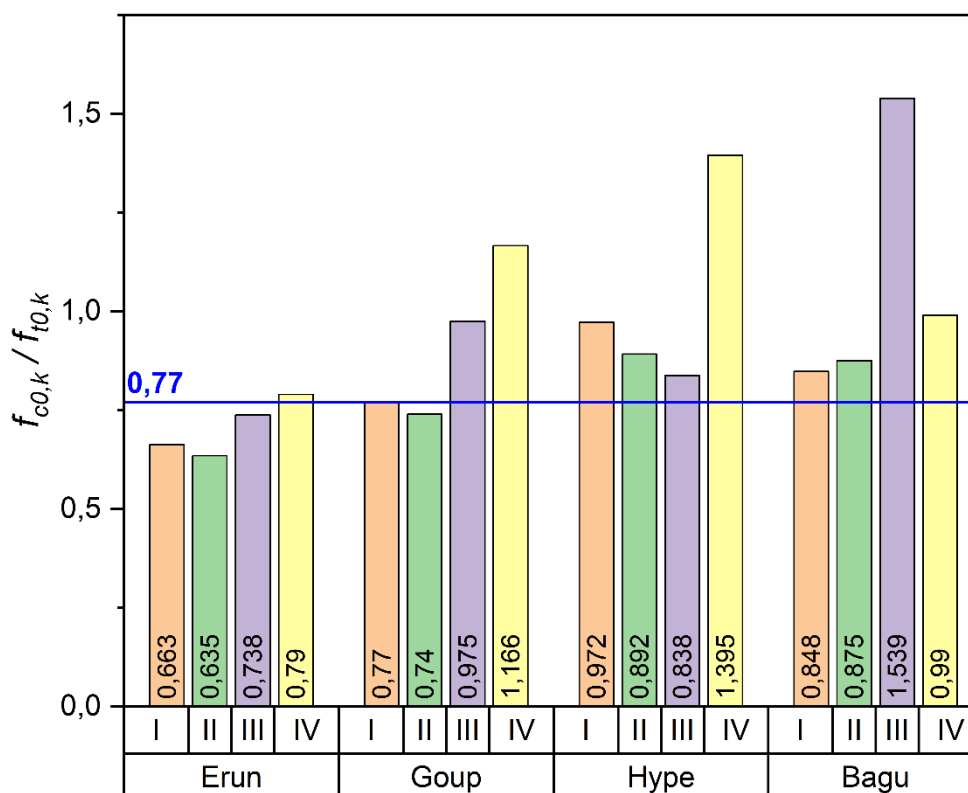
Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

Novamente a resistência média na configuração I foi maior do que o da configuração II em torno de 11,7%, porém o valor característico na configuração II foi cerca de 3,2% inferior, diferentemente das outras três espécies de madeira.

Na hipótese de caracterização simplificada da resistência da madeira serrada, a NBR 7190 indica o fator de 0,77 para relação $f_{c0,k}/f_{t0,k}$. Contudo, diante dos resultados experimentais do estudo realizado, nos quais os lotes de madeira foram enquadrados nas classes de resistências D20, D30, D40 e D50, a classe D30 foi a que melhor aproximou-se do valor 0,77. No gráfico da Figura 39 é possível visualizar as relações de todas as espécies e configurações simultaneamente.

Figura 39 – Gráfico de relações entre resistências características normais



Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

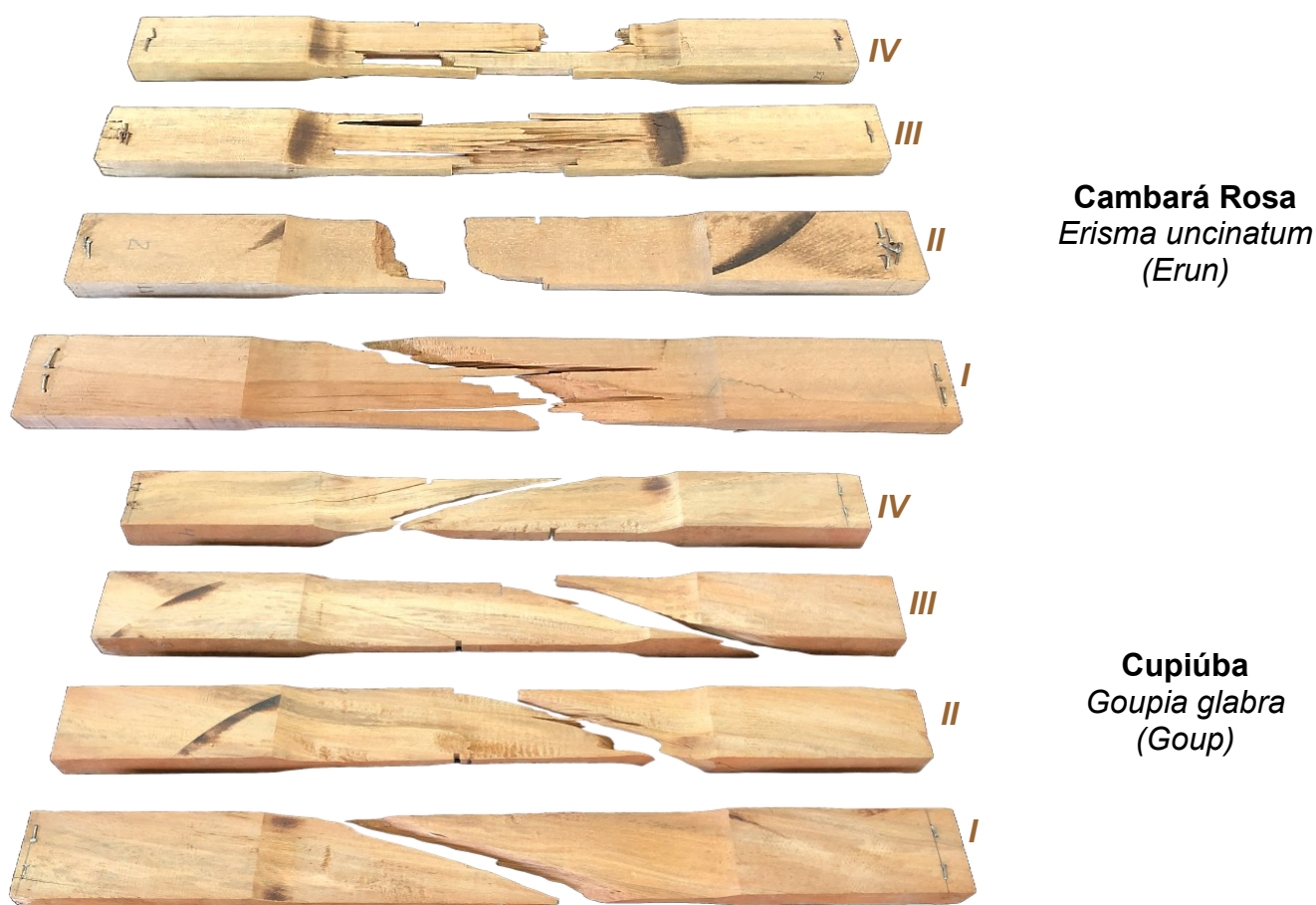
Fonte: Autoria própria (2025)

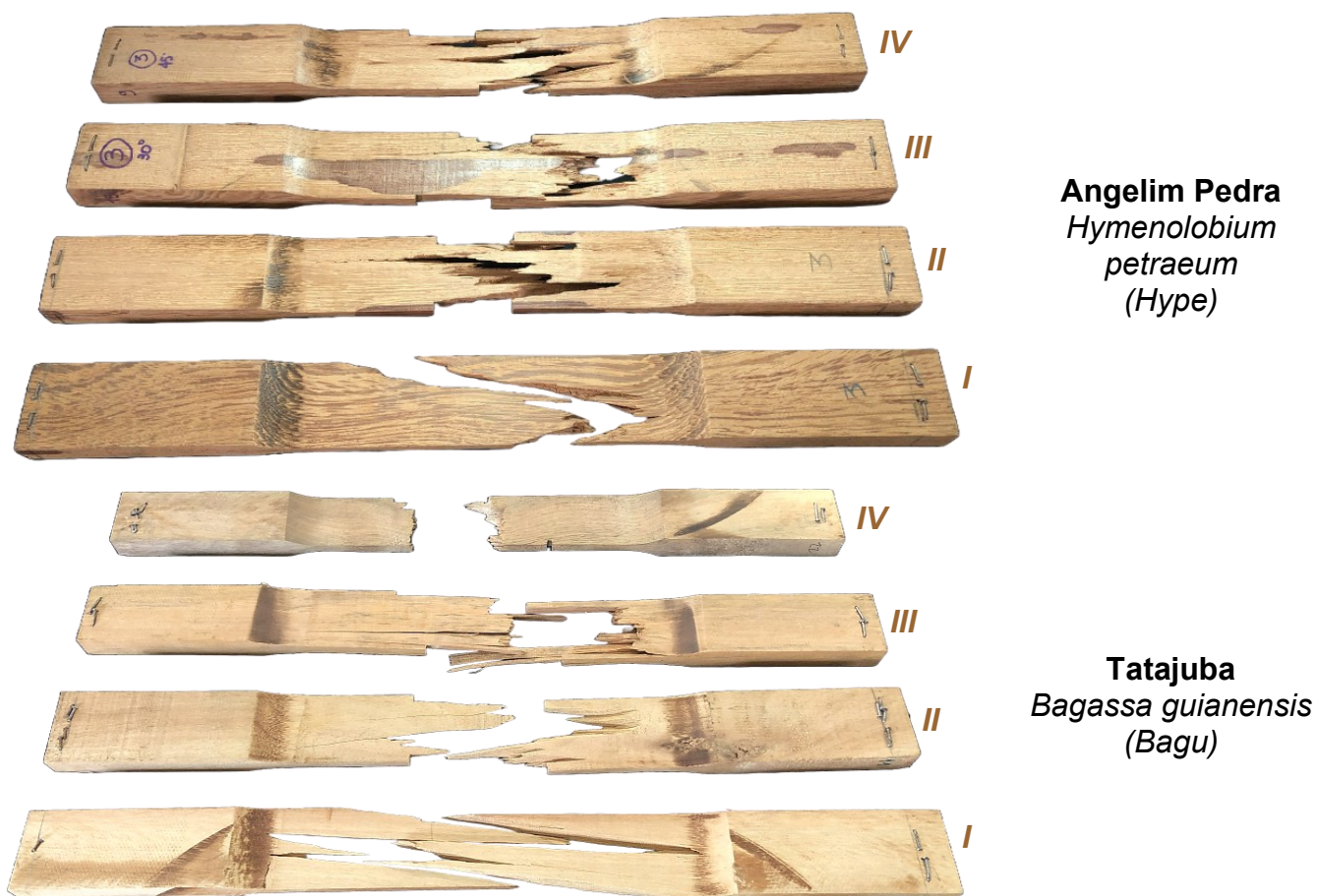
Para os resultados mostrados na Figura 39, o valor de 0,77 da NBR é definido como a linha de referência, cenário no qual a estimativa da resistência a tração a partir do valor da resistência a compressão (ou vice-versa) é preciso. Assim, os valores em que as relações ($f_{c0,k}/f_{t0,k}$) estão abaixo desse limite indicam que a resistência obtida a partir da outra está abaixo da resistência real, ou seja, aumenta-se o coeficiente de segurança e gera um custo maior para execução do projeto. Já nos casos em que os valores em que as relações ($f_{c0,k}/f_{t0,k}$) estão acima dessa linha tem-se uma redução no custo da realização do projeto enquanto o fator de segurança global é diminuído.

4.1.2 RESULTADOS QUALIQUANTITATIVOS ACERCA DA REGIÃO DO PLANO DE FALHA DA MADEIRA

A condição para a avaliação quali-quantitativa deste trabalho foi a precisão do aspecto visual. Por isso, todos os 192 corpos de prova foram fotografados em posições ajustadas que permitissem evidenciar os padrões de falhas com maior riqueza de detalhes. Na Figura 40 são apresentadas fotos tridimensionais dos padrões de falhas para todas as espécies, sendo um exemplar para cada configuração.

Figura 40 – Padrões de falha por configuração em exemplares de cada espécie





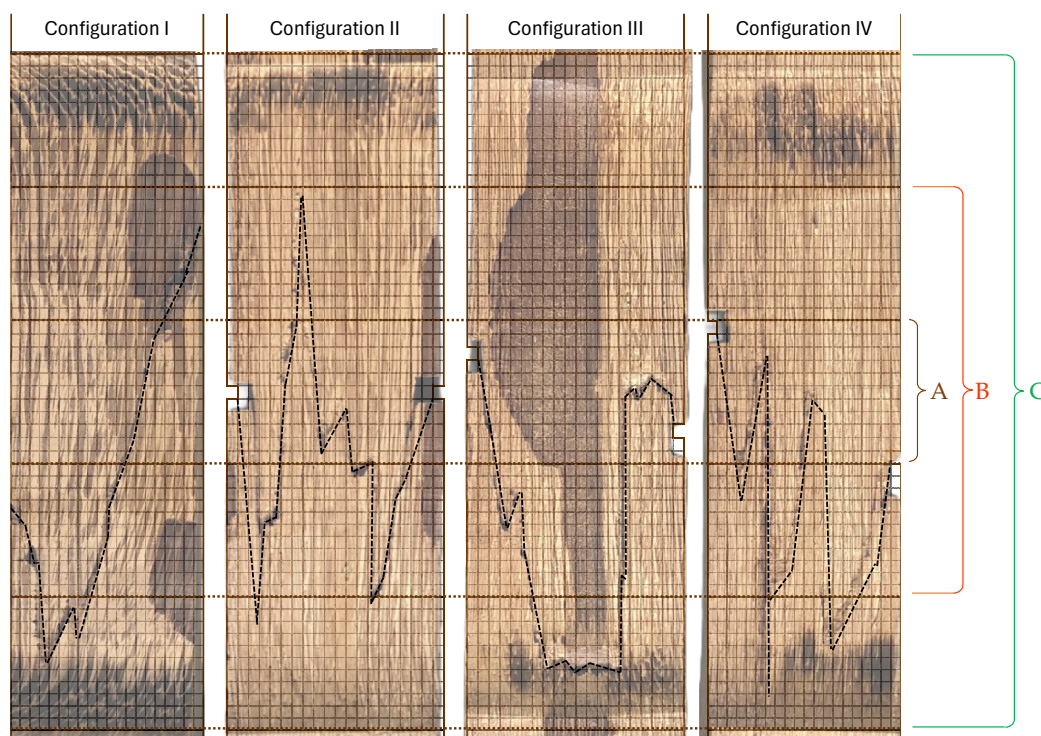
Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2024)

Na Figura 40 pode ser observado o padrão típico da falha provocada pela tração aplicada na direção das fibras. Contudo, mesmo que o padrão de ruptura seja mantido imprevisível para todas as configurações de geometria, percebe-se que há uma tendência de concentração das linhas de falha na região mais central do corpo de prova quando se observa a configuração II (cortes alinhados).

Na Figura 41 é ilustrado o arranjo para análise quali-quantitativa de um corpo de prova da espécie de madeira de Angelim Pedra em cada uma das quatro configurações avaliadas (sem e com a presença dos cortes). Os resultados dessa ilustração em termos percentuais são apresentados na Tabela 10.

Figura 41 – Arranjo de quantificação da distribuição da ruptura



Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 11 – Distribuição percentual da linha de falha por regiões da Figura 41

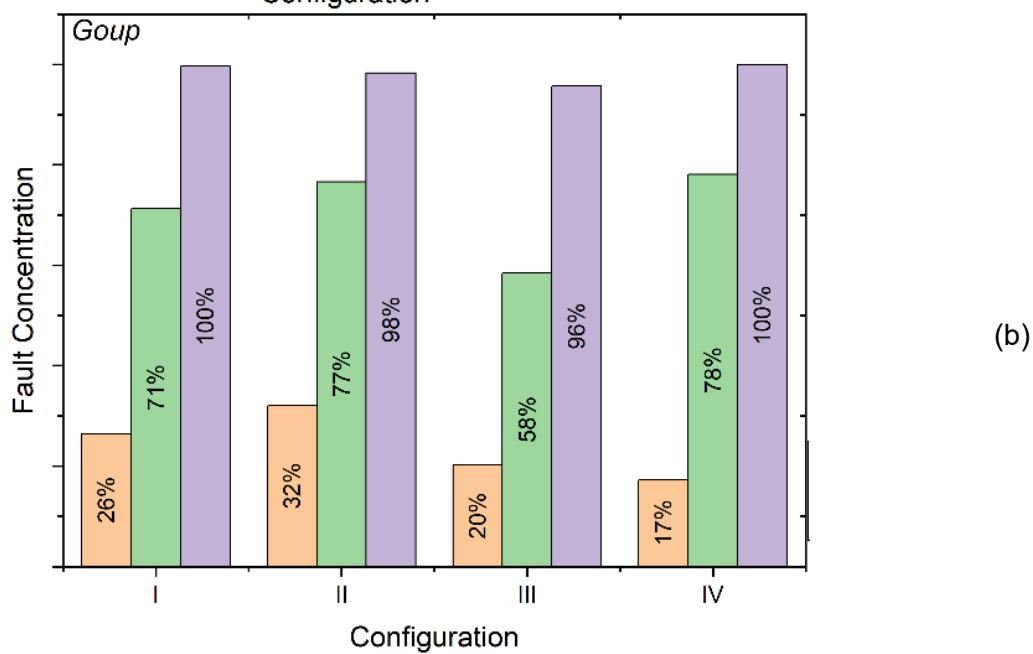
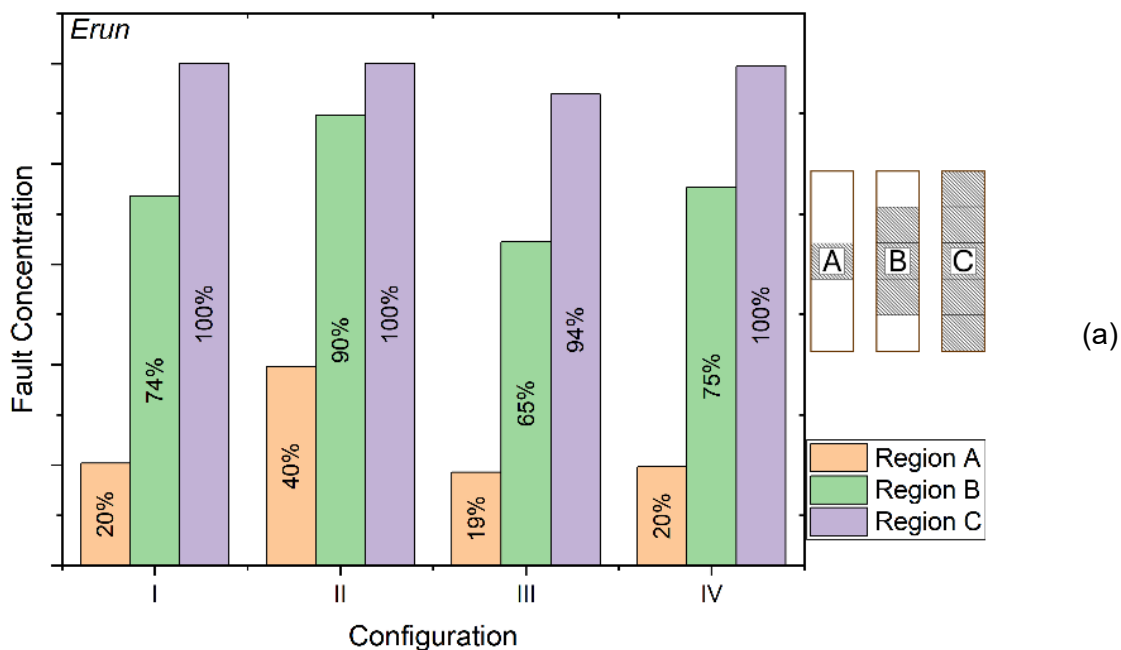
Região	Config I	Config II	Config III	Config IV
A	19,0%	36,0%	30,0%	35,2%
B	70,7%	95,6%	71,4%	81,9%
C	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

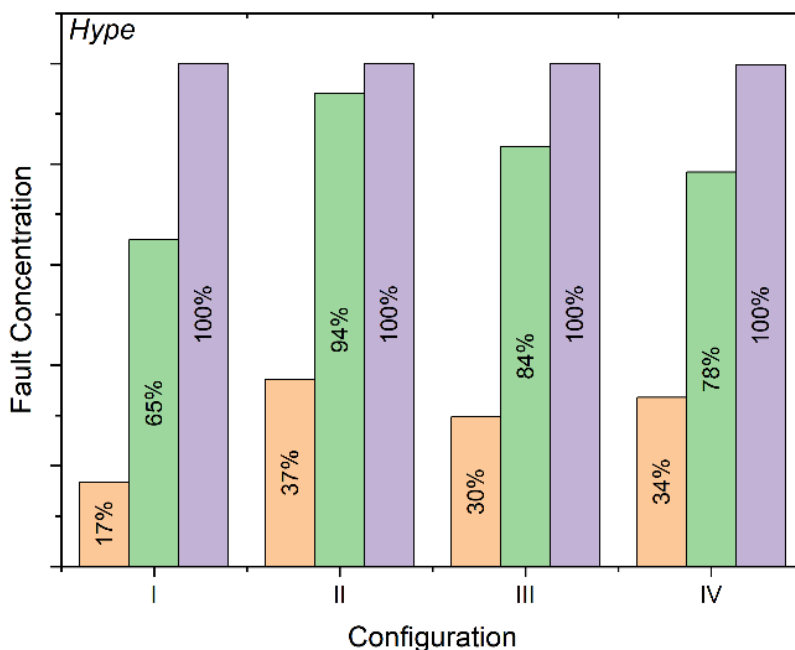
Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

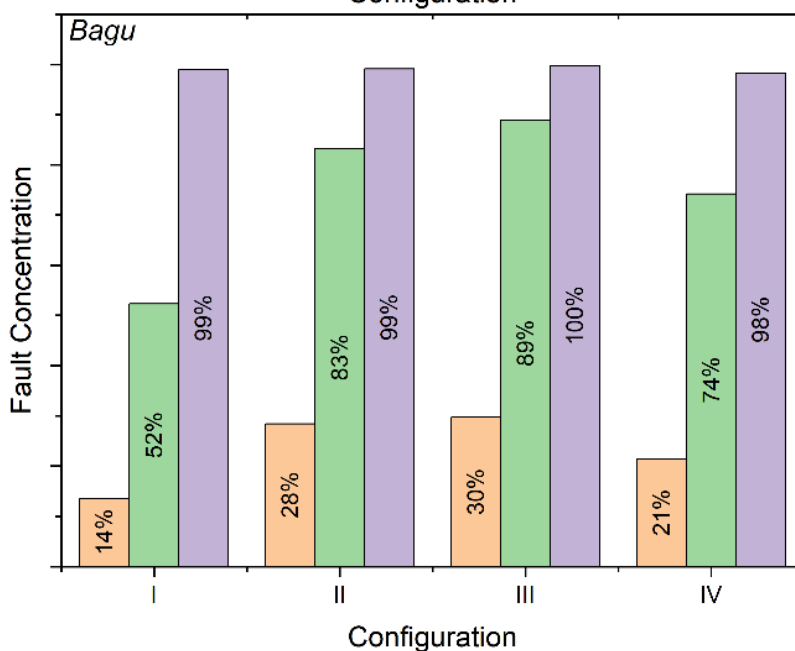
Semelhante ao que foi desenvolvido para os exemplares da Figura 41, todos os 192 Corpos de prova foram analisados. Os resultados obtidos (valores médios) das porcentagens de falha por região e por espécie de madeira são apresentados na Figura 42.

Figura 42 – Gráficos da distribuição percentual média para as regiões de falha. *Erisma uncinatum* (a), *Goupia glabra* (b), *Hymenolobium petraeum* (c) e *Bagassa guianensis* (d)





(c)



(d)

Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados obtidos considerando-se as 4 espécies de madeira indicam que a configuração II é a que consegue gerar a maior concentração de linhas de falha na região A (região central da amostra). Especialmente quando se compara com a configuração I, os resultados evidenciam que se forem consideradas as regiões A e B, a localização das linhas de ruptura na região central dos corpos de prova é mais consistente.

Na Figura 42 o valor da porcentagem de falha, já incluindo a região C, de algumas configurações e espécies não atingiu 100%, isso se deve ao fato de as linhas de ruptura terem

ultrapassado o valor de 210 mm, que foi considerado (por limitações dimensionais da amostra) como sendo o valor limite da região de falha para as análises quali-quantitativas.

4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Após a análise dos resultados experimentais, procede-se à construção dos modelos numéricos. Os resultados das simulações numéricas apresentados nesta seção foram divididos nas quatro configurações adotadas no estudo experimental.

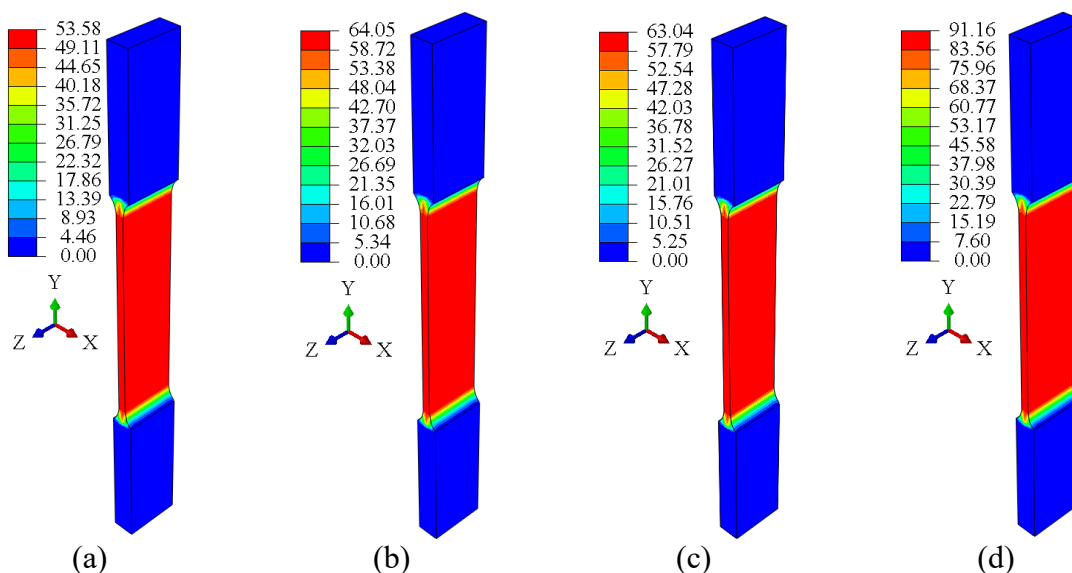
4.2.1 ANÁLISE NUMÉRICA DOS CORPOS DE PROVA SEM CORTES

As figuras a seguir (Figura 43 – Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 45) apresentam, respectivamente, as distribuições das tensões normais (em MPa) atuantes da direção do eixo Y (concordante com a direção das fibras), das tensões cisalhantes (em MPa) atuantes no plano YZ e as deformações plásticas (mm/mm) obtidas dos modelos simulados sem cortes.

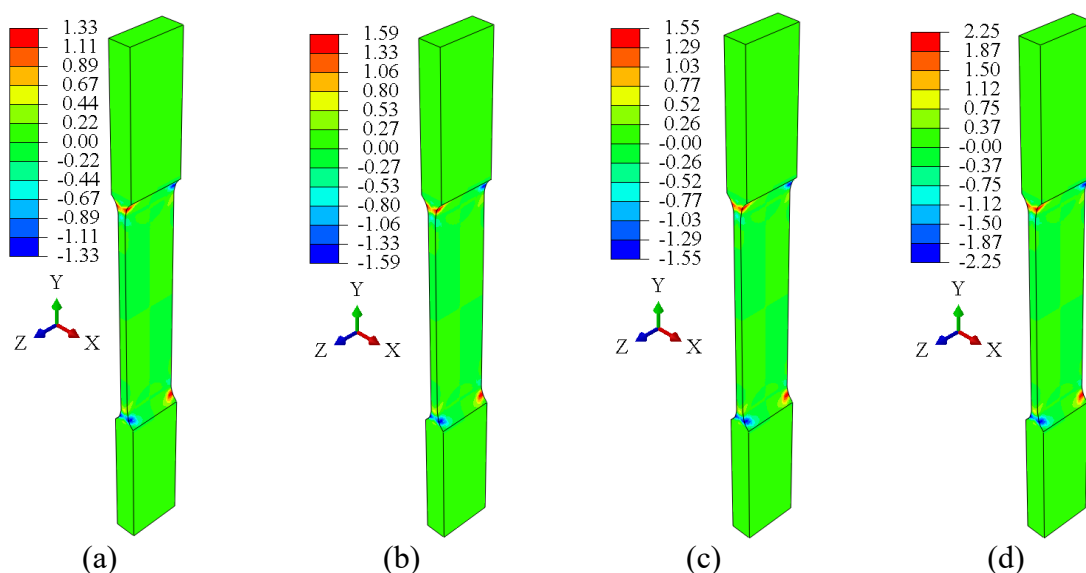
Figura 43 – Tensão normal nos corpos de prova da configuração I: *Erisma uncinatum* (a), *Goupia glabra* (b), *Hymenolobium petraeum* (c) e *Bagassa guianensis* (d)



Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

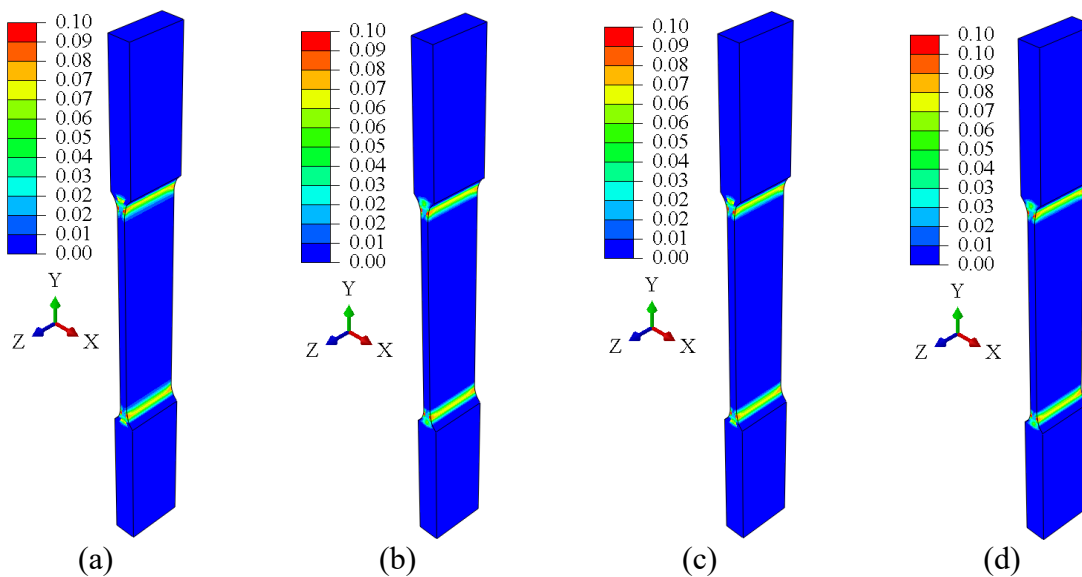
Figura 44 – Tensão cisalhante nos corpos de prova da configuração I: *Erisma uncinatum* (a), *Goupia glabra* (b), *Hymenolobium petraeum* (c) e *Bagassa guianensis* (d)



Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 45 – Deformação plástica nos corpos de prova da configuração I *Erisma uncinatum* (a), *Goupia glabra* (b), *Hymenolobium petraeum* (c) e *Bagassa guianensis* (d)



Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

Da Figura 43, foi observado que as tensões normais se distribuem uniformemente na região central do corpo de prova, o que justifica a ocorrência da falha aleatória dentro dessa região, diretamente influenciada pelas características anatômicas da madeira e possíveis imperfeições geométricas do corpo de prova. Com isso, a concentração da tensão de cisalhamento na região de descontinuidade geométrica (transição da espessura de 20 mm para 7 mm) (Figura 44) pode influenciar na falha da amostra e a obtenção de um valor incorreto da resistência a tração. Isso se comprova na Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

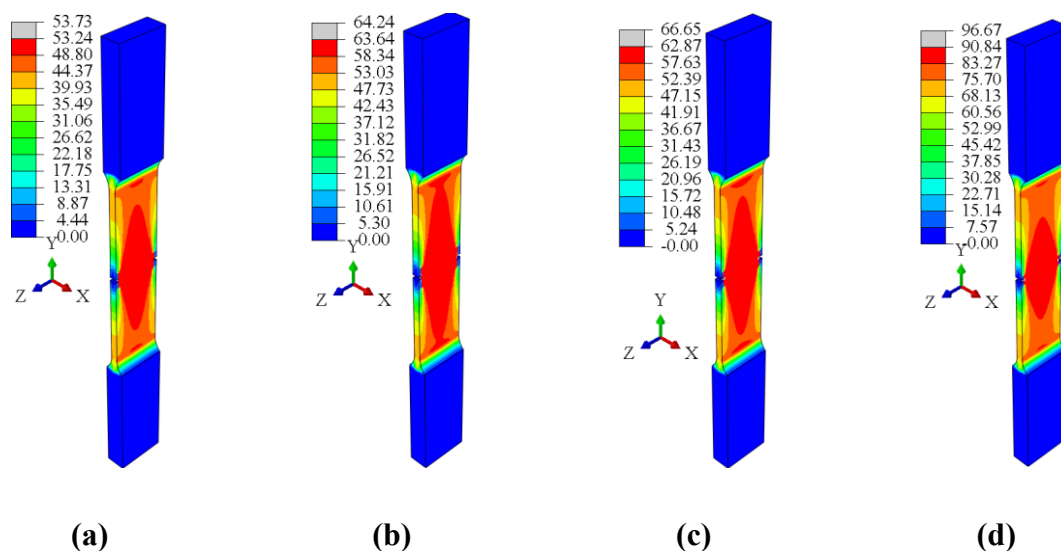
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 45, onde é possível observar que a deformação plástica que ocorre nos corpos de prova é localizada nas extremidades do tramo principal, cabendo destacar, assim como esperado, o mesmo comportamento para todas as espécies de madeira simuladas.

4.2.2 ANÁLISE NUMÉRICA DOS CORPOS DE PROVA COM CORTES ALINHADOS

Os resultados obtidos para os corpos de prova com cortes alinhados (configuração II) são apresentados nas figuras a seguir (Figura 46 – Figura 48).

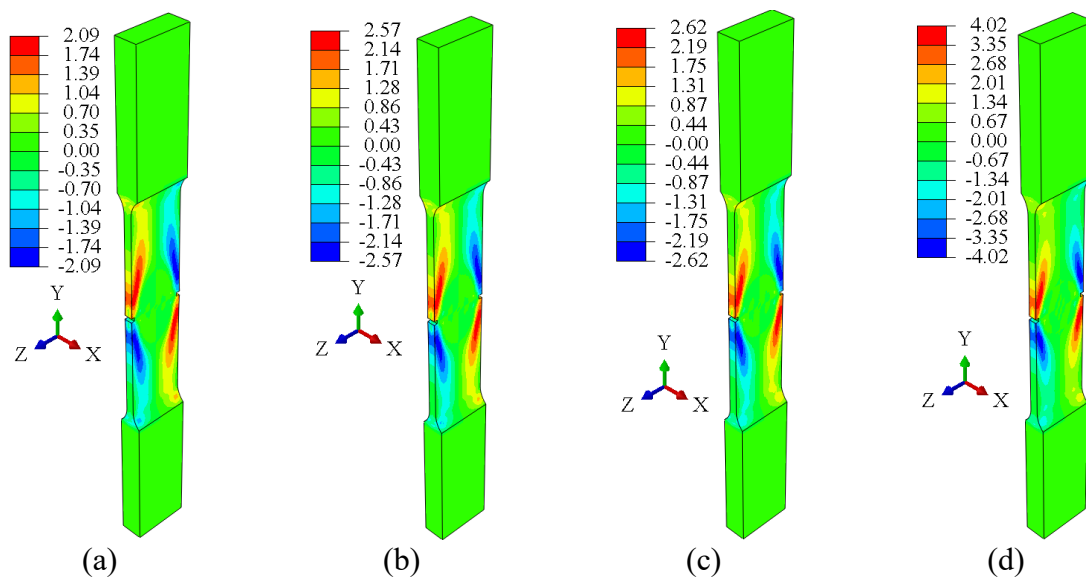
Figura 46 – Tensões normais (MPa) atuantes nos corpos de prova da configuração II: *Erismia uncinatum* (a), *Goupia glabra* (b), *Hymenolobium petraeum* (c) e *Bagassa guianensis* (d)



Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

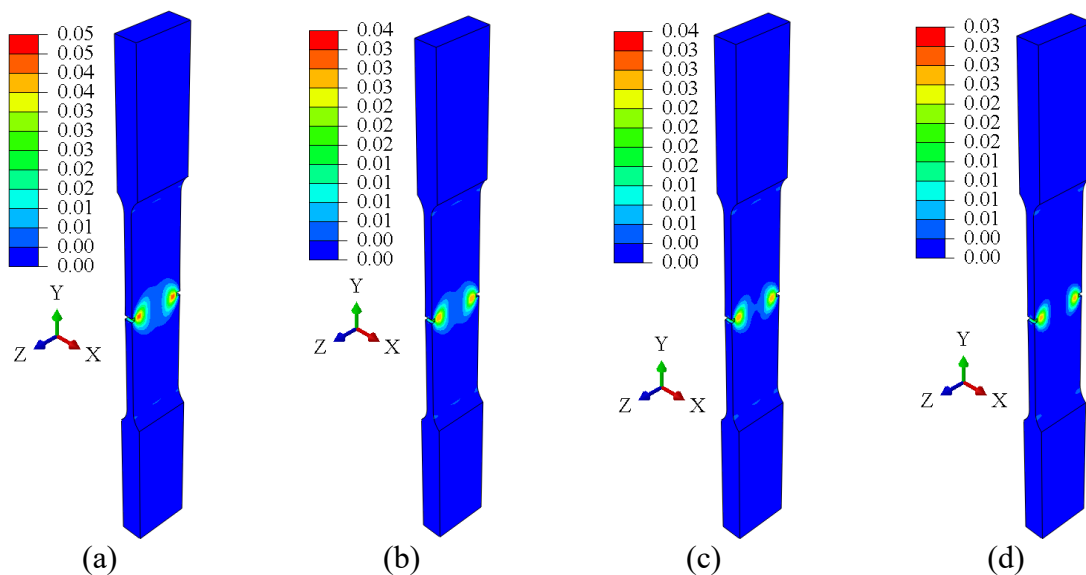
Figura 47 – Tensão cisalhantes (MPa) atuantes nos corpos de prova da configuração II: *Erisma uncinatum* (a), *Goupia glabra* (b), *Hymenolobium petraeum* (c) e *Bagassa guianensis* (d)



Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 48 – Deformação plástica (mm/mm) nos corpos de prova da configuração II: *Erisma uncinatum* (a), *Goupia glabra* (b), *Hymenolobium petraeum* (c) e *Bagassa guianensis* (d)



Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

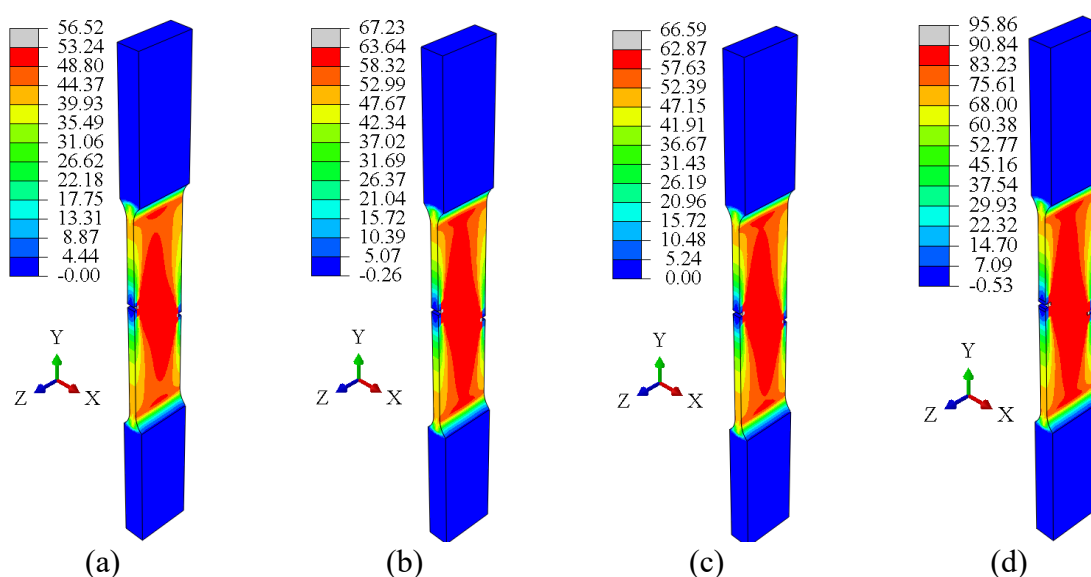
Ao observar a Figura 46, foi possível identificar que as tensões normais passaram a se concentrar no centro do corpo de prova, o que não foi visto no corpo de prova sem a presença de descontinuidades (Figura 43). As tensões máximas foram obtidas nas extremidades dos cortes. Foi observado que para a *Bagassa guianensis*, espécie com maior rigidez axial, as tensões se concentraram mais distantes da extremidade do tramo, o que reduz a possibilidade de ruptura nessa região.

As tensões cisalhantes (Figura 47) apresentaram um padrão distinto do que foi observado no corpo de prova tradicional (Figura 44). A presença dos cortes induz a concentração dessas tensões na região central, similar às tensões normais (Figura 46), o que também foi observado ao se analisar a deformação plástica (Figura 48). Os corpos de prova com espécies mais rígidas apresentaram menores tensões cisalhantes nas extremidades da região central.

4.2.3 ANÁLISE NUMÉRICA DOS CORPOS DE PROVA COM CORTES DESALINHADOS À 30°

As figuras a seguir (Figura 49 – Figura 51) apresentam os resultados obtidos para os modelos com cortes desalinhados à 30° (configuração III).

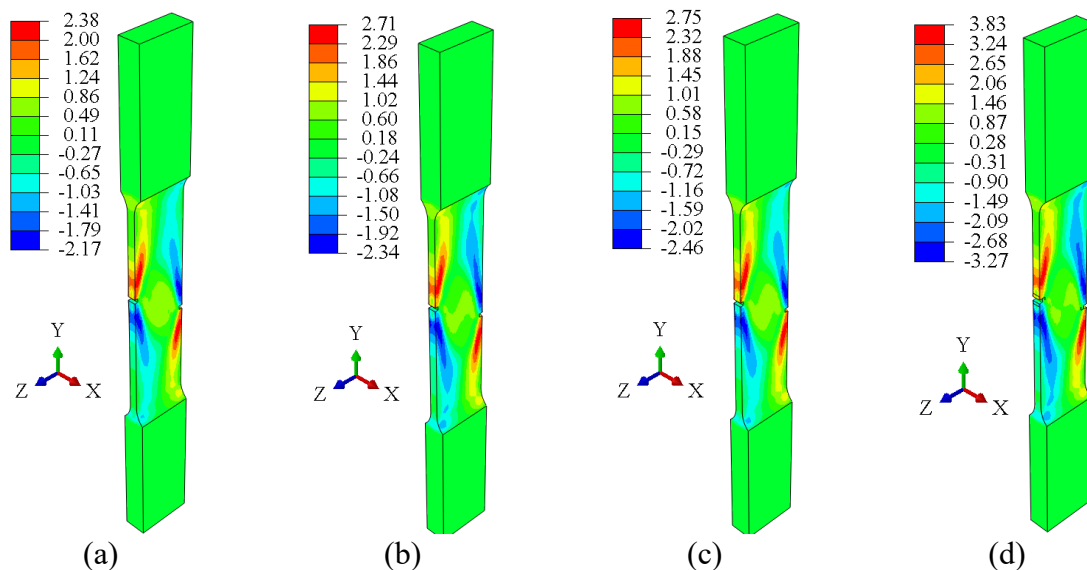
Figura 49 – Tensões normais (MPa) nos corpos de prova da configuração III: *Erisma uncinatum* (a), *Goupia glabra* (b), *Hymenolobium petraeum* (c) e *Bagassa guianensis* (d)



Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

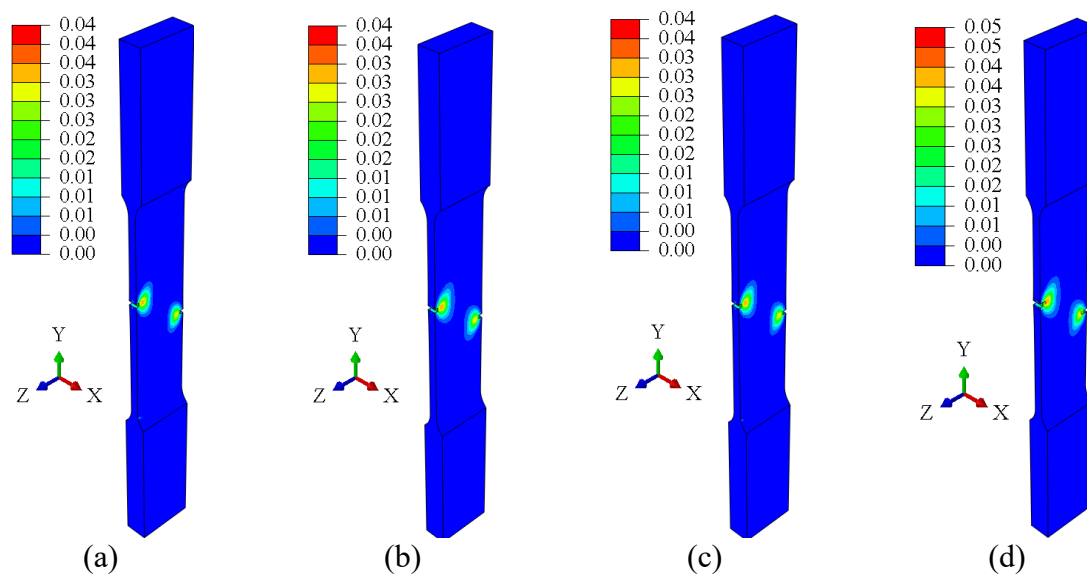
Figura 50 – Tensões de cisalhamento (MPa) nos corpos de prova da configuração III: *Erismia uncinatum* (a), *Goupia glabra* (b), *Hymenolobium petraeum* (c) e *Bagassa guianensis* (d)



Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 51 – Deformação plástica (mm/mm) nos corpos de prova da configuração III: *Erismia uncinatum* (a), *Goupia glabra* (b), *Hymenolobium petraeum* (c) e *Bagassa guianensis* (d)



Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

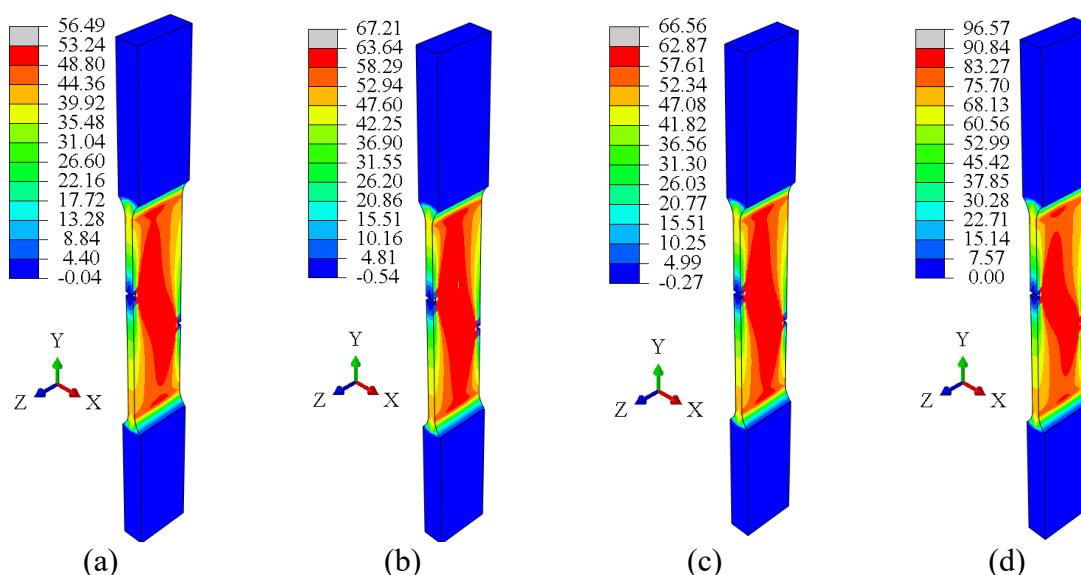
Para os modelos de configuração III, foi observado que o padrão de comportamento das tensões internas e das deformações plásticas foram similares aos encontrados para os modelos de configuração II (Figura 46 – Figura 49), com as tensões normais máximas (Figura 49) se mantendo próximas da região central do corpo de prova, quando comparado com os corpos de prova sem cortes (Figura 43). Diferente do que foi observado na configuração II, os corpos de prova com madeira mais rígida apresentaram uma maior extensão ocorrência de tensões elevadas.

Com essa configuração, as tensões de cisalhamento foram atenuadas (Figura 50), quando comparadas com os modelos com cortes alinhados (Figura 47) e valores levemente superiores aos encontrados na Figura 47 foram obtidos perto da região descontínua de apoio do elemento. As deformações plásticas (Figura 51) mantiveram o patamar de intensidade do que foi observado na configuração II (Figura 48).

4.2.4 ANÁLISE NUMÉRICA DOS CORPOS DE PROVA COM CORTES DESALINHADOS À 45°

Os resultados encontrados para os corpos de prova com a configuração IV são apresentados nas figuras a seguir (Figura 52 – Figura 54).

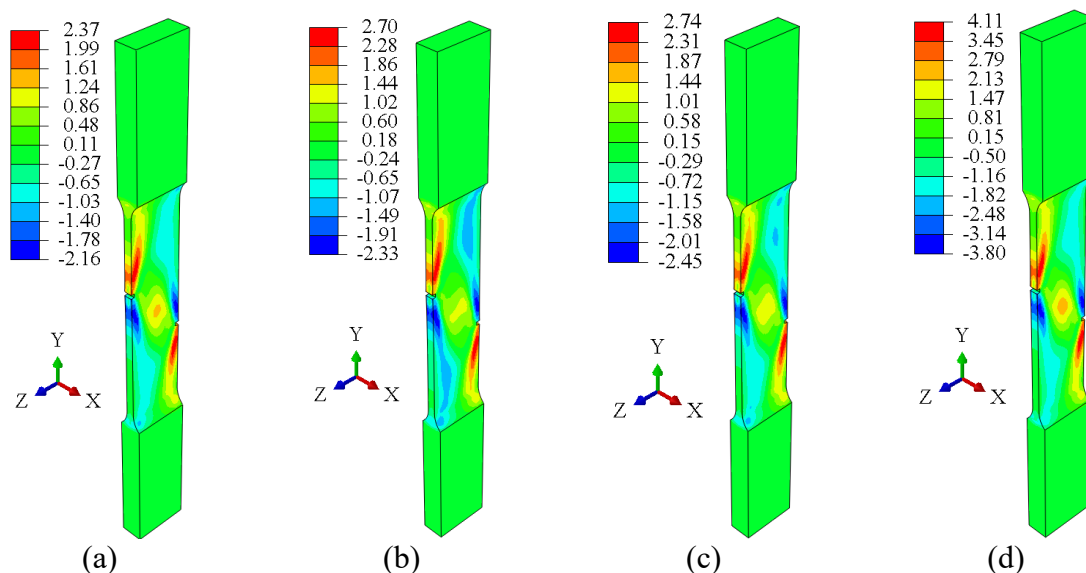
Figura 52 – Tensões normais (MPa) atuantes nos corpos de prova da configuração IV: *Erismia uncinatum* (a), *Goupia glabra* (b), *Hymenolobium petraeum* (c) e *Bagassa guianensis* (d)



Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

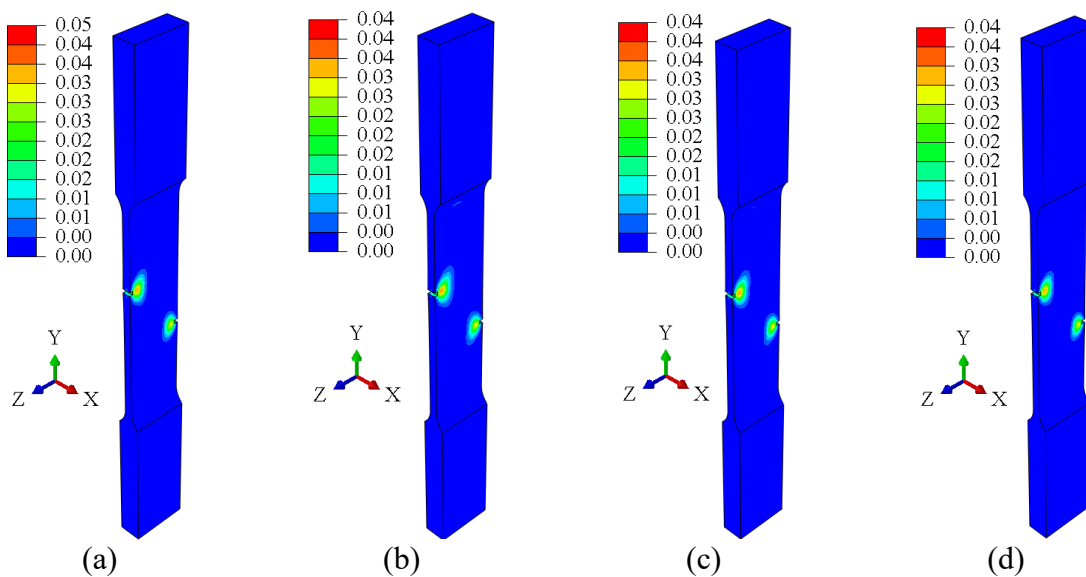
Figura 53 – Tensões cisalhantes (MPa) atuantes nos corpos de prova da configuração IV
Erisma uncinatum (a), *Goupia glabra* (b), *Hymenolobium petraeum* (c) e *Bagassa guianensis* (d)



Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 54 – Deformação plástica (mm/mm) nos corpos de prova da configuração IV: *Erisma uncinatum* (a), *Goupia glabra* (b), *Hymenolobium petraeum* (c) e *Bagassa guianensis* (d)



Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°, III – CP com cortes desalinhados a 30°; IV – CP com cortes desalinhados a 45°.

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados encontrados para os modelos da configuração IV foram similares aos obtidos na configuração III. As tensões normais (Figura 52) mantiveram uma distribuição mais abrangente do que as encontradas nos modelos de configuração II (Figura 46). Porém, neste caso, diferente do que foi encontrado nos modelos da configuração III (Figura 49), foi obtida uma maior concentração de tensões na região central nos corpos de prova com madeiras mais rígidas.

As tensões cisalhamento (Figura 53) e deformações plásticas (Figura 54) seguiram o padrão e intensidade encontrados nos modelos de configuração III, com exceção ao corpo de prova de *Bagassa guianensis*, onde a tensão de cisalhamento foi, aproximadamente, 7% superior ao modelo correspondente de configuração III.

Destaca-se que essa maior extensão na distribuição das tensões normais e de cisalhamento observadas nos modelos de configuração III e IV podem indicar possíveis falhas nas regiões da extremidade dos corpos de prova, sendo influenciadas por possíveis imperfeições geométricas e defeitos naturais da madeira.

Das simulações numéricas, cabe destacar que é muito difícil (quase que impossível) prever o modo de falha para um material natural fibroso como a madeira. Como informação adicional, cada conjunto de doze Corpos de prova ensaiados por configuração e por espécie de madeira foram encontrados doze modos de falha, substancialmente, diferentes. Contudo, a importância da simulação numérica está justamente no auxílio para compreender e interpretar os resultados experimentais.

4.3 APROFUNDAMENTO SOBRE O MECANISMO DE FALHA

Diante dos resultados apresentados até aqui, nos quais foram considerando os valores médios dos conjuntos de doze Corpos de prova por espécie e por configuração, observou-se que os cortes alinhados (configuração II) evidenciam maior potencial para restringir a amplitude das linhas de ruptura. Esse fato pode ser comprovado observando a Figura 55.

Figura 55 – Padrões de ruptura em duas configurações para a Tatajuba



Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°.

Fonte: Autoria própria (2025)

NA Figura 55 são expostos 4 Corpos de prova da espécie Tatajuba, sendo dois para a condição íntegra e dois para cortes alinhados. Na imagem é evidente que as falhas nos Corpos de prova íntegros se desenvolvem de forma muito ampla, inclusive, extrapolam a região útil do corpo de prova (seção central de 7 mm 210 mm) com maior frequência que nos corpos de prova com cortes.

Com o intuito de aprofundar o entendimento do mecanismo de falha, optou-se por considerar os valores oriundos diretamente do ensaio ($f_{t0,méd}$), um exemplar íntegro e outro com cortes laterais alinhados, para fazer a simulação numérica observando os avanços da falha. Na Tabela 12 mostra os valores de resistência à tração paralela, obtida diretamente do ensaio, corrigida para umidade de 12%.

Tabela 12 – Valor da resistência à tração paralela de dois exemplares

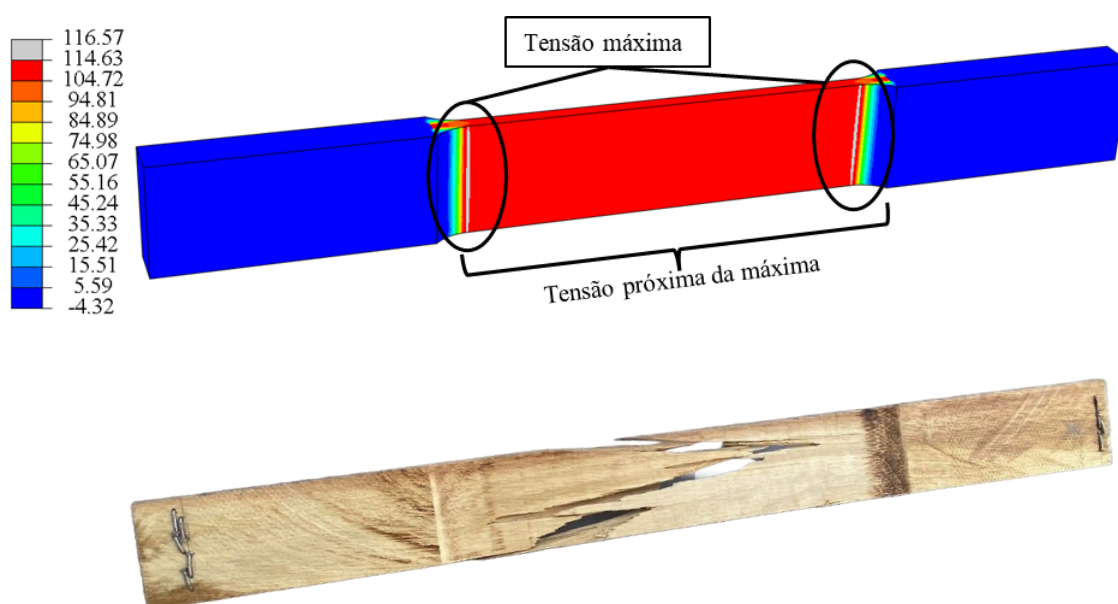
Configuração do corpo de prova	Resistência (MPa)
I	114,6
II	104,7

Configurações: I – CP íntegro (sem cortes); II – CP com cortes alinhados a 0°.

Fonte: Autoria própria (2025)

Para análise comparativa dos corpos de prova as Figura 56 e Figura 57 apresentam as tensões normais obtidas (S11) no momento da falha e a imagem real dos Corpos de prova íntegro e com cortes laterais, respectivamente.

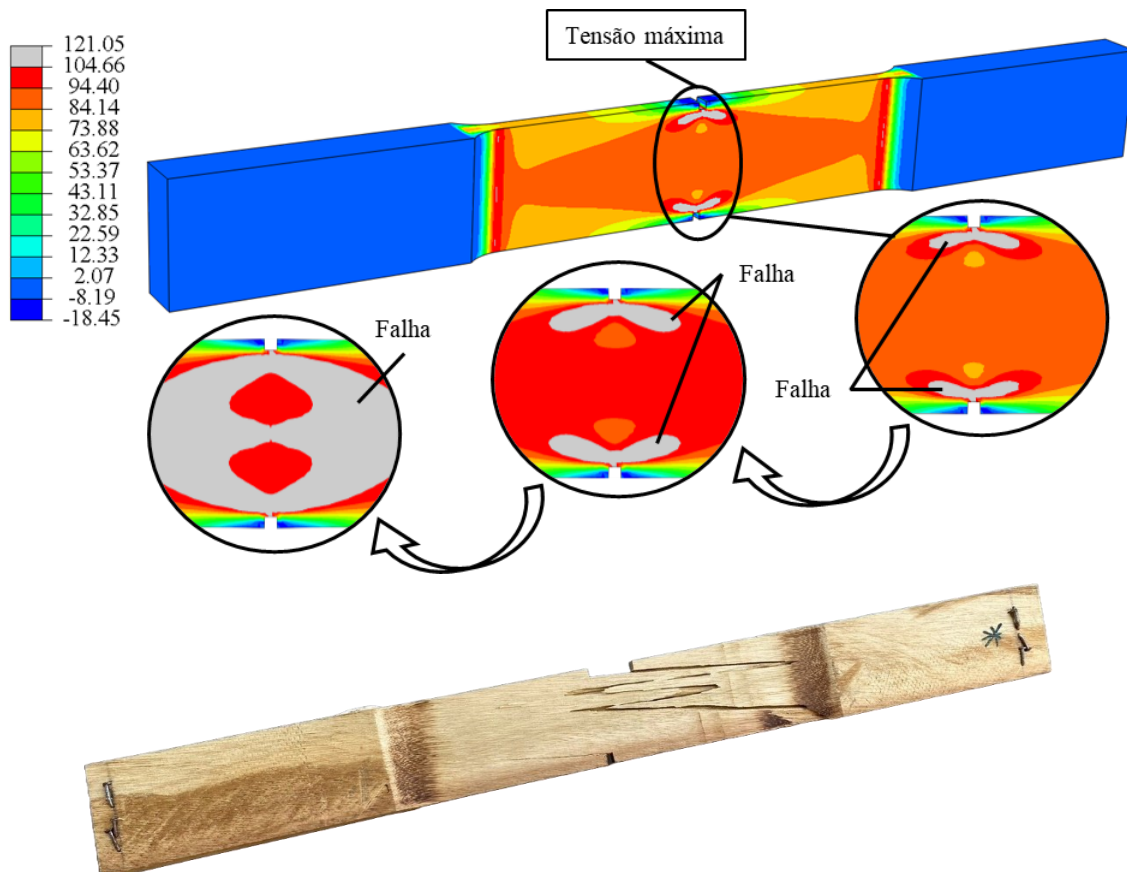
Figura 56 – Tensões principais e imagem real o corpo de prova da configuração I após o ensaio



Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 56, observa-se que as tensões normais se distribuem uniformemente no tramo central do corpo de prova, o que explica a ocorrência de falhas aleatórias nessa região. Essa falha é diretamente influenciada pelas características anatômicas da madeira e possíveis imperfeições geométricas do corpo de prova, que alteram a distribuição das tensões. Padrões semelhantes na distribuição de tensões foram relatados por Nukala *et al.*, (2023) e Roy *et al.* (2018) em estudos com compósitos de polímeros reforçados com madeira.

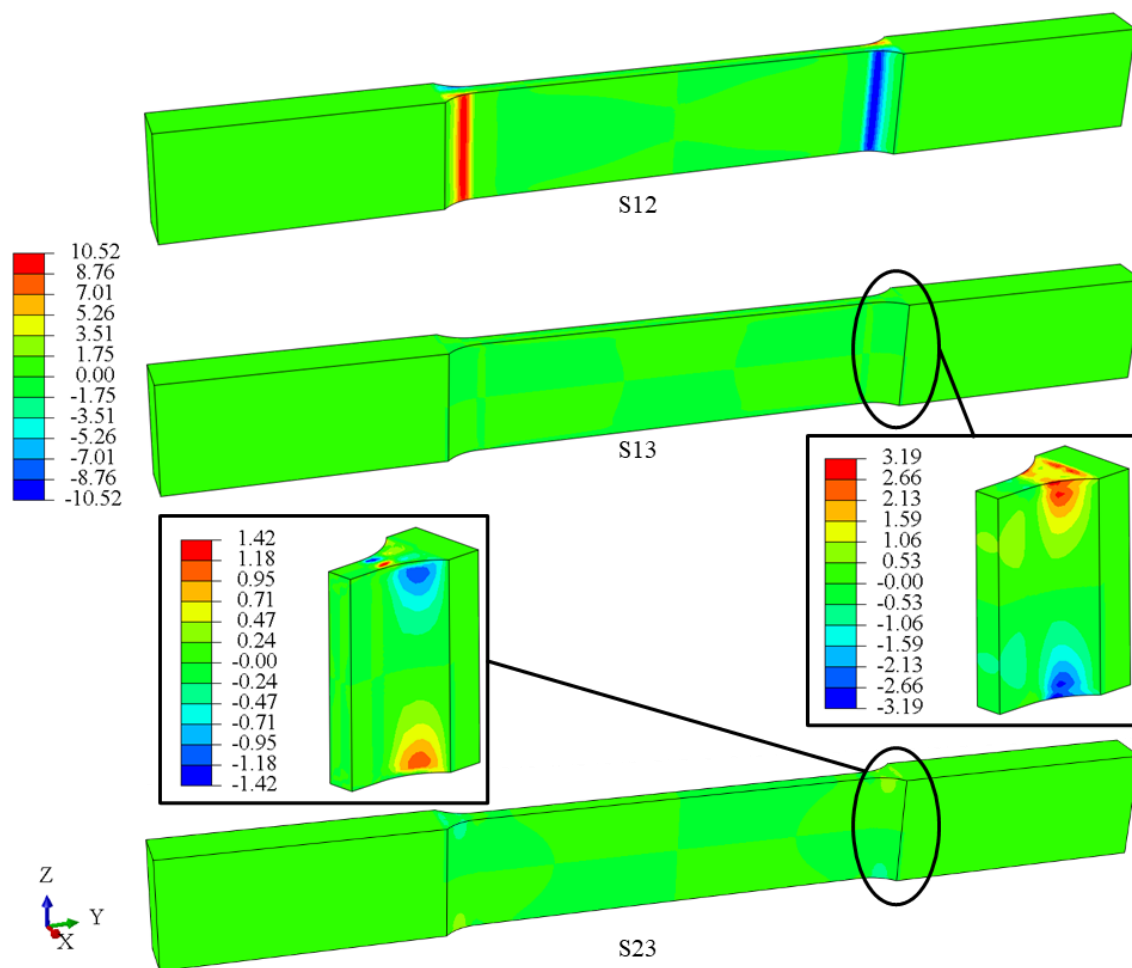
Figura 57 – Tensões principais e foto do corpo de prova na configuração II após o ensaio



Fonte: Autoria própria (2025)

Em contrapartida, na Figura 57 foi possível identificar que as tensões normais passaram a se concentrar no centro do corpo de prova, ocorrendo a partir da extremidade do corte, induzindo a falha nessa região, o que não foi visto no corpo de prova tradicional.

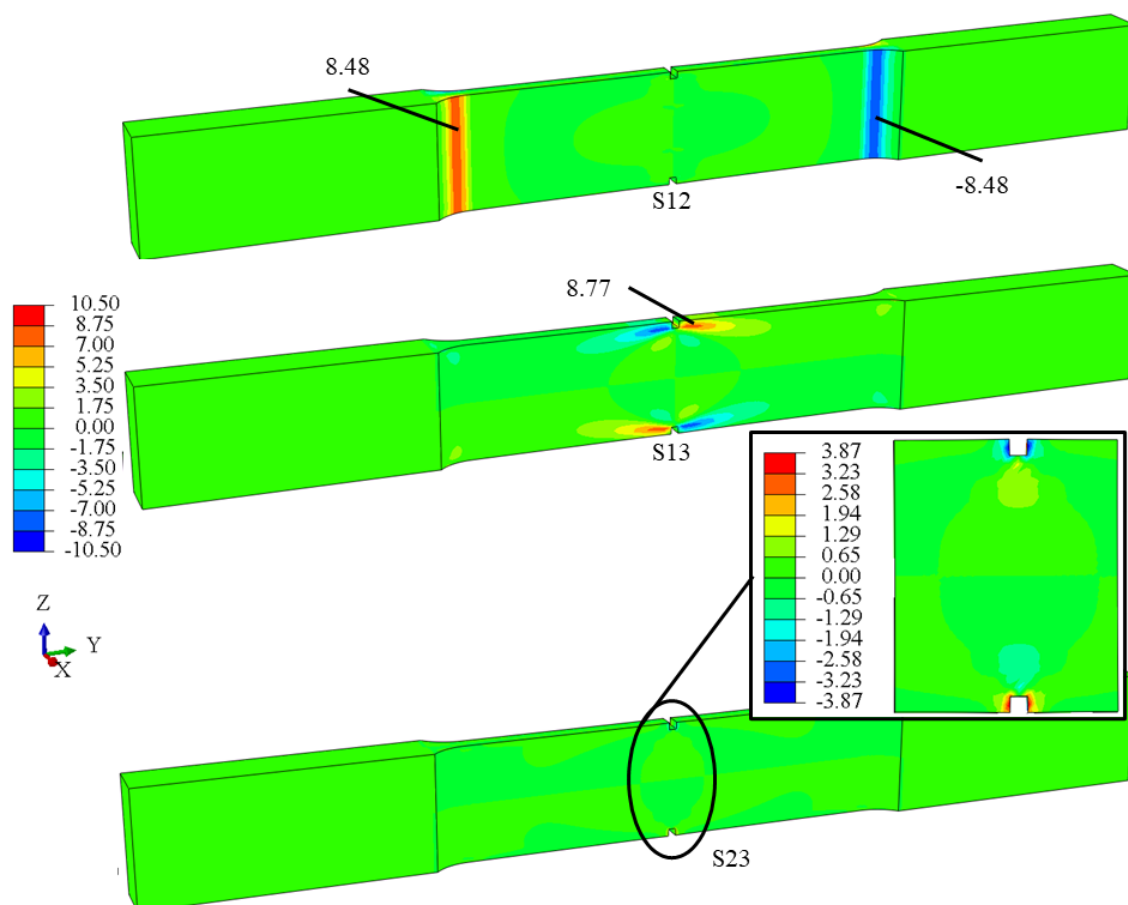
Além das tensões axiais, as tensões de cisalhamento encontradas nas simulações apresentaram um padrão distinto ao se inserir os cortes. Os resultados obtidos para o corpo de prova íntegro são mostrados na Figura 58.

Figura 58 – Tensões de cisalhamento do corpo de prova configuração I

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados obtidos para o corpo de prova com cortes são mostrados na Figura 59.

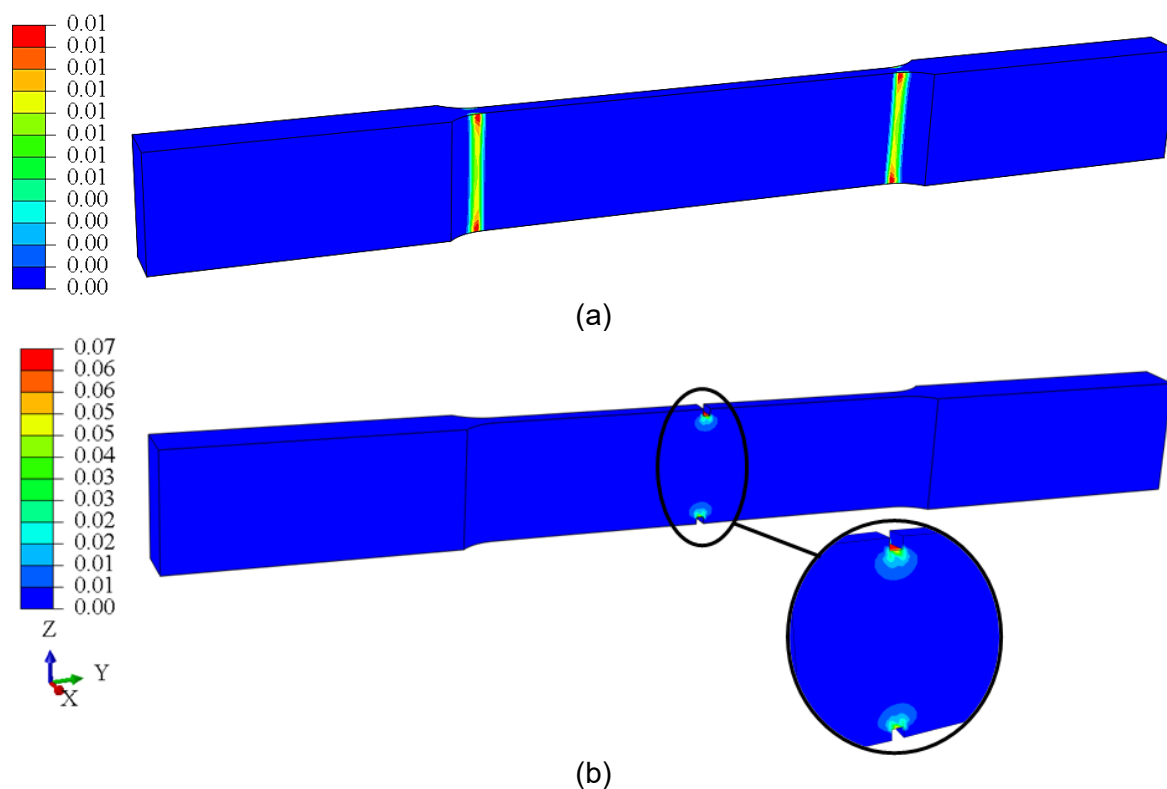
Figura 59 – Tensões de cisalhamento para o corpo de prova na configuração II – alinhados a 0°



Fonte: Autoria própria (2025)

Ao analisar a Figura 59, observa-se uma concentração de tensão de cisalhamento (S12) nas extremidades do corpo de prova, especificamente entre o apoio e o tramo central. Em contraste, as tensões de cisalhamento registradas nos demais planos foram notavelmente inferiores: $S13_{\text{máx}}$ foi 70% menor que $S12_{\text{máx}}$, enquanto $S23_{\text{máx}}$ apresentou uma redução de 86,5% em relação a $S12_{\text{máx}}$. Considerando a distribuição quase uniforme das tensões normais evidenciada na Figura 58, essa concentração de tensões de cisalhamento pode influenciar a falha do elemento, comprometendo a precisão do ensaio. Essa hipótese é corroborada pela Figura 60a, que demonstra que a deformação plástica no corpo de prova se concentra nas extremidades do tramo principal.

Figura 60 – Deformações plásticas: corpo de prova íntegro, configuração I (a) e corpo de prova modificado, configuração II – cortes alinhados à 0° (b)

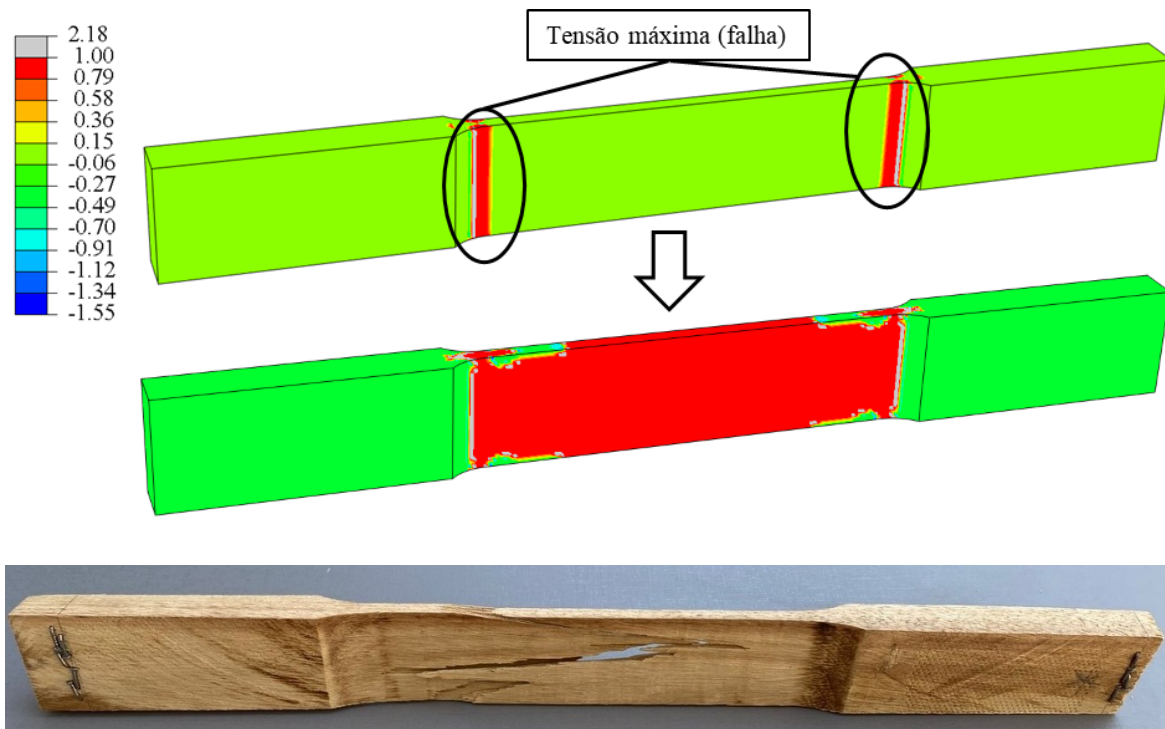


Fonte: Autoria própria (2025)

Com a inserção dos cortes, as deformações plásticas se concentraram na região central do corpo de prova (Figura 60b), enquanto as tensões de cisalhamento nas extremidades (S12) foram reduzidas em aproximadamente 19,4% (Figura 59). Além disso, a presença das descontinuidades induziu um aumento nas tensões de cisalhamento (S13) na região de interesse da falha, com valores ligeiramente superiores ao observado nas extremidades ($S13_{\text{máx}} = 8,77 \text{ MPa} > 8,48 \text{ MPa} = S12_{\text{máx}}$).

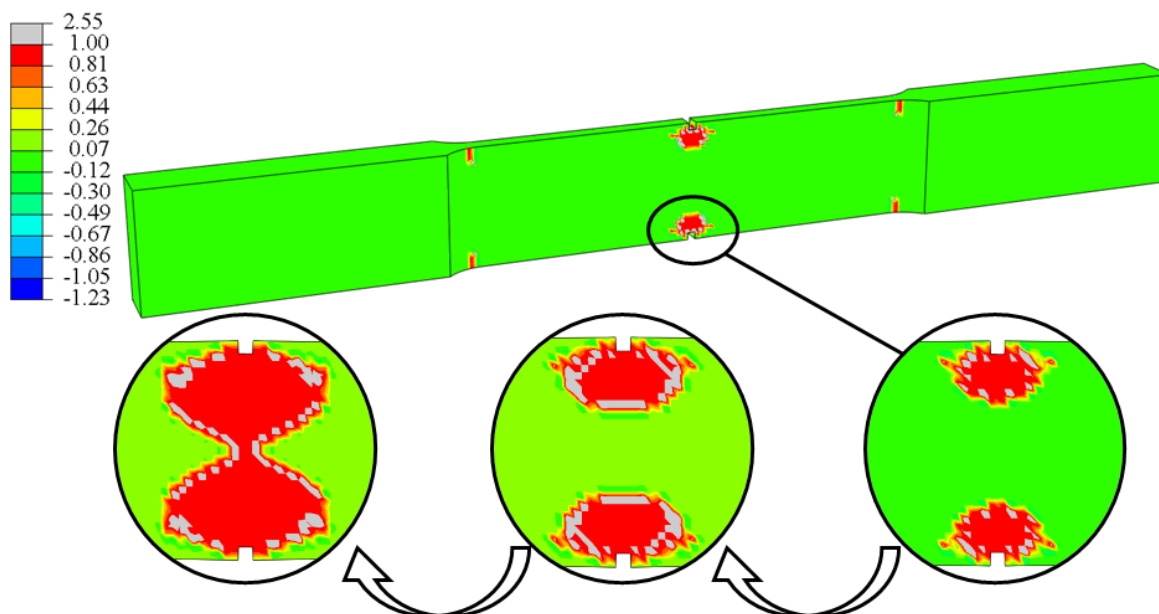
Por fim, as Figura 61 e Figura 62 apresentam as regiões de escoamento dos Corpos de prova e suas imagens reais, para as configurações I e II, respectivamente.

Figura 61 – Regiões de escoamento e imagem do corpo de prova íntegro avaliado – configuração I



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 62 – Regiões de escoamento e imagem do corpo de prova avaliado na configuração II – cortes alinhados à 0°





Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 61 reforça as observações anteriores, destacando que o escoamento tende a ocorrer nas extremidades do corpo de prova sem cortes. No entanto, a presença dos cortes induz falhas na região central, embora o escoamento também ocorra nas extremidades, mas somente após a deformação no centro do corpo de prova. Isso indica que o corpo de prova tende a romper antes que a região da extremidade atinja o limite de escoamento, o que foi confirmado no estudo experimental. Os detalhes apresentados na Figura 62 ilustram a evolução da região de escoamento, evidenciando a eficácia dos cortes em induzir a falha na região desejada.

5. CONCLUSÕES

Para todas as espécies investigadas houve reduções nos valores das estimativas da $f_{t,0}$ quando foram inseridos os cortes laterais. Contudo, especialmente para a condição da configuração II, os coeficientes de variação sempre foram menores do que os coeficientes de variação da configuração sem cortes, o que indica que há uma maior segurança estrutural e que pode ser considerada em termos de valores e de coeficientes de minoração das resistências de projeto.

A hipótese principal no início do trabalho era que os cortes alinhados (configuração II) fossem os melhores indutores por conta da concentração das tensões. Isso foi confirmado tanto experimentalmente quanto numericamente. Contudo, a importância das configurações III e IV é justamente pelo fato de a madeira ser um material fibroso, um compósito laminado e, nessa condição, não se tem a falha perpendicular à fibra.

Tanto nos ensaios experimentais quanto na simulação numérica, ficou claro que a configuração II (com os cortes alinhados perpendicularmente às fibras) é a mais indicada para que a região de ruptura ocorra predominantemente na região central da amostra quando a madeira é solicitada na tração paralela às fibras.

Para todas as espécies estudadas – Cambará rosa, Cupiúba, Angelim pedra e Tatajuba – foi observado o potencial de influenciar e restringir a região de falha da madeira, contudo não é possível estabelecer uma configuração com cortes laterais, capaz de desenvolver um plano de falha completamente perpendicular à direção das fibras de crescimento da madeira. Inclusive, foi percebido que alguns Corpos de prova mostravam o aspecto de que as fibras se desenvolveram de maneira retorcida, não sendo perfeitamente alinhadas ao comprimento do corpo de prova.

A partir dos valores das relações $(f_{c0,k}/f_{t0,k})$, ficou muito claro o desafio existente para que seja estabelecido um único valor de referência, como o 0,77 sugerido pela NBR 7190, capaz de atender, com precisão, todas as espécies/classes de madeira disponíveis para utilização na construção civil. Com base nos resultados observados, as classes de maior resistência, D40 e D50, ficaram acima do valor de referência, a classe D30 ajustou-se muito bem ao valor de referência e a classe D20 ficou abaixo da referência. Diante disso a indicação é que sejam desenvolvidas outras pesquisas no sentido de avaliar se há uma relação, que seja ideal para atender cada uma das classes (D20, D30, D40, D50 e D60).

Para trabalhos futuros sugere-se que sejam realizados experimentos com outras espécies de madeira nas configurações I (sem cortes) e II (com cortes alinhados) considerando-se um maior número de amostras para avaliar se haveria uma equação, ou mesmo um coeficiente numérico, que expresse a relação entre os valores de resistência à tração provenientes de ambas as condições experimentais.

Também é sugerido que sejam desenvolvidas pesquisas com a caracterização completa para espécies de madeiras, investigando as propriedades elásticas e mecânicas bem como as relações de resistências normais e cisalhantes para as direções ortogonais da madeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 7190. **Projeto de estruturas de madeira**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2022.

ABNT NBR 7190-1. **Projeto de estruturas de madeira – Parte 1: Critérios de dimensionamento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2022.

ABNT NBR 7190-3. **Projeto de estruturas de madeira – Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2022.

ALMEIDA, J. P. B.; COUTO, N. G.; AQUINO, V. B. de M.; WOLENSKI, A. R. V.; PEIXOTO, R. G.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Relações entre propriedades de rigidez para distintas solicitações mecânicas visando projetos de estruturas de madeira. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 2, 2020.

ALVES, L. F.; PESSÔA, P. de M.; JARDIM, P. I. L. G.; FAUSTINO, E.; DOS SANTOS, H. F.; LAHR, F. A. R.; DE ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L. Numerical Evaluation of the Influence of Using Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Rebars as Shear Connectors for Cross-Laminated Timber–Concrete Panels. **Buildings**, v. 14, n. 7, p. 2178, jul. 2024.

ARAÚJO, H. J. B. de. RELAÇÕES FUNCIONAIS ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE MADEIRAS TROPICAIS BRASILEIRAS. **FLORESTA**, v. 37, n. 3, 11 dez. 2007. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/9937>>. Acesso em: 6 out. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira** Associação Brasileira de Normas Técnicas. [s.l.: s.n.].

ASTM D143. **Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber**. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials - ASTM, 2014. .

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. CONSIDERAÇÕES SOBRE A PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL COM MADEIRAS DA AMAZÔNIA. Série Técnica IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. p. 25, 1981.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. [s.l.] Nobel, 1991. 154 p.

BÜYÜKSARI, Ü. Effect of loading rate on mechanical properties of micro-sized oak wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 19, n. 2, p. 163–172, 2017.

CALEGARI, L.; CALEGARI, C. C. A.; LOPES, P. J. G.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D. M. Normalização Técnica para Determinação das Propriedades Físicas e Mecânicas de Madeiras. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 4, n. 2, p. 122–138, 30 nov. 2013.

- CALIL NETO, C.; MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C.; LAHAR, F. A. R. Modelagem numérica do comportamento de ligações com parafusos auto-atarraxantes em X em corpos de prova de MLC com madeiras do tipo Eucalipto urograndis. **Revista Materia**, v. 22, n. 1, 2017. . Acesso em: 21 nov. 2023.
- CAMPOS, É. F.; PUNHAGUI, K. R. G.; JOHN, V. M. Emissão de CO₂ do transporte da madeira nativa da Amazônia. **Ambiente Construído**, v. 11, p. 157–172, 2011.
- CARVALHO, W.; CANILHA, L.; FERRAZ, A.; MILAGRES, A. M. F. Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. **Química Nova**, v. 32, p. 2191–2195, 2009.
- CHEN, H.; CHENG, H.; WANG, G.; YU, Z.; SHI, S. Q. Tensile properties of bamboo in different sizes. **Journal of wood science**, v. 61, p. 552–561, 2015.
- CHEN, X.; CHENG, Y.; CHAN, A.; HOLLOWAY, D.; NOLAN, G. Anisotropic tensile characterisation of Eucalyptus nitens timber above its fibre saturation point, and its application. **Polymers**, v. 14, n. 12, p. 2390, 2022.
- CHEN, Z. **Behaviour of Typical Joints and the Structure of Yingxian Wood Pagoda**. 2011. 2011.
- CHEN, Z.; TUNG, D.; KARACABEYLI, E. **Modelling Guide for Timber Structures**. [s.l: s.n.]754 p.
- CHRISTOFORO, A. L.; ARROYO, F. N.; SOUSA, A. M. D. D.; MASCARENHAS, F. J. R.; PANZERA, T. H.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. M. P. G. Concrete Damaged Plasticity (CDP) adjustment parameters for the application in simulations of timber or wood composite structures. **Structures**, v. 73, p. 108334, 2025.
- CRESPO, J.; MAJANO-MAJANO, A.; LARA-BOCANEGRA, A. J.; GUAITA, M. Mechanical properties of small clear specimens of Eucalyptus globulus Labill. **Materials**, v. 13, n. 4, p. 906, 2020.
- DALMAGRO, H. J.; LOBO, F. de A.; ORTÍZ, C. E. R.; BIUDES, M. S.; NOGUEIRA, J. de S.; VOURLITIS, G. L.; JUNIOR, O. B. P. Trocas Gasosas de uma Espécie Lenhosa na Floresta de Transição Amazônia - Cerrado. **Ciência e Natura**, v. 33, n. 2, p. 147–165, 18 dez. 2011.
- DE LA CRUZ, M.; LOPEZ, L.; DE JESUS, R.; GARCIANO, L. Assessment of Testing Protocols for Bamboo for Tension Parallel to Fiber. **GEOMATE Journal**, v. 19, n. 74, p. 31–36, 2020.
- DE ARAUJO, V.; VASCONCELOS, J.; BARBOSA, J.; MORALES, E.; CHRISTOFORO, A.L.; GAVA, M.; ROCCO LAHR, F.; GARCIA, J. Wood Consumption and Fixations of Carbon Dioxide and Carbon from Timber Housing Techniques: A Brazilian Panorama. **Energy and Buildings**. 216. 109960. 10.1016/j.enbuild.2020.109960, 2020.
- DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia forestalis**, v. 65, n. 2, p. 102–113, 2004.

ETALE, A.; ONYIANTA, A. J.; TURNER, S. R.; EICHHORN, S. J. Cellulose: A Review of Water Interactions, Applications in Composites, and Water Treatment. **Chemical Reviews**, v. 123, n. 5, p. 2016–2048, 8 mar. 2023.

EUROCODE 5. **EN 1995-1-1: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings**. [s.l.] European Committee for Standardization - CEN, 1995. .

FERRO, F. S.; ICIMOTO, F. H.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA NA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA MADEIRA NA COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS (EC₀). **Revista Árvore**, v. 39, p. 743–749, 2015.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. de. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, v. 9, p. 157–174, 2009.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook—Wood as an engineering material**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 463 p.

GAŠPARÍK, M.; GAFF, M.; BABIAK, M. Tension stress simulations of layered wood using a finite element method. **Wood research**, v. 62, n. 4, p. 517–528, 2017.

GHARIB, M.; HASSANIEH, A.; VALIPOUR, H.; BRADFORD, M. A. Three-dimensional constitutive modelling of arbitrarily orientated timber based on continuum damage mechanics. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 135, p. 79–90, 1 nov. 2017.

GOST 16483. **MÉTODO PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO AO LONGO DAS FIBRAS**. Moscow: MEGANORM, 1973. . Disponível em: <<https://meganorm.ru/search.htm?searchid=2522769&text=16483.23&web=0>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

HILL, R. **The Mathematical Theory of Plasticity**. [s.l.] Clarendon Press, 1998. 370 p.

ISO 13061-6. **ISO 13061-6:2014 - Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 6: Determination of ultimate tensile stress parallel to grain**. Geneva: International Organization for Standardization - ISO, 2014. . Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/60068.html>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

JOLY, A. B. **Botânica: Introdução à taxonomia vegetal**. 5. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1979. 777 p.

KARWAT, Z.; KOCZAN, G.; REBKOWSKI, B.; KOZAKIEWICZ, P. Comparison beech wood tension strength parallel to grain of cylindrical samples with conical and funnel tapering versus standard rectangular cross section samples. **Drewno. Prace Naukowe. Doniesienia. Komunikaty**, v. 65, n. 209, 2022.

KLOCK, U.; DE ANDRADE, A. S. Química da Madeira. [s.d.]

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ JUNIOR, Wilfred. A. **Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood**. 1. ed. reprint, New York: Springer-Verlag, 1984.

KOLLMANN, F. F. P.; COTE, W. A., Jr. **Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood**. New York: Springer-Verlag, 1968. v. 1

KUNIYOSHI, J. R. G.; AGUIAR, F. da S.; ROCHA, C. É. R.; SOUZA, C. G. F. de; CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA FILHO, F. M. de; LAHR, F. A. R. Relações entre os módulos de elasticidade à compressão, tração e flexão para madeiras tropicais. **Ambiente Construído**, v. 24, p. e137617, 2024.

LEPAGE, E. S. **Manual de preservação de madeiras**. 2. ed. São Paulo: IPT, 1986. 708 p.

LISBOA, P. L. B. A anatomia da madeira. *Em: A anatomia da madeira*. [s.l.] Ciência Hoje, 1991. p. 44–51.

MACKERLE, J. Finite Element Analyses in Wood Research: A Bibliography. **Wood Science and Technology**, v. 39, n. 7, p. 579–600, 1 out. 2005.

MARENCO, R. A.; ANTEZANA-VERA, S. A.; GOUVÊA, P. R. dos S.; CAMARGO, M. A. B.; OLIVEIRA, M. F. de; SANTOS, J. K. da S. Fisiologia de espécies florestais da Amazônia: fotossíntese, respiração e relações hídricas. **Revista Ceres**, v. 61, p. 786–799, 2014.

MASCIA, N. T.; LAHR, F. A. R. Remarks on Orthotropic Elastic Models Applied to Wood. **Materials Research**, v. 9, p. 301–310, 2006.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Reforço e recuperação de estruturas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 27, n. 2, p. 163–174, 15 dez. 2006.

MOLINA, J. C.; JUNIOR, C. C. Sistema construtivo em “wood frame” para casas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 31, n. 2, p. 143–156, 15 dez. 2010.

NAHUZ, M. A. R. **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil**. [s.l.] Ipt, 2013.

NUKALA, S. G.; KONG, I.; KAKARLA, A. B.; PATEL, V. I.; ABUEL-NAGA, H. Simulation of Wood Polymer Composites with Finite Element Analysis. **Polymers**, v. 15, n. 9, p. 1977, jan. 2023.

OLIVEIRA, J. G. L. de; OLIVEIRA, J. T. da S.; ABAD, J. I. M.; SILVA, A. G. da; FIEDLER, N. C.; VIDAURE, G. B. Parâmetros quantitativos da anatomia da madeira de eucalipto que cresceu em diferentes locais. **Revista Árvore**, v. 36, p. 559–567, 2012.

PAIVA FILHO, J. C. de; ALMEIDA, L. A.; CASTRO, V. G. de; DIODATO, M. A. Diagnóstico do uso da madeira como material de construção no município de Mossoró-RN/Brasil. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, p. e12179, 2018.

- PALHARES, D.; FRANCO, A. C.; ZAIDAN, L. B. P. Respostas fotossintéticas de plantas do cerrado nas estações seca e chuvosa. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 8, n. 2, 24 jun. 2010. Disponível em: <<https://seer.ufrgs.br/index.php/rbrasbioci/article/view/114930>>. Acesso em: 6 out. 2025.
- PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1970.
- ROCHA, J. S. **A segurança de estruturas de madeira determinada a partir da variabilidade da densidade básica e de propriedades mecânicas de madeiras amazônicas**. 1994. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) - Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, 1994.
- ROY, H.; PAHLEVANI, F.; CHOLAKE, S.; ECHEVERRIA, C.; BANERJEE, A.; SAHAJWALLA, V. Simulation of Marine Bio-Composite Using Empirical Data Combined with Finite Element Technique. **Journal of Composites Science**, v. 2, n. 3, p. 48, set. 2018.
- SIAU, J. F. **Transport processes in wood**. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 245 p.
- STEEGE, H. T.; VAESSEN, R. W.; CÁRDENAS-LÓPEZ, D.; SABATIER, D.; ANTONELLI, A.; DE OLIVEIRA, S. M.; PITMAN, N. C. A.; JØRGENSEN, P. M.; SALOMÃO, R. P. The discovery of the Amazonian tree flora with an updated checklist of all known tree taxa. **Scientific Reports** **2016 6:1**, v. 6, n. 1, p. 1–15, 13 jul. 2016.
- SWEDISH FOREST INDUSTRIES FEDERATION. **Design of timber structures - Structural aspects of timber construction**. Stockholm: Swedish Forest Industries Federation, 2022. v. 1
- VIDAL, J. M.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. de C.; JANKOWSKY, I. P. Preservação de madeiras no Brasil: histórico, cenário atual e tendências. **Ciência Florestal**, v. 25, p. 257–271, 2015.
- VIDAURRE, G.; LOMBARDI, L. R.; TARCÍSIO, J.; OLIVEIRA, S.; DONÁRIA, M.; ARANTES, C. Lenho Juvenil e Adulto e as Propriedades da Madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 469–480, 22 set. 2023.
- WANGAARD, F. F. **The Mechanical Properties of Wood**. [s.l.] Wiley, 1950. 400 p.
- WHITE, M. S. **Wood identification handbook: commercial woods of the United States**. New York: Scribner, 1980. 80 p.
- YOUNGS, R. L. Forests and forest plants. *Em*: **History, Nature, and Products of wood**. [s.l.] EOLSS Publications, 2009.
- ZHANG, L.; CHEN, K.; XU, B.; LIU, Y.; GUO, K. Parallel-to-Grain Compressive and Tensile Behavior of Paulownia Wood at Elevated Temperatures. **Applied Sciences**, v. 12, n. 23, p. 12118, 2022.

ANEXOS

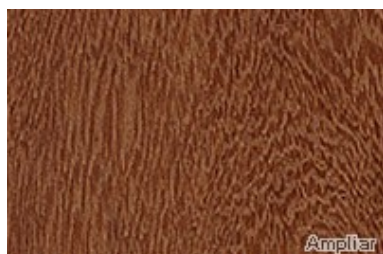
A. CARACTERÍSTICAS DAS ESPÉCIES ESTUDADAS

Com base na tabela A1 da ABNT foram selecionadas 4 espécies distintas, com disponibilidade nas madeireiras existentes em São Carlos e região.

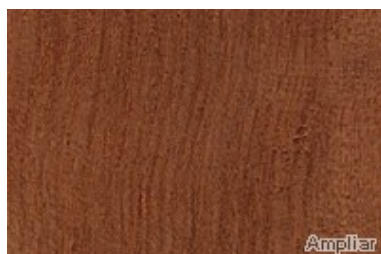
Classe de Resistência	Nome Popular	Nome científico
D20	Cambará Rosa	<i>Erisma uncinatum</i>
D40	Cupiúba	<i>Goupia glabra</i>
D50	Angelim Pedra	<i>Hymenolobium paetrum</i>
D60	Tatajuba	<i>Bagassa guianensis</i>

A seguir são apresentadas informações inerentes a cada espécie.

❖ Cambará Rosa



Face Tangencial



Face Radial



Fotomicrografia (10x)

Outros nomes populares: cedrinho, bruteiro, cachimbo-de-jabuti, cambará, cedrilho, jaboti, jaboti-da-terra-firme, quaruba-vermelha, quarubarana, quarubatinga, verga-de-jabuti.

Nomes internacionais: jaboty (ATIBT,1982), kwanie (Guiana).

Ocorrência:

Brasil: Amazônia, Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia.

Outros países: Guiana, Guiana Francesa, Suriname, Venezuela.

Características sensoriais: cerne e alburno distintos pela cor, cerne castanho avermelhado; sem brilho; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade baixa; grã direita a revessa; textura média a grossa.

Informações gerais:

Parênquima axial: visível a olho nu, em faixas largas e longas, tangenciando os vasos.

Raios: visíveis apenas sob lente no topo e na face tangencial, finos; poucos.

Vasos: visíveis a olho nu, médios a grandes; muito poucos a poucos; porosidade difusa; solitários e múltiplos de dois a três; obstruídos por tilos.

Camadas de crescimento: indistintas.

Floema incluso: presente nas faixas do parênquima.

Durabilidade natural: a Madeira de cambará rosa apresenta baixa durabilidade ao ataque de organismos xilófagos (fungos e insetos).

Tratabilidade: o cerne e o alburno são moderadamente fáceis de preservar em processos sob pressão.

Trabalhabilidade: a Madeira de cambará rosa é fácil de aplainar, serrar e lixar, mas apresenta superfície de acabamento ruim (felpuda).

Secagem: a secagem ao ar é fácil e sem a ocorrência significativa de defeitos. A secagem em estufa também é rápida, mas em condições muito drásticas podem ocorrer empenamentos, rachaduras e endurecimento superficial.

Usos

Construção civil:

Leve em esquadrias: portas, venezianas e caixilhos.

Leve interna, estrutural: ripas.

Leve interna, utilidade geral: lambris, molduras, guarnições, forros.

Uso temporário: andaimes, fôrmas para concreto, pontaletes.

Mobiliário:

Utilidade geral: móveis estandar, partes internas de móveis inclusive daqueles decorativos.

Outros usos: lâminas decorativas, chapas compensadas, embalagens.

❖ Cupiúba



Face Tangencial

Face Radial

Fotomicrografia (10x)

Outros nomes populares: cachaceiro, copiúba, copiúva, cupiúba-rosa, peniqueiro, peroba-do-norte, peroba-fedida, vinagreiro.

Nomes internacionais: cabacalli, copie, couepi, goupi (ATIBT,1982), goupil, kabikalli (Suriname), kaboekallii, kabukalli, koepi, koepie (Guiana; Guiana Francesa), kopi, pilon (Venezuela).

Ocorrência:

Brasil: Amazônia, Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia.

Outros países: Colômbia, Guiana, Guiana Francesa, Peru, Suriname, Venezuela.

Características sensoriais: cerne e alburno indistintos pela cor, castanho-avermelhado; superfície sem brilho; cheiro perceptível, desagradável, gosto imperceptível; densidade alta; grã irregular; textura média.

Informações gerais:

Parênquima axial: visível apenas sob lente, apotraqueal difuso em agregados.

Raios: visíveis apenas sob lente no topo e na face tangencial, finos, poucos a numerosos.

Vasos: visíveis a olho nu, médios, poucos, porosidade difusa; solitários; obstruídos por óleo-resina.

Camadas de crescimento: indistintas.

Durabilidade natural: em ensaios de laboratório a madeira de cupiúba demonstrou ter alta resistência ao ataque de organismos xilófagos (fungos e cupins). Apresenta resistência a fungos apodrecedores (podridão branca e parda) e cupins-de-madeira-seca, entretanto não é resistente aos xilófagos marinhos. Estudo realizado pela (SUDAM/IPT,1981) verificou que a durabilidade desta madeira é superior a 12 anos de serviço em contato com o solo.

Tratabilidade: o cerne e o alburno apresentam moderada permeabilidade às soluções preservativas tanto oleossolúvel (creosoto) como hidrossolúvel (CCA). A retenção de

preservativo oleossolúvel é de 200 kg/m³ a 300 kg/m³. Já (Brito Neto et al.,1984) reconheceram o cerne de cupiúba como de baixa permeabilidade ao tratamento com óleo creosoto.

Trabalhabilidade: a madeira de cupiúba é fácil de trabalhar com ferramentas manuais ou com máquinas. É fácil de serrar, aplainar, torneiar, colar e parafusar. O uso de pregos sem furação pode provocar rachaduras. Recebe bom acabamento. (Jankowsky,1990) Aceita bem a colagem mas não é adequada para a fabricação de compensados, por apresentar rachaduras na tora. Boa aceitação de tinta, verniz, emassamento e polimento. (IBAMA,1997a)

Secagem: a secagem ao ar é lenta, sem a ocorrência de sérios defeitos como rachaduras ou empenamentos. Na secagem em estufa apresenta ligeira incidência de defeitos.

Usos

Construção civil:

Pesada externa: postes, pontes, mourões, cruzetas, esteios, escoras.

Pesada interna: vigas, caibros.

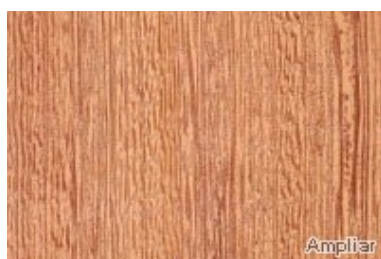
Leve interna, estrutural: ripas, partes secundárias de estruturas.

Outros usos: cabos de ferramentas, transporte, embarcações, embalagens.

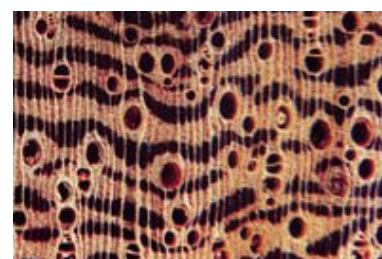
❖ **Angelim Pedra**



Face Tangencial



Face Radial



Fotomicrografia (10x)

Outros nomes populares: angelim, angelim-amarelo, angelim-da-mata, angelim-do-pará, angelim-macho, mirarema.

Nomes internacionais: angelim-pedra (Espanha; Estados Unidos; França; Grã Bretanha; Itália), erejoerde, lialiadan koleroe, saandoe (Suriname), sapupira amarela (ATIBT,1982), St. Martin Gris (Guiana Francesa).

Ocorrência:

Brasil: Amazônia, Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia.

Outros países: Guiana, Guiana Francesa, Suriname.

Características sensoriais: cerne e alborno distintos pela cor, cerne castanho-avermelhado claro ou escuro, com manchas castanhas mais escuras devido à exudação de óleo-resina, alborno castanho-pálido; brilho ausente; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade média; dura ao corte; grã direita a revessa; textura grossa, aspecto fibroso.

Informações gerais:

Parênquima axial: visível a olho nu, paratraqueal aliforme, confluyente em trechos longos tendendo a formar faixas largas.

Raios: visíveis a olho nu no topo e na face tangencial na qual sua estratificação (2 a 3 por mm) é regular; finos.

Vasos: visíveis a olho nu, médios a grandes; poucos; porosidade difusa; solitários, múltiplos, às vezes em cadeias radiais; vazios ou com substância esbranquiçada.

Camadas de crescimento: distintas, individualizadas por zonas fibrosas tangenciais mais escuras.

Durabilidade natural: Madeira durável a muito durável em relação a fungos apodrecedores; moderadamente resistente a brocas marinhas e resistente a cupins-de-madeira-seca.

Tratabilidade: o cerne é difícil de preservar e o alborno é muito fácil de preservar, em processo sob pressão, tanto com creosoto (oleossolúvel) como CCA (hidrossolúvel).

Trabalhabilidade: a madeira de angelim-pedra é fácil de ser trabalhada. Acabamento de regular a bom na plaina, torno e broca. É moderadamente fácil de serrar e aplainar; é fácil de pregar, parafusar e permite acabamento satisfatório.

Secagem: a secagem é muito rápida em estufa, apresentando pequena tendência a torcimento e arqueamento. A secagem ao ar livre é moderadamente difícil.

Usos

Construção civil:

Pesada interna: vigas, caibros.

Leve em esquadrias: portas, venezianas e caixilhos.

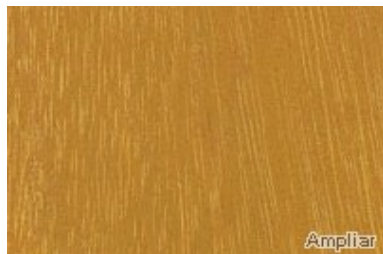
Leve interna, decorativa: forros e lambris.

Leve interna, estrutural: partes secundárias de estruturas e ripas.

Uso temporário: pontaletes, andaimes e fôrmas para concreto.

Mobiliário: utilidade geral, móveis estandar, cabos para cutelaria e lâminas decorativas.

❖ **Tatajuba**



Face Tangencial



Face Radial



Fotomicrografia (10x)

Outros nomes populares: amaparirana, amarelão, amarelo, bagaceira, cachaceiro, garrote.

Nomes internacionais: bagasse (ATIBT,1982), tatajuba (BSI,1991).

Ocorrência:

Brasil: Amazônia, Acre, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia.

Outros países: Guiana, Guiana Francesa, Suriname.

Características sensoriais: cerne e albarno distintos pela cor; cerne amarelado, escurecendo para castanho-amarelado; brilho moderado; cheiro e gosto imperceptíveis; densidade média; moderadamente dura ao corte; grã revessa; textura média.

Informações gerais:

Parênquima axial: invisível mesmo sob lente.

Raios: visíveis a olho nu no topo, na face tangencial é visível apenas sob lente.

Vasos: visíveis a olho nu, médios a grandes; muito poucos a poucos; porosidade difusa; solitários em predominância e múltiplos de 2 a 4; obstruídos por tilos.

Camadas de crescimento: ligeiramente distintas, individualizadas por zonas fibrosas tangenciais mais escuras.

Durabilidade natural: O cerne é resistente ao ataque de fungos de podridão-branca e parda. A Madeira de tatajuba, em ensaios de campo realizados pela EMBRAPA, na Amazônia, demonstrou ter durabilidade natural superior a sete anos. Considerada moderadamente resistente ao ataque de perfuradores marinhos e, em contato com o solo, pode apresentar vida útil superior a 25 anos.

Tratabilidade: A Madeira de tatajuba é difícil de ser tratada com soluções preservantes, mesmo em processo sob pressão. Apresenta baixa permeabilidade às soluções preservantes de creosoto (oleossolúvel), mesmo em processo sob pressão.

Trabalhabilidade: A Madeira de tatajuba é fácil de ser trabalhada, com ferramentas manuais ou mecânicas, produzindo ótimo acabamento. Não aceita pregos com facilidade. Recomenda-se a furação prévia à colocação de pregos.

Secagem: A secagem ao ar é lenta sem a ocorrência de defeitos. Na secagem em estufa apresenta leve tendência ao empenamento, torcimento e encanoamento. Recomenda-se controle cuidadoso do processo para evitar defeitos.

Usos

Construção civil:

Pesada externa: dormentes ferroviários, cruzetas, estacas e defensas.

Pesada interna: tesouras, vigas e caibros.

Leve em esquadrias: batentes e janelas.

Leve interna, decorativa: painéis, lambris e forros.

Assoalhos: tábuas, tacos e parquetes.

Mobiliário: móveis decorativos, lâminas decorativas, decoração e adorno, peças torneadas, embarcações e cabos de ferramentas.

APÊNDICE

A. Desenho com vistas para confecção dos corpos de prova

