

Quantificação da influência da umidade em propriedades de resistência e de rigidez da classe D60 da NBR7190:2022 –1 Projeto de Estruturas de Madeira

José Antonio Teodoro Borsato

Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

JOSÉ ANTONIO TEODORO BORSATO

Quantificação da influência da umidade em propriedades de resistência e de rigidez da classe D60 da NBR7190:2022 – 1 Projeto de Estruturas de Madeira

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr

Coorientador: Prof. Dr. André Luis Christoforo

SÃO CARLOS

2025

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B2025q Borsato, Jose Antonio Teodoro
Quantificação da influência da umidade em
propriedades de resistência e de rigidez da classe D60
da NBR7190:2022 - 1 Projeto de Estruturas de Madeira /
Jose Antonio Teodoro Borsato; orientador Francisco
Antonio Rocco Lahr; coorientador André Luis
Christoforo. São Carlos, 2025.

Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de
Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2025.

1. Madeira. 2. Propriedades mecânicas. 3.
Influência do teor de umidade. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **JOSÉ ANTONIO TEODORO BORSATO**.

Título da dissertação: "Quantificação da influência da umidade em propriedades de resistência e de rigidez da classe D60 da NBR7190:2022 –1 Projeto de Estruturas de Madeira".

Data da defesa: 28/04/2025.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Titular Francisco Antonio Rocco Lahr
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovado

Prof. Dr. André Luiz Zangiacomo
(Universidade Federal de Lavras/UFLA)

Aprovado

Prof. Dr. Eduardo Chahud
(Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG)

Aprovado

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria e Vanderlei, e a minha irmã Ana Carolina por todo carinho, amor e apoio durante todos estes anos.

Ao professor Francisco Antonio Rocco Lahr, pela orientação, pela confiança, dedicação, ajuda, ensinamentos e amizade.

Ao professor André Luis Christoforo, pela amizade, por toda a essencial colaboração durante todo o mestrado e por toda orientação na parte de planejamento e análise estatística.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGSET) pelo espaço e oportunidade no aprendizado próprio e poder contribuir na construção de novos conhecimentos.

RESUMO

BORSATO, José A. T. **Quantificação da influência da umidade em propriedades de resistência e de rigidez da classe D60 da NBR7190:2022 – 1 Projeto de Estruturas de Madeira**. 2025. Dissertação (Mestrado em Ciências - Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

A madeira é um material tradicional da construção civil, empregado desde tempos imemoriais e que vem ganhando, em nosso país, novo destaque – graças a processos de preservação contra efeitos bióticos – no desenvolvimento de produtos engenheirados, ao aspecto de ser renovável, ecológica e economicamente viável, além de dispor de texto normativo de alta qualidade, a NBR7190:2022-1 – Projeto de Estruturas de Madeira, muito reconhecida pelos integrantes desta área do conhecimento. Entretanto, alguns tópicos ainda não foram atualizados pela mencionada versão. É o caso da influência da umidade nas propriedades de resistência e de rigidez do material. Esta influência é de grande relevância, considerando-se que o item 5.5 da citada norma estabelece quatro classes de umidade para o dimensionamento de elementos estruturais, de acordo com as condições de temperatura e umidade relativa do ar no local em que a estrutura é construída. No item 5.6 constam duas expressões para corrigir as propriedades apontadas, para cada classe de umidade considerada. Trabalhos anteriores evidenciaram discrepâncias significativas entre os resultados experimentais obtidos para as espécies tropicais nativas e aqueles estimados pelas expressões do item 5.6. São casos em que estão sendo superestimadas as propriedades, principalmente para os lotes de madeira enquadrados nas classes de resistência mais elevadas como D40, D50 e D60, também prescritas pela NBR7190:2022-1. O presente trabalho tratou de estabelecer os ajustes necessários para as expressões do item 5.6, de modo a que as mesmas representem, de modo mais confiável, a realidade do fenômeno físico “influência da umidade em propriedades mecânicas da madeira”. Para tal foram ensaiados (atendendo às recomendações da NBR7190-3; Métodos em ensaio para corpos de prova isentos de defeitos – madeiras tropicais) cinco lotes da classe D60, de doze corpos de prova por lote. Concluiu-se que as equações da NBR7190:2022-1 apresentam resultados superiores aos observados na experimentação, indício da necessidade de revisão da normativa.

Palavras-chave: Madeira. Propriedades mecânicas. Influência do teor de umidade.

ABSTRACT

BORSATO, José A. T. **Quantifying the influence of moisture on the strength and stiffness properties of class D60 of NBR7190:2022-1 – Design of Timber Structures.** 2025. Dissertation (M. Sc. in Civil Engineering (Structural Engineering)) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2025.

Wood is a traditional building material that has been used since long time ago and which has gained new prominence in our country - thanks to preservation processes against biotic effects - in the development of engineered products, due to the fact that it is renewable, ecologically and economically viable, as well as having a high-quality normative text, NBR7190:2022-1 - Design of Timber Structures, which is highly recognized by members of this field of knowledge. However, some topics have not yet been updated by this version. This is the case with the influence of moisture on the material's strength and stiffness properties. This influence is of great importance, considering that item 5.5 of the aforementioned standard establishes four moisture classes for the design of structural elements, according to the temperature and relative moisture conditions in the place where the structure is built. Item 5.6 contains two expressions to correct the properties indicated for each moisture class considered. Previous work has shown significant discrepancies between the experimental results obtained for native tropical species and those estimated by the expressions in item 5.6. These are cases in which properties are being overestimated, especially for batches of wood in the higher resistance classes such as D40, D50 and D60, which are also prescribed by NBR7190:2022-1. This study set out to make the necessary adjustments to the expressions in item 5.6, so that they more reliably represent the reality of the physical phenomenon “influence of moisture on the mechanical properties of wood”. To this end, five batches of class D60 were tested (in accordance with the recommendations of NBR7190-3; Methods for testing specimens free of defects - tropical woods), with twelve specimens per batch. It was concluded that the equations in NBR7190:2022-1 show higher results than those observed in the experiment, indicating the need for a revision of the regulations.

Keywords: Wood. Mechanical properties. Influence of moisture content.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Aspectos moleculares das microfibrilas	22
Figura 2: Esquema anatômico das coníferas	23
Figura 3: Esquema anatômico das dicotiledôneas	23
Figura 4: Relações entre propriedades de compressão paralela às fibras e o teor de umidade em corpos de prova de “Douglas-Fir”	25
Figura 5: Fluxograma para determinação caracterização das propriedades mecânicas da madeira	27
Figura 6: Peças de madeira utilizadas para confecção dos corpos de prova	32
Figura 7: Corpos de prova para ensaios de tração paralela às fibras.	54
Figura 8: Diagrama de carregamento para determinação da rigidez da madeira	55
Figura 9: Corpo de prova para tração perpendicular às fibras	56
Figura 10: Corpo de prova para cisalhamento na direção paralela às fibras	56
Figura 11: Arranjo de ensaio para cisalhamento paralelo às fibras (dimensões em mm)	57
Figura 12: Arranjo de ensaio para cisalhamento paralelo às fibras (dimensões em mm)	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classes de umidade	26
Tabela 2: Classes de resistência de lotes de madeira oriundos de florestas nativas	28
Tabela 3: Resultados dos ensaios do <i>Hymenolobium petraeum</i> Ducke (Angelim Vermelho)	36
Tabela 3: Resultados dos ensaios do <i>Hymenolobium petraeum</i> Ducke (Angelim Vermelho) (cont.)	37
Tabela 4: Resultados dos ensaios do <i>Dinizia excelsa</i> Ducke (Angelim Ferro)	38
Tabela 4: Resultados dos ensaios do <i>Dinizia excelsa</i> Ducke (Angelim Ferro) (cont.)	39
Tabela 5: Resultados dos ensaios do <i>Goupia glabra</i> (Cupiúba)	40
Tabela 5: Resultados dos ensaios do <i>Goupia glabra</i> (Cupiúba) (cont.)	41
Tabela 6: Resultados dos ensaios do <i>Hymenaea stilbocarpa</i> (Jatobá)	42
Tabela 6: Resultados dos ensaios do <i>Hymenaea stilbocarpa</i> (Jatobá) (cont.)	43
Tabela 7: Resultados dos ensaios do <i>Manilkara</i> sp (Maçaranduba)	44
Tabela 7: Resultados dos ensaios do <i>Manilkara</i> sp (Maçaranduba) (cont.)	45
Tabela 8: Valores inferiores para “k” após análises estatísticas	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	17
2 OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo geral	19
2.2 Objetivos específicos	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 Classificação e fisiologia	21
3.2 Propriedades	24
3.3 Síntese bibliográfica sobre o tema	28
3.4 Considerações finais sobre a revisão bibliográfica	29
4 MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1 Materiais e ensaios realizados	31
4.2 Análise estatística	32
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
5 CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS	49
APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS	53

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

“A madeira é um dos materiais mais antigos usados na construção, possuindo enormes potencialidades na construção civil/rural” (Paula *et al.*, 2014). Posição análoga são apresentadas por diversos outros pesquisadores da área, como Pereira e Calil Jr (2019), Ramage *et al.* (2017), entre outros. É material renovável, com excelente isolamento térmico, apresenta elevada relação entre resistência e peso (vantajosa qualidade para elementos estruturais), boa resistência ao fogo, principalmente em situações de exposição severa, baixo consumo energético de produção em comparação aos demais produtos usualmente aplicados em estruturas, retira e retém dióxido de carbono da atmosfera, contribuindo para a redução do efeito estufa, tem fácil trabalhabilidade e beleza (Almeida, 2019; Yi *et al.*, 2021; Chu *et al.*, 2025).

Somam-se a isso os tratamentos preservativos químicos para prevenir/retardar o ataque de agentes biológicos, os quais contribuem eficientemente para aumentar a durabilidade, a possibilidade de usos de produtos engenheirados de madeira, como madeira lamelada colada, que proporcionam novas possibilidades de formas e dimensões, por atender às questões ambientais, por ser renovável e depender de pouca energia de produção, e por sua questão estética, equilibrando o mundo artificial com o natural, conforme atestam Pletz (2003) e Gomes *et al.* (2023) entre outros. Estes aspectos reforça que a madeira é um material muito interessante e sustentável para variados usos na atualidade, principalmente estruturais.

Entre os parâmetros que apresentam maior influência nas propriedades da madeira destaca-se a umidade relativa do ambiente no qual se encontra a estrutura. A madeira é um material de origem orgânica e, portanto, possui elementos higroscópicos em sua composição celular. Como é observado por Logsdon (1998), por Soares *et al.* (2021) e por Batista *et al.* (2023), os valores de resistência e do teor de umidade exibem relação inversa, para porcentagens de umidade inferiores ao ponto de saturação das fibras, fixado convencionalmente pela NBR7190:2022-1 em 25% para madeiras tropicais nativas. A presença de água nos componentes celulares diminui o atrito entre esses elementos, o que reduz a resistência às solicitações mecânicas, nas mencionadas condições de umidade (Arroyo *et al.*, 2023).

A norma NBR7190:2022-1 considera por padrão situações em que a umidade relativa do ar se mantenha em até 65% por longos períodos ao longo do ano (valor de referência), o que, por consequência, leva a um teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12%, nas condições usuais de temperatura. As equações para correção dos valores das resistências e das rigidezes, para porcentagens de umidade entre 10% e o ponto de saturação das fibras (25%) constam do item 5.6.1 da mencionada norma (Equações 1 e 2).

$$F_{12} = f_{U\%} \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (1)$$

$$E_{12} = E_{U\%} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (2)$$

Sendo:

- F_{12} , E_{12} : resistência e módulo de elasticidade, respectivamente, a uma determinada solicitação, com 12% de teor de umidade;
- $F_{U\%}$, $E_{U\%}$: resistência e módulo de elasticidade, respectivamente, a uma determinada solicitação, com um teor de umidade de $U\%$.

Entretanto, esta correção é admitida válida para todas as classes de resistência das madeiras das dicotiledôneas, bem como para todas as propriedades cujo conhecimento é necessário para se desenvolverem projetos estruturais. Este tópico vem sendo questionado por projetistas de estruturas de madeira, indicando a urgente necessidade de serem desenvolvidos trabalhos que confirmem ou levem a ajustes das expressões mencionadas, uma vez que artigos já publicados a respeito do tema corroboram com esta necessidade, como os de Nogueira *et al.* (2018), Soares *et al.* (2021), Ruthes *et al.* (2022), Moura *et al.* (2022) e Aquino *et al.* (2022), entre outros.

Neste contexto, o presente trabalho busca comprovar, dada sua importância para o dimensionamento estrutural, se tais equações de correção apresentam valores adequados para a classe D60, preconizada pela NBR7190:2022-1 e, sendo o caso, propor as devidas correções, tendo em vista garantir a segurança e a confiabilidade do desenvolvimento dos projetos de estruturas de madeira.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo principal é avaliar a validade das expressões preconizadas pela NBR7190:2022-1 para estimar as variações dos parâmetros de resistência e rigidez de espécies de dicotiledôneas da classe D60 e, sendo o caso, propor os ajustes necessários para as expressões do item 5.6 (da referida norma) de modo a que elas representem, de modo mais confiável, a realidade do fenômeno físico abrangido pelo estudo, ou seja, a “influência da umidade em propriedades mecânicas da madeira”.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a mudança nas propriedades dos elementos estruturais, com a variação da umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, para comprovar a influência de tal variável nas propriedades mecânicas da madeira;
- Obter relações entre as propriedades mecânicas e o teor de umidade, a partir dos ensaios realizados em lotes de madeira da classe de resistência D60.
- Propor correções às equações de correção de parâmetros da NBR7190:2022-1, se preciso, para tornar os resultados mais factuais às situações empíricas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Classificação e fisiologia

Segundo Almeida (2019), “As árvores constituem as Fanerógamas, que são divididas em dois grupos: Gimnospermas e Angiospermas”. As primeiras são árvores aciculifoliadas ou com folhas escamosas, típicas de climas temperados e frios, compondo grandes florestas no hemisfério norte, mas tendo espécies no sul do Brasil, como a *Araucária angustifolia* (Pinheiro-do-Paraná). A classe mais importante das Gimnospermas são as Coníferas, também chamadas na literatura internacional de “softwoods”, com alto emprego não apenas na construção civil quanto em indústrias de diferentes segmentos (Arroyo *et al.*, 2023).

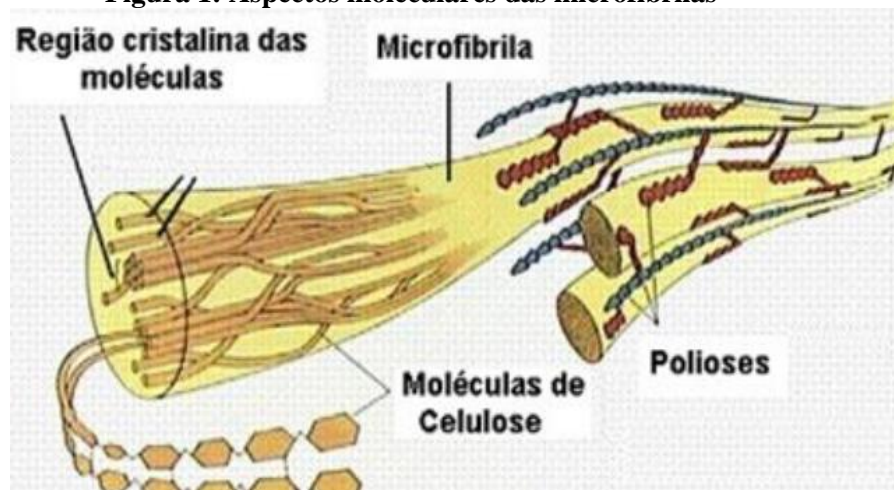
No que se refere às Angiospermas, vegetais mais organizados, as mesmas são divididas em monocotiledôneas, como o milho e a cana-de-açúcar, e as dicotiledôneas (“hardwoods”), como as milhares de espécies encontradas na Floresta Amazônica, conforme mencionam Rodrigues *et al.* (2023).

Em escala microscópica, a madeira é composta principalmente por três açúcares: celulose, hemicelulose (ou poliose) e lignina. A celulose é um polissacarídeo linear, fundamental na composição da parede celular da madeira, composta por uma longa cadeia sem ramificações, e caracterizada por regiões cristalinas entrecortadas por trechos amorfos, sendo essas pequenas partes consideradas como pontos de fragilidade para a resistência (Calil; Lahr; Dias, 2003). As hemiceluloses, ou polioses, segundo Duarte (2017, p. 48):

são polissacarídeos de menor massa molecular (quando comparados à celulose), apresentam ramificações e são constituídos de vários monômeros diferentes, destacando-se pentoses, hexoses, ácidos hexurônicos e desoxiheroses, além de grupos acetila e ácidos urônicos.

As polioses são os componentes mais higroscópicos das paredes celulares e atuam como um meio onde estão imersas as cadeias de celulose, interação esta que recebe o nome de microfibrila (Almeida, 2019). O esquema de uma microfibrila pode ser observado na Figura 1.

Figura 1: Aspectos moleculares das microfibrilas



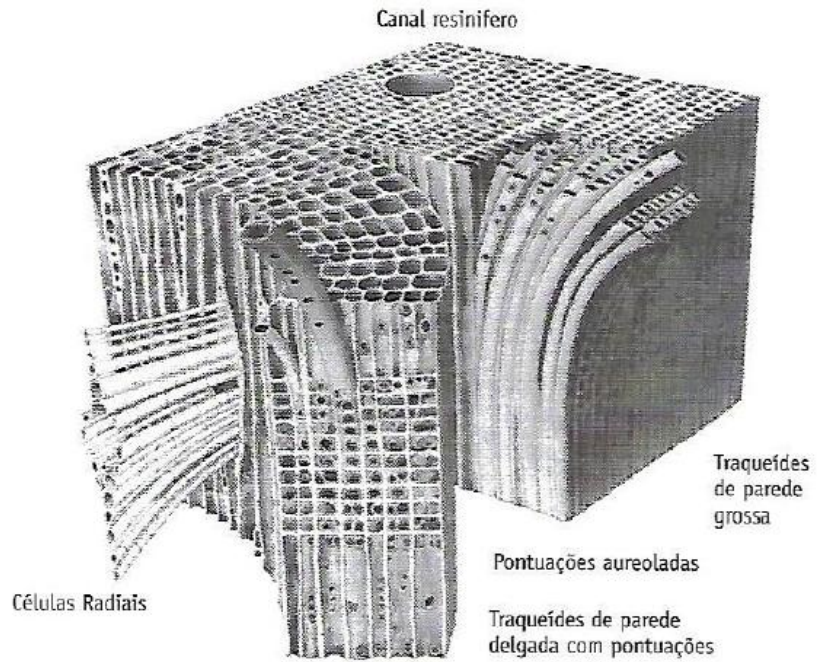
Fonte: Severiano (2010 *apud* Almeida, 2019)

Por fim, a lignina é um polímero tridimensional complexo, amorfo, responsável pela rigidez das paredes celulares e, por consequência, da resistência às solicitações mecânicas, e atua como defesa contra patógenos, insetos e herbívoros (Duarte, 2017).

Apesar de suas semelhanças microscópicas, coníferas e dicotiledôneas possuem diferenças fisiológicas. Nas coníferas observa-se duas formações básicas: traqueídes e raios medulares. As traqueídes, segundo Nogueira *et al.* (2023), são células alongadas de até 5 mm de comprimento e diâmetro de 60 μm , podendo constituir até 95% da madeira das coníferas e responsáveis pela condução da seiva bruta (no alburno), depósito de substâncias polimerizadas (no cerne) e conferir resistência mecânica. Já os raios são um conjunto de células alongadas e dispostas horizontalmente da casca até à medula, com a função de levar seiva da periferia até a medula. A Figura 2 apresenta um esquema anatômico das coníferas.

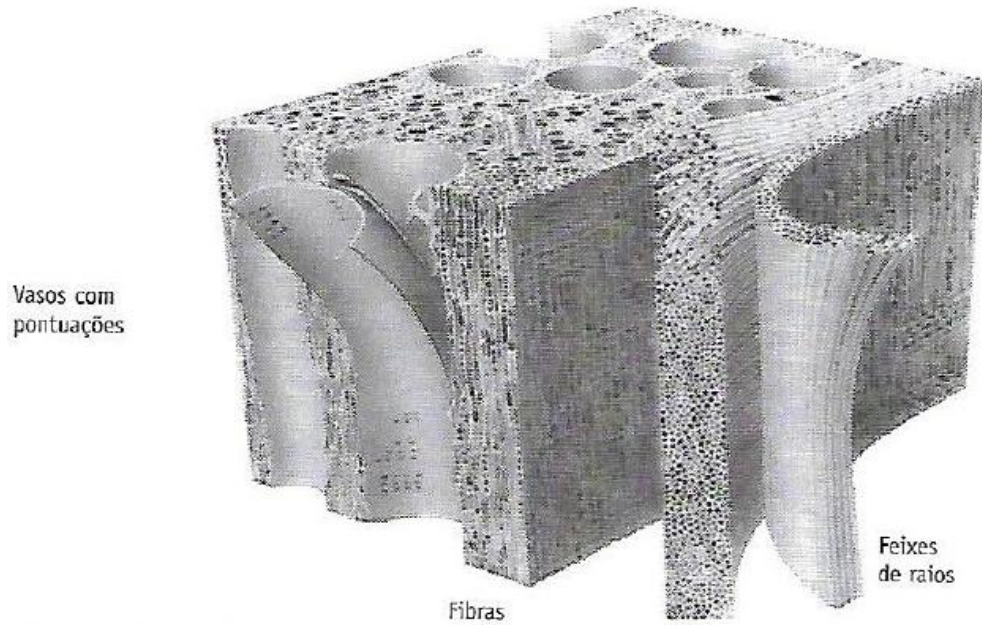
Nas dicotiledôneas observam-se três elementos básicos: os vasos, as fibras e os raios medulares. Os vasos são células de 1mm de comprimento e 300 μm de diâmetro, com seção transversal vasada e arredondada, com função de transporte de seiva bruta no alburno e depósito de substâncias no cerne. As fibras possuem até 1,5 mm de comprimento, seção vazada e arredondada, cuja função é prover resistência e rigidez mecânica à árvore. Por fim, os raios medulares das *hardwoods* têm as mesmas características e funções do que seu elemento homônimo das *softwoods* (Gonçalves, Lahr, 2020). Na Figura 3 observa-se um esquema microscópico das dicotiledôneas.

Figura 2: Esquema anatômico das coníferas



Fonte: Taylor (1978 *apud* Calil *et al.*, 2003)

Figura 3: Esquema anatômico das dicotiledôneas



Fonte: Taylor (1978 *apud* Calil *et al.*, 2003)

As moléculas de água circulam entre os elementos anatômicos citados na árvore viva e, uma vez cortada, sua saída, pelo processo de secagem, provoca variações nas propriedades mecânicas da madeira, em especial abaixo do ponto de saturação das fibras.

3.2 Propriedades

Segundo Almeida (2019, p. 30), “o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas das espécies é imprescindível para a correta utilização do material e atingir todo o seu potencial de aplicação”. As principais características a serem consideradas são: densidade, umidade, resistência e rigidez.

Em geral são consideradas densidades em duas situações distintas: a básica e a aparente. A primeira é obtida dividindo o valor da massa seca pelo volume saturado, sendo a massa seca determinada colocando corpos de prova em estufas a 103°C até que, em duas pesagens sucessivas, a massa destes atinja um valor constante. O volume saturado é atingido em corpos de prova submersos por tempo suficiente para atingir um peso constante. A densidade aparente é o quociente entre a massa do corpo de prova pelo seu volume, ambos no mesmo teor de umidade (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022).

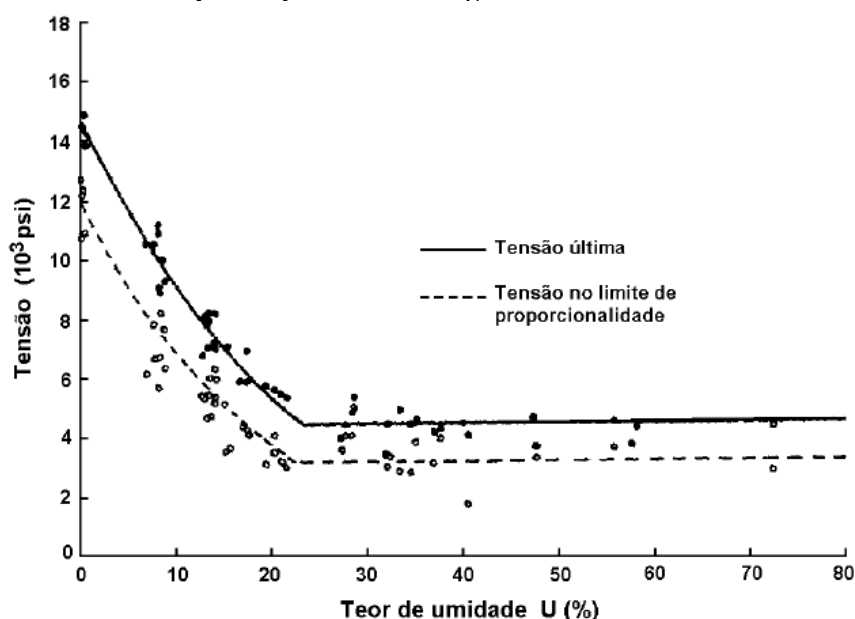
A umidade é um parâmetro que serve para “ajustar as propriedades de resistência e de rigidez da madeira em função das condições ambientais onde permanecerão as estruturas” (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022), assim como a escolha do método preservativo a ser utilizado. Do ponto de vista estrutural, destacam-se como relevantes dois momentos: quando a madeira perde umidade ao ambiente, restando apenas a umidade presente no interior da parede celular, e quando o elemento de madeira atinge um ponto de umidade de equilíbrio com o ambiente.

Estas situações são chamadas, respectivamente, de ponto de saturação (PS), compreendida em um intervalo entre 20% e 30%, e ponto de equilíbrio (PE), que depende da espécie, temperatura e umidade do ar do local onde se encontra o elemento de madeira (Calil; Lahr; Dias, 2003), entre outros. Tais autores expressam que a variação das propriedades mecânicas com a redução da umidade da madeira se deve a dois fatores:

- Até o PS as moléculas de águas evaporadas se referem às localizadas no lúmen das células (água livre), não afetando os parâmetros de resistência e rigidez;
- Abaixo do PS são evaporadas as moléculas de água contidas nas paredes dos elementos (água de impregnação) aspectos que induzem o incremento das propriedades.

Bodig e Jayne (1992 *apud* Logsdon, 1998), na Figura 4 a seguir, mostram que, para valores de teor de umidade até em torno de 25% há uma grande variação na resistência à compressão, mas acima deste ponto não. Este fato permite desconsiderar teores de umidade acima do ponto de saturação para explicar eventuais variações de resistência e rigidez da madeira. Deve ser lembrado que tais autores trabalharam com espécies das Coníferas, muito diferentes das Dicotiledôneas que compõem as Florestas Tropicais Nativas.

Figura 4: Relações entre propriedades de compressão paralela às fibras e o teor de umidade em corpos de prova de “Douglas-Fir”



Fonte: Bodig e Jayne (1992 *apud* Logsdon, 1998)

A NBR7190:2022-1 adota um valor de 25% para PS e 12% para PE, sendo o último valor justificável pois, como afirmado por Calil *et al* (2021), usualmente valores menores que 12% só podem ser atingidos em estufas e câmaras de vácuo. As diferentes classes de umidades consideradas por norma estão determinadas na Tabela 1, a seguir.

No item 5.6.1, a mesma norma apresenta equações para correção dos valores de resistência e de rigidez para valores de teor de umidade entre 10% e 25% (Equações 1 e 2), fora do valor padrão de classe 1 ($U=12\%$). Por fim, no item seguinte, é ressaltado que o efeito da temperatura nos elementos estruturais deve ser considerado se eles estiverem submetidos a longos períodos a uma faixa de temperatura acima de 60°C .

Tal recomendação é corroborada em Almeida *et al.* (2018), cujo trabalho atestou que houve mudança na resistência ao cisalhamento de peças de cobertura de edifícios sujeitas a longos ciclos de temperaturas acima de 60°C .

Tabela 1: Classes de umidade

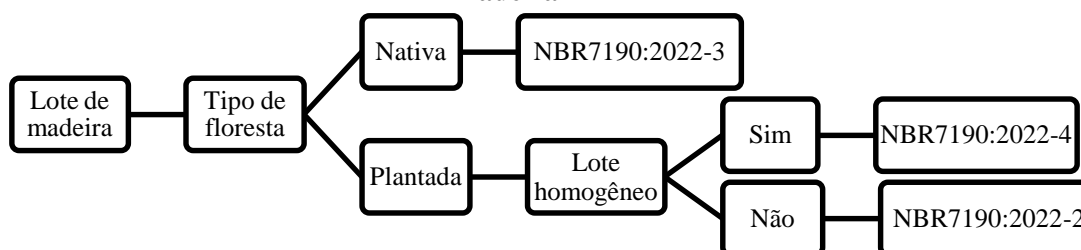
Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Umidade de equilíbrio da madeira U_{eq}
1	$U_{amb} \leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$	$\geq 25\%$

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022)

A rigidez determina o comportamento da madeira na fase elástico-linear, devendo ser conhecidos os valores nas direções paralelas e normais às fibras (Calil Junior *et al.*, 2006, p. 6). Os valores relevantes para dimensionamento estrutural em madeira são: módulo médio de elasticidade na direção paralela às fibras (E_m se obtido no ensaio de flexão em peças estruturais; $E_{c0,m}$, se obtido em ensaio de compressão paralela às fibras em corpos de prova isentos de defeitos) e na compressão normal às fibras ($E_{c90,m}$) e o módulo de elasticidade transversal (G_{med}).

Esses valores são determinados a partir dos ensaios descritos nas normas NBR7190:2022-2 a NBR7190:2022-4, a depender se são lotes de espécies nativas ou de plantio, homogêneos ou não (Figura 5).

Na falta de experimentação específica, pode-se considerar que o módulo de elasticidade transversal e o longitudinal normal às fibras sejam o resultado da divisão do módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras por, respectivamente, 20 e 16 (NBR7190:2022-1).

Figura 5: Fluxograma para determinação caracterização das propriedades mecânicas da madeira

Fonte: Adaptado da NBR7190:2022-1.

As propriedades mecânicas utilizadas para a caracterização completa de um lote/espécie de madeira constam da NBR7190:2022-3 e são discriminadas no capítulo de Metodologia deste trabalho. O enquadramento dos lotes numa determinada classe de resistência se dá por

intermédio do valor característico da resistência à flexão (em madeiras de florestas plantadas) ou da compressão paralela às fibras (madeiras nativas).

Na Tabela 2 estão mostradas as classes de resistência para lotes de espécies de florestas nativas, preconizadas pela NBR7190:2023-1.

Tabela 2: Classes de resistência de lotes de madeira oriundos de florestas nativas

Classes	f_{c0k} MPa	$f_{v0,k}$ MPa	$E_{c0,med}$ MPa	Densidade a 12% kg/m ³
D20	20	4	10 000	500
D30	30	5	12 000	625
D40	40	6	14 500	750
D50	50	7	16 500	850
D60	60	8	19 500	1 000
NOTA 1 Os valores desta Tabela foram obtidos de acordo com a NBR719:2022-3				
NOTA 2 Valores referentes ao teor de umidade igual a 12%				
NOTA 3 Os valores das classes de resistência para espécies nativas estão disponíveis na NBR7190:2022-3, Tabela A.1				

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022)

Todas as propriedades são referidas ao PE, adotado como 12% de umidade. Para se chegar aos valores das propriedades de resistência e de rigidez para as Classes de Umidade 2, 3 e 4 (Tabela 1), utilizam-se as expressões 1 e 2, cuja representatividade do fenômeno é objeto de discussão deste trabalho.

Para a obtenção dos valores de cálculo que serão utilizados no dimensionamento dos elementos estruturais, a NBR7190:2022-1 apresenta dois modificadores (k_{mod1} e k_{mod2}) que serão multiplicados pelo valor característico de uma propriedade estrutural a fim de penalizar o parâmetro e garantir maior segurança a estrutura. O k_{mod1} tem relação a classe de carregamento da estrutura (duração instantânea, curta, média, longa ou permanente), conforme pode ser observado no item 5.8.4.1 da referida normativa. Já o k_{mod2} está relacionado a classe de umidade no qual a estrutura se encontra, e seus valores são expostos na Tabela 3.

Tabela 3: Valores de K_{mod2} .

Classe de umidade	Madeira serrada Madeira roliça Madeira lamelada colada (MLC) Madeira lamelada colada cruzada (MLCC) Madeira laminada colada (LVL)	Madeira recomposta
(1)	1,00	1,00
(2)	0,90	0,95
(3)	0,80	0,93
(4)	0,70 ^a	0,90
^a Não é permitido o uso do MLCC para classe de umidade (4)		

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022)

3.3 Síntese bibliográfica sobre o tema

Em vista da relevância da alteração das propriedades da madeira para distintos teores de umidade e da importância de uma correta correção desses parâmetros para o dimensionamento estrutural, há vários trabalhos sobre o tema, como os trabalhos de Logsdon (1998), Nogueira *et al.* (2018), Soares *et al.* (2021), Ruthes *et al.* (2022), Moura *et al.* (2022) e Aquino *et al.* (2022).

Logsdon (1998), em seu trabalho de doutorado, fez um estudo sobre as equações de correção de propriedades apresentados pela NBR7190:1997, realizando ensaios em sete espécies de madeira (espécies tanto de coníferas quanto dicotiledôneas), cada uma representando uma classe de resistência, a fim de averiguar a confiabilidade delas. O trabalho concluiu que os coeficientes de correção das equações da norma precisavam ser diferentes para cada parâmetro estrutural avaliado, além de que, apesar da diferença na anatomia das coníferas e dicotiledôneas, podia-se utilizar as mesmas equações para ambos os casos.

Nogueira *et al.* (2018) apresentam a caracterização das propriedades do *Eucalyptus maideni*, espécie de Eucalipto com grande potencial de aplicação. Com a caracterização da espécie, averiguou-se que mais da metade das propriedades sofreram alterações com a redução do teor de umidade, sendo que a resistência à compressão paralela e perpendicular às fibras, tração perpendicular às fibras e convencional à flexão estática, módulo de elasticidade à compressão perpendicular, à tração paralela e à flexão estática sofreram aumento, enquanto a

resistência à tração paralela às fibras, e o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras sofreram uma redução com a diminuição do teor de umidade.

Soares *et al.* (2021) realizaram um estudo sobre a influência do teor de umidade nas propriedades do *Cedrelinga catenaeformis*, com o resultado de que, entre 12 propriedades avaliadas, houve mudanças significativas em apenas 4 delas. Concluiu-se que, como muitas propriedades não sofreram alterações estatisticamente significativas e a equação de norma sempre apresenta valores superiores com a redução do teor de umidade, os valores das correções precisam ser revistos.

Ruthes *et al.* (2022) apresentam um estudo sobre a influência da umidade em 15 propriedades físicas e mecânicas do angelim-amargoso (*Vatairea* sp), estimando os resultados a 12% com as equações da NBR7190:2022-1 e comparando-os com valores obtidos experimentalmente. A conclusão encontrada foi a de que poucas propriedades tiveram mudanças significativas em relação à variação do teor de umidade; por outro lado, foram encontradas maiores diferenças entre os valores estimados por equação e encontrados empiricamente nos parâmetros que tiveram influências consideráveis com a alteração da umidade.

Por fim Moura *et al.* (2022) e Aquino *et al.* (2022), de forma a avaliar a alteração das propriedades para a espécie *Cedrella odorata*, realizaram ensaios para os teores de umidade de 12% e no ponto de saturação das fibras (24,31% para essa espécie), comparando resultados dos ensaios com os estimados por norma. Para essa espécie, houve alterações em grande parte das propriedades, mas as alterações foram menores do que as estimadas por norma, evidenciando a necessidade por revisão nas equações.

3.4 Considerações finais sobre a revisão bibliográfica

Embora alguns trabalhos de pesquisa na área tenham sido desenvolvidos: Logsdon (1998), Nogueira *et al.* (2018), Moura *et al.* (2022) e Ruthes (2022), eles não se mostram suficientes para levar conclusões a respeito do tema aqui estudado.

Buscas nas bases de dados Reserachgate e Web of Science, com as palavras chaves “wood”, “properties”; “moisture content”, resultaram em um número muito baixo de artigos internacionais com alguma relação direta à abordagem desta dissertação, e nenhum com a abrangência do tratamento de dados aqui adotada, para a classe de resistência D60 na NBR7190:2022-1. Para as demais classes de resistência, outros trabalhos devem ser conduzidos no mesmo sentido.

Diante disso, é possível concluir que a revisão bibliográfica confirma a tempestividade do trabalho realizado, objetivando estabelecer as bases para oportuna revisão do referido texto normativo, haja vista a relevância da quantificação confiável da influência da umidade nas propriedades de resistência e de rigidez da madeira, tendo em vista o desenvolvimento de projetos de estruturais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme apontado anteriormente, foram realizados os ensaios preconizados pela NBR7190:2022-3 para as espécies Angelim Vermelho (*Hymenolobium petraeum Ducke*), Angelim Ferro (*Dinizia excelsa Ducke*), Cupiúba (*Goupia glabra*), Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*) e Maçaranduba (*Manilkara sp.*). Foram 12 corpos de prova para cada espécie, nas condições de teor de umidade de 12% (valor padrão para a NBR7190:2022-1), e saturada (valores, respectivamente, de 25,5%, 24,1%, 22,7%, 22,3% e 22,9%). Conforme o referido texto normativo, têm-se dezoito determinações para a caracterização simplificada, nos quais foram realizadas neste trabalho as seguintes:

- Resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$)
- Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras (E_{c0})
- Resistência à tração paralela às fibras ($f_{t,0}$)
- Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras (E_{t0})
- Resistência ao fendilhamento ($f_{s,0}$)
- Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v,0}$)
- Resistência convencional na flexão estática (f_M)
- Módulo de elasticidade longitudinal na flexão estática (E_{M0})

O Apêndice A contém um resumo dos detalhamentos sobre os procedimentos dos ensaios.

4.1 Materiais e ensaios realizados

Para a confecção dos corpos de prova foram obtidas peças de madeiras das diferentes espécies citadas, com seção transversal de 6x12cm, com 350cm e 400cm de comprimento (Figura 6), na condição “verde” (teor de umidade de 100%), retiradas em diferentes regiões e alturas das árvores abatidas. Tais peças foram divididas ao meio, do qual metade foram secas até o teor de umidade de 12%, enquanto os restantes foram utilizados para fabricação dos corpos de prova saturados.

Figura 6: Peças de madeira utilizadas para confecção dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria

4.2 Análise estatística

Seguinte à realização dos ensaios e coleta dos dados para as distintas espécies e nas duas condições de teor de umidade, utilizando-se das Equações 1 e 2, substituindo, respectivamente, os coeficientes “3” e “2” por “k” e isolando o mesmo, obtemos a Equação 3:

$$k = 100 \cdot \frac{R_{12} - R_u}{R_u \cdot (U - 12)} \quad (3)$$

Sendo:

- R_{12} e R_u : módulo de resistência ou rigidez, para uma determinada solicitação mecânica, para o teor de umidade 12% e U%, respectivamente;

Esse coeficiente passou por um teste estatístico t de Student, com auxílio do *software* Minitab™, para determinação do limite inferior da população. O Teste t de Student, segundo o manual do *software* Bioestat™, é um teste paramétrico de largo uso, baseado no modelo de distribuição das diferenças entre as médias apresentada por W. Gosset (Student), geralmente efetuados quando se desconhece as variâncias paramétricas. O teste considera que a população tende a uma distribuição normal à medida que a população aumenta.

Por se tratar de uma amostra pequena (5 espécies com 12 resultados para cada parâmetro estrutural, totalizando 60 resultados), realizou-se uma simulação de reamostragem (*bootstrap*), a fim de saber para qual valor o limite inferior tenderia para uma amostragem maior, com uso do *software* Bioestat™. O *bootstrap* é uma técnica, cuja designação foi atribuída a Bradle Efron, no qual se retira de uma pequena amostra, com reposição, numerosas amostras com chance de $1/n$ de ser obtida, sob a afirmação de que a distribuição relativa de repetidas amostras estatísticas é uma estimação da distribuição de amostragem. A opção pelo limite inferior das amostras se deve por motivos de segurança por garantir que há 5% de chance de que o valor de “k” seja menor do que o adotado. Este valor será comparado aos coeficientes “3” e “2” das Equações 1 e 2 apresentadas anteriormente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Tabelas 4 a 8 mostram os resultados dos ensaios para, respectivamente, Angelim Vermelho, Angelim Ferro, Cupiúba, Jatobá e Maçaranduba, na condição de teor de umidade de 12% e saturado e o respectivo coeficiente “k” associado ao corpo de prova. Já a Tabela 9 apresenta os valores dos limites inferiores para “k” utilizando o Teste t de Student e após a simulação Bootstrap.

Tabela 4: Resultados dos ensaios do *Hymenolobium petraeum* Ducke (Angelim Vermelho)

Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Med.	D.Padr.	C.var.
$f_{c,0}$	Sat.	68	62	67	59	64	71	73	65	67	60	59	70	65,42	4,74	7,25
	12%	81	73	73	76	75	80	90	79	79	66	79	81	77,53	5,85	7,54
	K	1,36	1,27	0,67	2,16	1,17	0,94	1,76	1,57	1,34	0,78	2,50	1,11	1,39	-	-
$f_{t,0}$	Sat.	79	62	87	62	85	80	77	83	85	94	83	76	79,42	9,45	11,90
	12%	89	84	101	108	93	106	96	59	96	90	198	139	104,9	34,58	32,96
	K	0,96	2,63	1,18	5,47	0,70	2,38	1,84	-2,16	0,98	-0,29	10,26	6,11	2,51	-	-
$f_{v,0}$	Sat.	11	11	15	15	11	15	14	15	11	15	16	14	13,82	1,98	14,29
	12%	12	13	17	18	21	26	19	22	16	19	16	25	19,16	0,11	11,93
	K	0,74	1,28	0,99	1,23	6,73	5,53	2,65	3,56	3,43	1,98	0,00	5,66	2,95	-	-
$f_{s,0}$	Sat.	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,7	0,4	0,8	0,8	0,8	1,1	1,1	0,79	0,19	23,76
	12%	0,8	0,8	1,0	1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	0,9	0,7	0,91	0,11	11,93
	K	0,00	0,00	1,85	1,85	2,47	3,17	11,11	1,85	0,93	1,85	-1,35	-2,69	1,75	-	-
f_M	Sat.	95	90	110	97	95	92	104	100	106	95	103	92	98,25	6,30	6,41
	12%	127	110	120	87	90	111	106	115	89	129	127	111	110,17	14,93	13,55
	K	2,47	1,67	0,70	-0,79	-0,41	1,51	0,14	1,13	-1,16	2,64	1,72	1,54	0,93	-	-
$f_{c,0}$ - Resistência à compressão paralela às fibras (em MPa)																
$f_{t,0}$ - Resistência à tração paralela às fibras (em MPa)																
$f_{s,0}$ - Resistência ao fendilhamento (em MPa)																
$f_{v,0}$ - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (em MPa)																
f_M - Resistência convencional na flexão estática (em MPa)																

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4: Resultados dos ensaios do *Hymenolobium petraeum* Ducke (Angelim Vermelho) (cont.)

Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Med.	D.Padr.	C.var.
E _{c0}	Sat.	16786	13213	13930	12938	14404	13167	15255	14002	13884	13613	17303	12198	14225	1527,54	10,74
	12%	18017	15681	18638	16660	13663	17805	18684	9494	20935	17887	14856	18016	16695	2974,41	17,82
	k	0,54	1,38	2,50	2,13	-0,38	2,61	1,67	-2,39	3,76	2,33	-1,05	3,53	1,39	-	-
E _{t0}	Sat.	13691	11309	17055	13379	11643	14953	13993	13742	14339	16530	12693	14892	14018	1721,56	12,28
	12%	15964	13984	18262	20917	16888	17612	15219	12842	14634	15867	22730	19372	17024	2912,19	17,11
	k	1,23	1,75	0,52	4,17	3,34	1,32	0,65	-0,49	0,15	-0,30	5,86	2,23	1,70	-	-
E _{M0}	Sat.	13269	12244	16704	13506	14001	13886	14856	12594	14796	15219	13392	14807	14106	1239,55	8,79
	12%	16813	14721	16842	18283	16171	16477	16868	15456	17439	15253	18093	15590	16500	1115,85	6,76
	k	1,98	1,50	0,06	2,62	1,15	1,38	1,00	1,68	1,32	0,01	2,60	0,39	1,31	-	-
E _{c0} - Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras (em MPa)																
E _{t0} - Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras (em MPa)																
E _{M0} - Módulo de elasticidade longitudinal na flexão estática (em MPa)																

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5: Resultados dos ensaios do *Dinizia excelsa* Ducke (Angelim Ferro)

Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Med.	D.Padr.	C.var.
$f_{c,0}$	Sat.	58	73	63	77	58	74	56	72	70	67	65	68	66,75	6,89	10,32
	12%	74	79	71	89	53	74	66	78	86	86	80	72	75,67	9,88	13,06
	k	2,29	0,68	1,05	1,29	-0,71	0,00	1,48	0,69	1,90	2,35	1,91	0,49	1,12	-	-
$f_{t,0}$	Sat.	86	70	84	85	113	117	74	79	79	160	90	129	97,17	27,03	27,82
	12%	100	117	87	177	69	84	60	141	197	168	137	154	124,25	44,87	36,11
	k	1,35	5,57	0,30	8,97	-3,23	-2,34	-1,57	6,51	12,39	0,41	4,33	1,61	2,86	-	-
$f_{v,0}$	Sat.	14	17	13	12	18	18	16	15	19	22	19	17	16,64	2,84	17,07
	12%	21	23	16	21	18	19	19	16	22	20	27	25	20,36	3,34	16,42
	k	4,15	2,93	1,91	6,22	0,00	0,46	1,55	0,55	1,31	-0,75	3,49	3,90	2,07	-	-
$f_{s,0}$	Sat.	0,8	0,7	0,8	1,0	1,0	1,0	1,1	0,8	0,7	0,6	0,8	0,9	0,85	0,15	17,74
	12%	0,8	0,6	0,8	1,0	1,0	0,5	0,0	0,0	1,1	0,7	0,7	0,7	0,66	0,35	53,59
	k	0,00	-1,18	0,00	0,00	0,00	-4,15	-8,29	-8,29	4,74	1,38	-1,04	-1,84	-1,55	-	-
f_M	Sat.	108	121	128	108	136	138	68	66	108	124	133	117	112,92	23,91	21,18
	12%	92	127	119	140	137	114	117	108	87	148	152	147	124,00	21,63	17,44
	k	-1,23	0,41	-0,58	2,46	0,06	-1,44	5,98	5,28	-1,61	1,60	1,18	2,13	1,19	-	-
$f_{c,0}$ - Resistência à compressão paralela às fibras (em MPa)																
$f_{t,0}$ - Resistência à tração paralela às fibras (em MPa)																
$f_{s,0}$ - Resistência ao fendilhamento (em MPa)																
$f_{v,0}$ - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (em MPa)																
f_M - Resistência convencional na flexão estática (em MPa)																

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5: Resultados dos ensaios do *Dinizia excelsa Ducke* (Angelim Ferro) (cont.)

Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Med.	D.Padr.	C.var.
E _{c0}	Sat.	15243	19567	18872	17494	13658	19497	19507	19034	20754	16370	16640	19747	18032	2145,57	11,90
	12%	16982	19205	21195	23253	13135	16554	17009	19440	22266	18189	21247	16401	18740	2921,30	15,59
	k	0,95	-0,15	1,02	2,73	-0,32	-1,25	-1,06	0,18	0,60	0,92	2,30	-1,40	0,38	-	-
E _{t0}	Sat.	16722	17842	19382	13632	18899	19051	16220	17325	15931	17901	17475	14097	17040	1832,01	10,75
	12%	14140	22058	18145	26354	13556	20814	18226	21116	22279	18512	19570	18786	19463	3497,74	17,97
	k	-1,28	1,96	-0,53	7,74	-2,34	0,77	1,03	1,81	3,30	0,28	0,99	2,76	1,37	-	-
E _{M0}	Sat.	17193	18813	18684	14939	16917	20591	19125	13732	20406	19126	16001	16348	17656	2150,71	12,18
	12%	17081	18857	17232	27270	18940	15270	17457	17553	17584	17508	21647	17253	18638	3109,04	16,68
	k	-0,05	0,02	-0,64	6,84	0,99	-2,14	-0,72	2,31	-1,15	-0,70	2,93	0,46	0,68	-	-
E _{c0} - Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras (em MPa)																
E _{t0} - Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras (em MPa)																
E _{M0} - Módulo de elasticidade longitudinal na flexão estática (em MPa)																

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6: Resultados dos ensaios do *Goupia glabra* (Cupiúba)

Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Med.	D.Padr.	C.var.
$f_{c,0}$	Sat.	59	71	83	67	59	64	83	85	76	75	66	69	71,42	9,07	12,70
	12%	69	84	92	99	93	76	97	99	84	61	71	88	84,46	12,65	14,98
	k	1,58	1,70	1,01	4,44	5,41	1,76	1,57	1,54	0,98	-1,74	0,73	2,57	1,80	-	-
$f_{t,0}$	Sat.	106	77	105	84	72	64	115	83	65	71	89	89	85,00	16,64	19,53
	12%	89	85	131	131	149	87	137	98	86	66	100	141	108,19	27,58	25,49
	k	-1,51	0,96	2,28	5,17	9,97	3,31	1,78	1,68	3,01	-0,63	1,13	5,40	2,71	-	-
$f_{v,0}$	Sat.	17	18	21	17	10	16	21	15	20	23	16	17	17,55	3,42	19,51
	12%	14	12	15	24	22	19	22	18	19	17	16	23	18,92	3,74	19,80
	k	-1,59	-3,31	-2,62	3,78	10,81	1,69	0,44	1,86	-0,47	-2,43	0,00	3,01	1,32	-	-
$f_{s,0}$	Sat.	0,8	1,1	1,1	1,1	0,8	0,8	1,1	1,2	1,0	0,9	0,8	0,9	0,97	0,15	15,49
	12%	1,1	1,1	0,9	0,9	0,6	1,0	1,1	1,3	0,9	0,9	1,2	0,8	0,98	0,19	19,31
	k	3,49	0,00	-1,69	-1,69	-2,33	2,33	0,00	0,78	-0,93	0,00	4,66	-1,04	0,30	-	-
f_M	Sat.	108	118	169	106	122	115	162	148	131	107	78	123	123,92	25,59	20,65
	12%	96	90	162	184	149	82	137	163	106	129	110	133	128,48	32,24	25,09
	k	-1,04	-2,18	-0,37	6,88	2,02	-2,64	-1,44	0,94	-1,78	1,92	3,78	0,79	0,57	-	-
$f_{c,0}$ - Resistência à compressão paralela às fibras (em MPa) $f_{t,0}$ - Resistência à tração paralela às fibras (em MPa) $f_{s,0}$ - Resistência ao fendilhamento (em MPa) $f_{v,0}$ - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (em MPa) f_M - Resistência convencional na flexão estática (em MPa)																

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6: Resultados dos ensaios do *Goupia glabra* (Cupiúba) (cont.)

Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Med.	D.Padr.	C.var.
E _{c0}	Sat.	15094	16818	16841	18891	14650	20290	19885	14684	16387	16030	16176	20008	17146	2090,85	12,19
	12%	12184	17545	14534	21498	20449	18828	21865	24051	22782	11531	18299	19523	18591	4039,07	21,73
	k	-1,80	0,40	-1,28	1,29	3,69	-0,67	0,93	5,95	3,64	-2,62	1,22	-0,23	0,88	-	-
E _{t0}	Sat.	20550	18462	19123	17366	15349	15285	19214	17259	12553	15612	16511	15570	16905	2213,47	13,09
	12%	16913	15671	20035	20124	22259	14781	20172	18239	18658	16229	15306	18226	18051	2323,42	12,87
	k	-1,65	-1,41	0,44	1,48	4,20	-0,31	0,46	0,53	4,53	0,37	-0,68	1,59	0,80	-	-
E _{M0}	Sat.	14187	16895	20787	16759	18310	18846	17968	18825	17114	16514	14783	17026	17335	1797,40	10,37
	12%	14274	18794	18639	25002	23598	14452	20144	19471	19817	16865	17419	15928	18700	3274,82	17,51
	k	0,06	1,05	-0,96	4,58	2,69	-2,17	1,13	0,32	1,47	0,20	1,66	-0,60	0,79	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7: Resultados dos ensaios do *Hymenaea stilbocarpa* (Jatobá)

Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Med.	D.Padr.	C.var.
f _{c,0}	Sat.	61	81	68	80	66	76	76	64	69	84	72	74	72,58	7,18	9,89
	12%	90	99	96	102	88	85	98	92	80	106	97	91	93,42	7,37	7,89
	k	4,54	2,10	3,93	2,63	3,28	1,09	2,78	4,26	1,51	2,52	3,30	2,24	2,85	-	-
f _{t,0}	Sat.	123	92	113	138	101	127	158	97	78	141	117	106	115,92	22,88	19,74
	12%	137	116	175	180	133	169	184	132	119	210	165	144	155,33	29,44	18,95
	k	1,09	2,50	5,36	2,93	3,08	3,19	1,60	3,54	5,04	4,76	4,01	3,49	3,38	-	-
f _{v,0}	Sat.	19	22	25	18	21	25	16	15	16	23	21	20	19,97	3,47	17,37
	12%	23	28	31	23	25	35	22	22	25	32	29	26	26,66	4,34	16,28
	k	2,19	2,68	2,20	2,55	1,89	4,07	3,85	4,59	5,51	3,61	3,71	2,47	3,33	-	-
f _{s,0}	Sat.	0,6	0,8	0,8	0,9	0,5	0,8	0,7	0,4	0,5	0,9	0,9	0,8	0,7	0,18	25,36
	12%	0,7	0,9	0,9	1,0	0,6	0,9	0,8	0,6	0,6	1,3	1,0	0,9	0,85	0,21	24,32
	k	0,91	0,95	1,79	1,45	2,18	1,64	1,88	5,23	3,24	3,72	1,45	1,79	2,19	-	-
f _M	Sat.	99	87	108	131	128	140	118	106	108	154	102	112	116,08	18,98	16,35
	12%	128	99	140	157	174	164	159	145	158	211	122	138	149,48	28,34	18,96
	k	2,88	1,28	2,84	1,90	3,46	1,68	3,37	3,54	4,48	3,59	1,90	2,29	2,77	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7: Resultados dos ensaios do *Hymenaea stilbocarpa* (Jatobá) (cont.)

Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Med.	D.Padr.	C.var.
E _{c0}	Sat.	21924	16076	20894	23633	17762	22302	22558	19370	18467	18944	19408	21015	20196	2230,49	11,04
	12%	22484	17949	21408	20386	19357	23221	19631	21833	17155	21987	20851	18996	20438	1865,10	9,13
	k	0,25	1,13	0,24	-1,33	0,87	0,40	-1,26	1,23	-0,69	1,56	0,72	-0,93	0,18	-	-
E _{t0}	Sat.	23241	18018	23151	25380	16813	22197	23100	21991	20081	23249	21715	20470	21617	2416,00	11,18
	12%	22017	16576	21066	22048	20022	21937	23784	19088	20446	26511	22566	23974	21670	2550,46	11,77
	k	-0,51	-0,78	-0,87	-1,27	1,85	-0,11	0,29	-1,28	0,18	1,36	0,38	1,66	0,07	-	-
E _{M0}	Sat.	21399	16589	21316	23368	19480	21437	21269	20248	18489	24406	19994	22254	20854	2104,00	10,09
	12%	20766	17988	22956	22698	23034	19867	22868	19823	18988	25839	19894	22294	21418	2223,74	10,38
	k	-0,29	0,82	0,75	-0,28	1,77	-0,71	0,73	-0,20	0,26	0,57	-0,04	0,02	0,28	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8: Resultados dos ensaios do *Manilkara sp* (Maçaranduba)

Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Med.	D.Padr.	C.var.
$f_{c,0}$	Sat.	65	70	64	54	70	64	70	63	62	64	65	60	64,25	4,58	7,12
	12%	78	78	90	88	90	91	82	82	74	81	86	75	82,93	6,18	7,45
	k	1,83	1,00	3,74	5,84	2,63	3,93	1,55	2,80	1,73	2,40	2,96	2,30	2,73	-	-
$f_{t,0}$	Sat.	163	116	152	124	109	129	108	161	102	104	78	119	122,08	25,63	20,99
	12%	132	175	141	172	174	126	150	143	119	110	109	109	138,48	25,14	18,16
	k	-1,74	4,65	-0,69	3,56	5,50	-0,18	3,58	-1,02	1,55	0,55	3,69	-0,74	1,56	-	-
$f_{v,0}$	Sat.	16	18	14	10	18	21	19	19	18	18	21	14	17,1	3,19	18,64
	12%	26	21	25	28	25	23	23	22	27	29	28	21	25,24	2,78	11,02
	k	5,56	1,38	7,34	16,06	3,77	0,79	2,03	1,59	4,74	5,56	3,10	4,72	5,02	-	-
$f_{s,0}$	Sat.	0,8	1,1	1,0	0,9	0,5	0,5	1,0	0,4	0,9	0,8	0,7	0,7	0,78	0,22	28,66
	12%	0,7	0,9	0,9	0,9	1,0	0,7	1,0	0,9	0,7	0,6	0,8	0,8	0,83	0,13	15,61
	k	-1,15	-1,67	-0,92	0,00	9,17	3,67	0,00	11,47	-2,04	-2,29	1,31	1,31	1,57	-	-
f_M	Sat.	146	126	127	100	110	131	108	129	111	91	111	121	117,58	15,20	12,93
	12%	138	147	135	132	107	134	131	147	119	155	149	140	136,29	13,37	9,81
	k	-0,49	1,54	0,58	2,94	-0,22	0,22	1,93	1,30	0,67	6,46	3,17	1,45	1,63	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8: Resultados dos ensaios do *Manilkara sp* (Maçaranduba) (cont.)

Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Med.	D.Padr.	C.var.
E _{c0}	Sat.	21634	21842	19521	18638	20198	20613	21858	25006	19229	17109	20583	20481	20559	1973,55	9,60
	12%	25221	19653	22037	20129	24660	26488	20265	22613	21351	19002	17832	23545	21900	2680,44	12,24
	k	1,52	-0,92	1,18	0,73	2,03	2,61	-0,67	-0,88	1,01	1,01	-1,23	1,37	0,65	-	-
E _{t0}	Sat.	22391	21199	21064	17931	19506	18621	17966	19699	14917	16117	16085	21238	18895	2375,05	12,57
	12%	22941	22412	22529	19947	21400	23810	21731	23053	18864	14787	17293	22432	20933	2712,24	12,96
	k	0,23	0,53	0,64	1,03	0,89	2,56	1,92	1,56	2,43	-0,76	0,69	0,52	1,02	-	-
E _{M0}	Sat.	19108	18946	19434	18230	18872	18166	15155	19025	14236	16433	16533	22092	18019	2125,17	11,79
	12%	22573	20613	18934	17743	23517	24528	18179	18244	19512	18440	18106	18820	19934	2337,48	11,73
	k	1,66	0,81	-0,24	-0,25	2,26	3,21	1,83	-0,38	3,40	1,12	0,87	-1,36	1,08	-	-

Fonte: Autoria própria

Tabela 9: Valores inferiores para “k” após análises estatísticas

Análise	f _{c,0}	f _{t,0}	f _{v,0}	f _{s,0}	f _M	E _{c0}	E _{t0}	E _{M0}
Teste t	1,624	1,79	1,986	-0,026	0,884	0,261	0,552	0,425
Bootstrap	1,639	1,835	2,044	0,019	0,901	0,28	0,554	0,449

Fonte: Autoria própria.

Avaliando os resultados da Tabela 8 pode-se observar que, mesmo os maiores valores de “t” observados para a resistência (1,986) e para rigidez (0,552) são, respectivamente, 34% e 72% menores do que os coeficientes presentes na norma, ou seja, os parâmetros de resistência estimados pelas equações da NBR7190:2022-1 são maiores do que os valores de referência observados empiricamente, evidência de que tais equações precisam passar por reajustes, por motivos de segurança, corroborado pelos resultados das referências bibliográficas. Ademais, observando estes resultados, que empregaram espécies de classe de resistências que não são C60, as diferenças entre o estimado e o observado por experimentação nestes trabalhos são diferentes estatisticamente entre si e entre o que foi observado neste trabalho. Apesar de que nas referências o número de amostras foi menor do que as empregadas aqui, há indícios de que cada classe de resistência precise ter seu coeficiente de correção próprio.

Também é possível observar que os módulos de rigidez possuem valores “t” próximos, o que viabilizaria utilizar um mesmo coeficiente para correção dos valores. Entretanto, o mesmo não pode ser adotado para as propriedades de resistência: a resistência ao fendilhamento e a resistência convencional a flexão estática têm valores de correção muito discrepantes dos demais. Assim como foi concluído por Logsdon (1998), é de se considerar o uso de coeficientes distintos para diferentes propriedades, ou para um grupo delas.

5 CONCLUSÕES

Com este trabalho foi possível observar que as equações de correção proposta pela NBR7190:2022-1 apresentam valores 40% e 70% maiores para resistência e rigidez, respectivamente, do que os observados através de experimento, evidência de que tais equações precisam passar por uma reformulação, assim como foi concluído pelas referências bibliográficas. Além disso, os dados evidenciam, assim como foi mostrado por Logsdon (1998), a possibilidade de utilizar coeficientes diferentes para distintos parâmetros estruturais e, somado aos resultados das demais referências, como Nogueira *et al.* (2018), Soares *et al.* (2021), Ruthes *et al.* (2022), entre outros, que cada classe de resistência pode exigir seu próprio valor para correção.

Propõe-se, para trabalhos futuros, estender as análises para outras classes de resistência. Dada a diversidade das espécies de dicotiledôneas existentes, é de grande relevância determinar quais coeficientes melhor descreve os resultados das espécies, visando confirmar se há necessidade de diferentes coeficientes para cada classe de resistência e, se possível, obter um coeficiente que represente as classes no geral. Também é sugerido trabalhos que visem aprofundar na possibilidade de coeficientes distintos para os diferentes parâmetros estruturais, como foi concluído nesse trabalho e no de Logsdon (1998), e fazer análises para as coníferas, tanto para correção dos mesmos coeficientes quanto para a avaliação da necessidade de equações de correção próprias para *softwoods*, dada sua estrutura anatômica diferente das dicotiledôneas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. S. **Influência da impregnação contra demanda biológica em propriedades físico-mecânicas de madeiras tropicais brasileiras**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.
- ALMEIDA, T. H.; SOUZA, A. M.; MARTINS, A. S. M.; CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, D. H.; LAHR, F. A. R. Effect of service temperature on shear strength of *Pinus* wood for roof structures. **Acta Scientiarum Technology**, v. 40, 2018. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303258327005>. Acesso em: 11 nov. 2024.
- AQUINO, V. B. M.; SOARES, L. S. Z. R.; RUTHES, H. C.; ARROYO, F. N.; FRAGA, I. F.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. Evaluation of moisture content variation on strength and stiffness properties of *Cedrella* sp. wood specie. **REM: International Engineering Journal**, v. 75, p. 111-116, 2022.
- ARROYO, F. N.; BORGES, J. F.; PEREIRA JR, W. M.; SANTOS, H. F.; OLIVEIRA, I. A.; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Estimation of flexural tensile strength as a function of shear of timber structures. **Forests**, v. 14, p. 1-14, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-1**: projeto de estruturas de madeira: parte 1: critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- BATISTA, M.; AMORIM, A.; SILVA, D. A. L.; AQUINO, V. B. M.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. Representativeness of the fiber parallel elasticity modulus value referring to the Brazilian standard C40 strength class in the design of timber structures. **Ciência Rural**, v. 53, n. 3, p. 1-7, 2023.
- CALIL JR, C. *et al.* **Manual de projeto e construção de pontes de madeira**. São Carlos: Suprema, 2006. 252 p.
- CALIL JR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003. 153 p.
- CALIL JR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A.; MARTINS, G. **Estruturas de madeira**: projetos, dimensionamento e exemplos de cálculo. Gen: [s. n.], 2021. 196 p.
- CHU, W.; FANG, J.; YANG, Y.; TAO, S.; SHAH, H. R.; WANG, M.; WANG, Y. Reaction to fire of the timber structure encapsulated by multilayer mortar coating under uniform thermal loading. **Fire Technology**, v. 61, p. 183-212, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10694-024-01622-9>. Acesso em: 14 set. 2024.
- DUARTE, B. B. **Influência de componentes químicos em propriedades mecânicas da madeira**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.
- GOMES, A. F. F.; ALMEIDA FILHO, F. M.; MOLINA, J. C.; MASCARENHAS, F. J. R.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. Influence of mean value of the modulus of

elasticity in compression parallel to the grain on the design of timber trusses. **Acta Scientiarum: Technology**, v. 45, p. 1-12, 2023.

GONÇALVES, Débora, LAHR, Francisco Antonio Rocco. **Deterioro y preservación de maderas mediante el uso de preservadores naturales de potencial interés en Brasil**. Bosque, v. 41, n. 3, p. 213-220, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.4067/S0717-92002020000300213>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

LOGSDON, N. B. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. São Carlos, 1998. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

MOURA, V.; SOARES, L. S.; RUTHES, H. C.; ARROYO, F. N.; FRAGA, I. F.; CHRISTOFORO, A. L.; SANTOS, H. F.; CHAHUD, E.; MELGAÇO, L. A.; LAHR, F. A. R. Analysis of moisture content variation on strength on stiffness properties do *Cedrella odorata* wood species. **Wood Research**, v. 67, p. 231-240, 2022.

NOGUEIRA, R. S.; ICIMOTO, F. H.; CALIL JR, C.; LAHR, F. A. R. Experimental study on full-scale glulam beams manufactured with *Eucalyptus urograndis*. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 25, p. 1-12, 2023.

NOGUEIRA, M. C. J. A.; ARAUJO, V. A. de; VASCONCELOS, J. S.; CRUZ, J. N.; VASCONCELOS, J. C. S.; PRATAVIERA, F.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Characterization of *Eucalyptus maidenii* timber for structural application: physical and mechanical properties at two moisture conditions. **South-East European Forestry**, v. 9, p. 1-6, 2018.

PAULA, M. O. *et al.* Análise termomecânica da madeira de *Corymbia citriodora* submetida a gradientes térmicos. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 3, p. 358-368, set. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.032613>. Acesso em: 17 jun. 2021.

PEREIRA, M.C.M; CALIL JR, C. **Strength and Stiffness of Cross Laminated Timber (CLT) panels produced with Pinus and Eucalyptus: experimental and analytical comparisons**. Revista Matéria, v. 24, n.04. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0684>>. Acesso em: 14 set.2024

PLETZ, E. **Passarela estaiada com tabuleiro de madeira laminada protendida em módulos curvos**. São Carlos, 2003. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

RAMAGE, M. H; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M; FEREDAY, G; REYNOLDS, T.; SHAH, D. U.; WU, G.; YU, L.; FLEMING, P.; DENSLEY-TINGLEY, D.; ALLWOOD, J.; DUPREE, P.; LINDEN, P. F.; SCHERMAN, O. The wood from the trees: The use of timber in construction. 2017. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116306050?via%3Dihub>. Acesso em: 14 set. 2024.

RODRIGUES, E. F. C.; ARAUJO, V. A.; CAVALHEIRO, R. S.; MARINI, L. J.; ALMEIDA, J. P. B.; AZEVEDO, A. R. G.; OLIVEIRA, L. B.; LAHR, F. A. R.; SANTOS, H. F.; CHRISTOFORO, A. L. Influence of growth rings position of wood on the determination

of its shear strength parallel to grain. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 24, p. 9765-9779, May-June 2023.

RUTHES, H. C.; MASCARENHAS, F. J. R.; SOARES, L. S. Z. R.; AQUINO, V. B. M.; ARROYO, F. N.; FRAGA, I. F.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Influence of moisture content on physical and mechanical properties of *Vatairea* sp. wood. **Revista Árvore**, v. 46, p. 1-8, 2022.

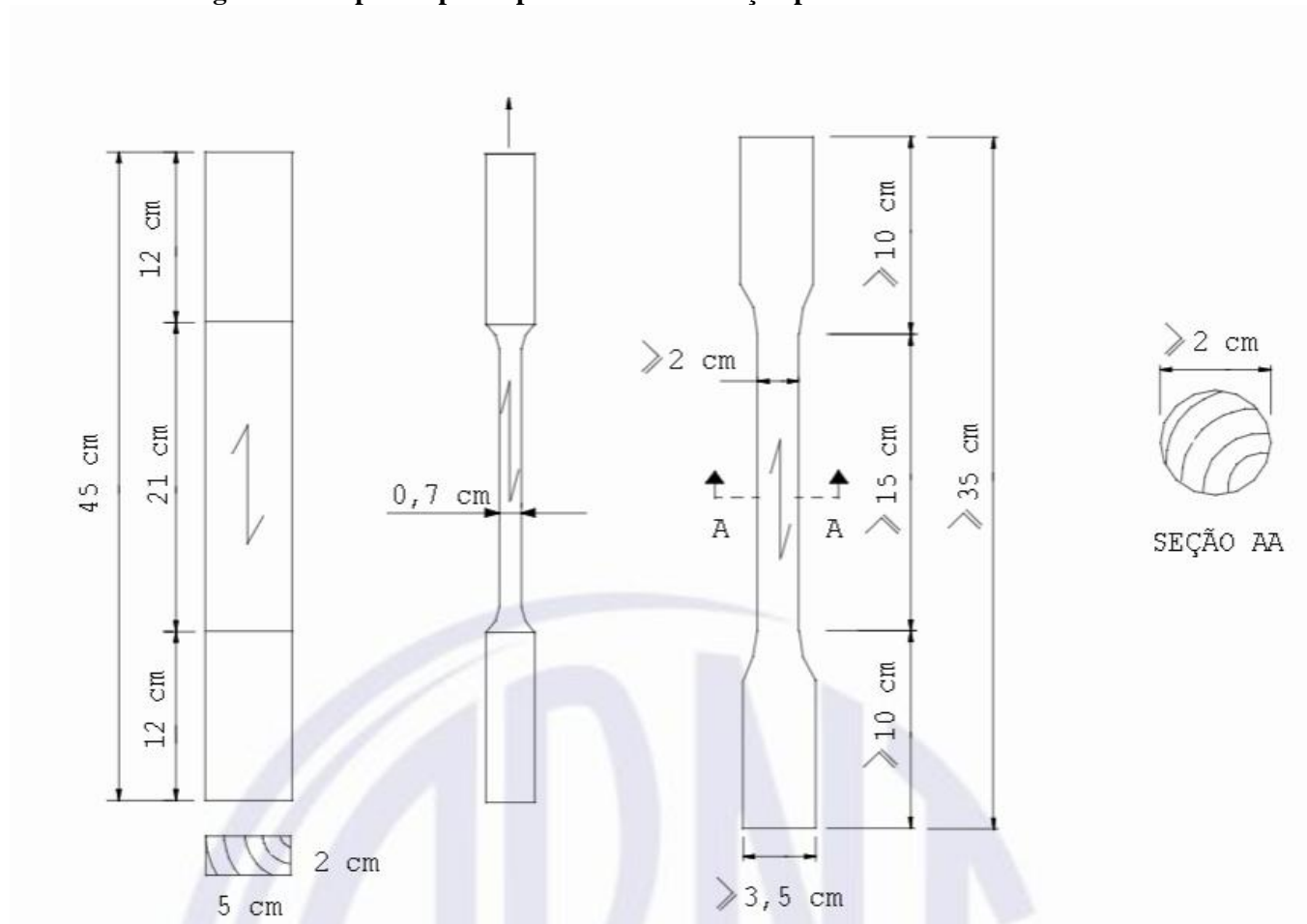
SOARES, L. S. Z. R.; FRAGA, I. F.; PAULA, L. S. E.; ARROYO, F. N.; RUTHES, H. C.; AQUINO, V. B. M.; MOLINA, J. C.; PANZERA, T. H.; BRANCO, L. A. M. N.; CHAHUD, E.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Influence of moisture content on physical and mechanical properties of *Cedrelinga catenaeformis* wood. **BioResources**, v. 16, p. 6765-6758, 2021.

YI, J.; PARK, J. H.; PARK, W.; KIM, C.-K.; CHOO, J. F. Testing and monitoring of the first timber bridge for road traffic in Korea. v. 25, p. 2166-2174, 2021. **KSCE Journal of Civil Engineering**. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-021-1525-4>. Acesso em: 14 set. 2024.

APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS

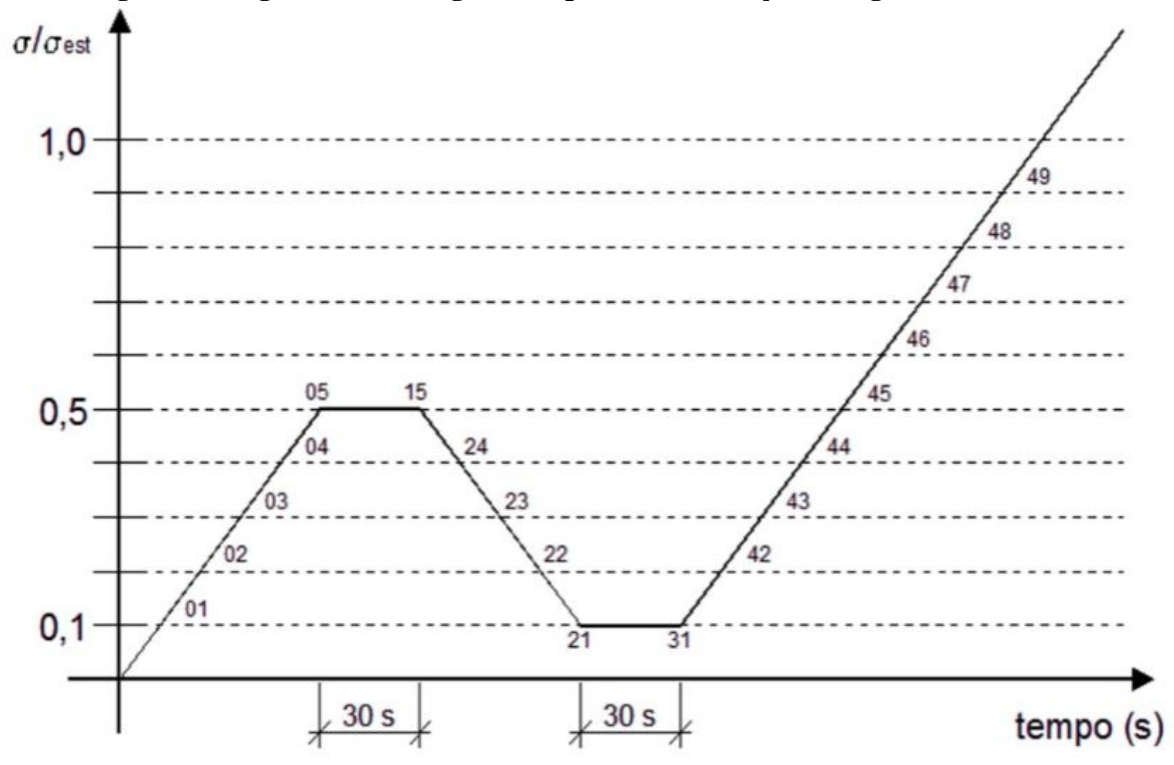
Para o ensaio de compressão paralelo às fibras, os corpos de prova devem ter formato prismático de 5x5x15cm, com precisão de 0,1mm na sua confecção. A norma citada acima preconiza que, a fim de ajuste do corpo de prova à máquina de ensaio, deve-se utilizar uma rótula entre o atuador e o corpo de prova. Para o ensaio de tração paralela às fibras, o corpo de prova deve ter um dos formatos mostrados pela Figura 7, com precisão de 0,1mm, e a máquina deve utilizar garras simétricas, para fim de ajuste. Em ambos os ensaios, para a determinação da resistência deve-se realizar um carregamento uniforme crescente a uma taxa aproximada de 10 MPa/min até a ruptura. Determina-se a resistência do objeto ensaiado através da divisão entre a força limite para ruptura pela área do corpo de prova. Para determinação da rigidez, o corpo de prova passa por ciclos de carregamento, de acordo com a Figura 8. Deve-se registrar, em duas faces opostas do elemento ensaiado, as deformações ocorrentes em cada ponto do diagrama de carregamento utilizando medidores mecânicos com sensibilidade de 0,001mm ou extensômetros com mínima precisão de 50 μ m/m, sendo que, quando atingido 70% da força limite (determinada por ensaio de um corpo de prova gêmeo retirado da amostra a ser ensaiada), deve-se retirar o aparelho. O módulo de elasticidade longitudinal é determinado pela Equação 4.

Figura 7: Corpos de prova para ensaios de tração paralela às fibras



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022, p. 15)

Figura 8: Diagrama de carregamento para determinação da rigidez da madeira



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022, p. 13)

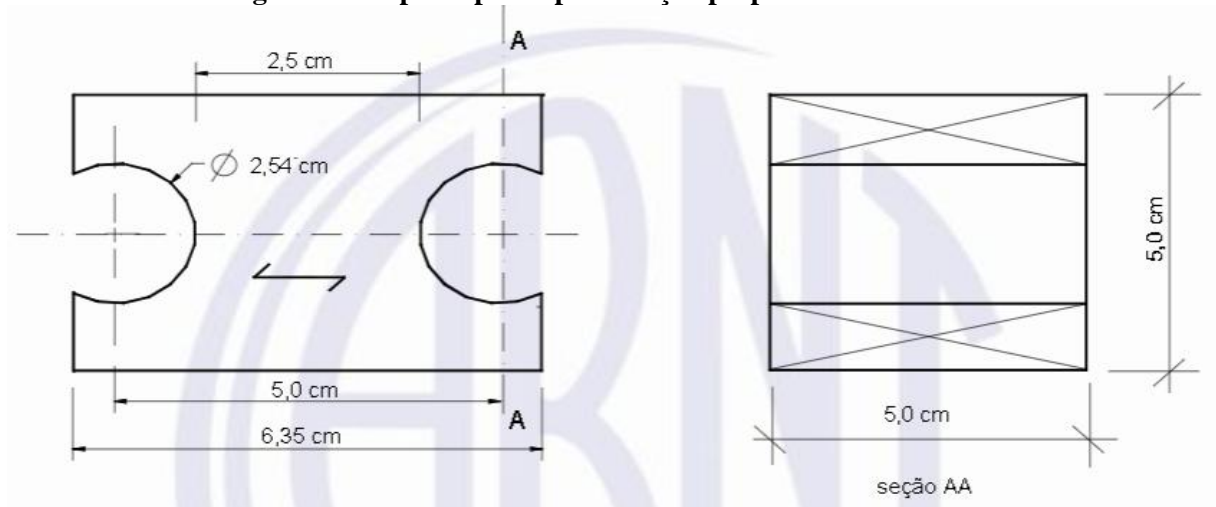
$$E_0 = \frac{\sigma_{50} - \sigma_{10}}{\varepsilon_{50} - \varepsilon_{10}} \quad (4)$$

Sendo:

- E_0 : Módulo de elasticidade longitudinal para compressão ou tração paralela às fibras;
- σ_{50} e σ_{10} : Tensão, em MPa, no corpo de prova para um carregamento equivalente a, respectivamente, 50% e 10% da força de ruptura;
- ε_{50} e ε_{10} : Deformação, em MPa, no corpo de prova para um carregamento equivalente a, respectivamente, 50% e 10% da força de ruptura;

Para determinação da resistência a tração normal às fibras, o corpo de prova deve ser moldado segundo a Figura 9, com sua maior dimensão na mesma direção das fibras. A máquina deve utilizar acessório específicos para encaixe nos orifícios do objeto de ensaio, e o carregamento deve ser constante a uma taxa de 2,5 MPa/min, preferencialmente na direção tangencial da peça, até a ruptura. A determinação da resistência ocorre pelo quociente da força limite pela área tracionada do corpo de prova.

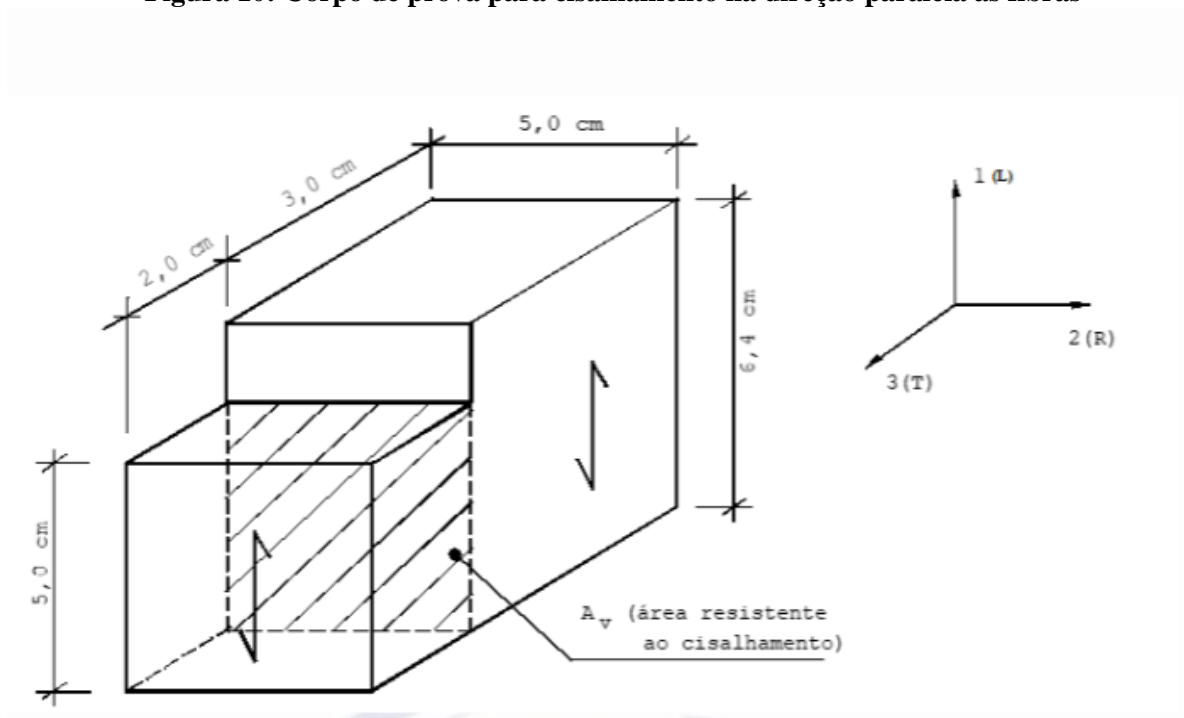
Figura 9: Corpo de prova para tração perpendicular às fibras



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022, p. 20)

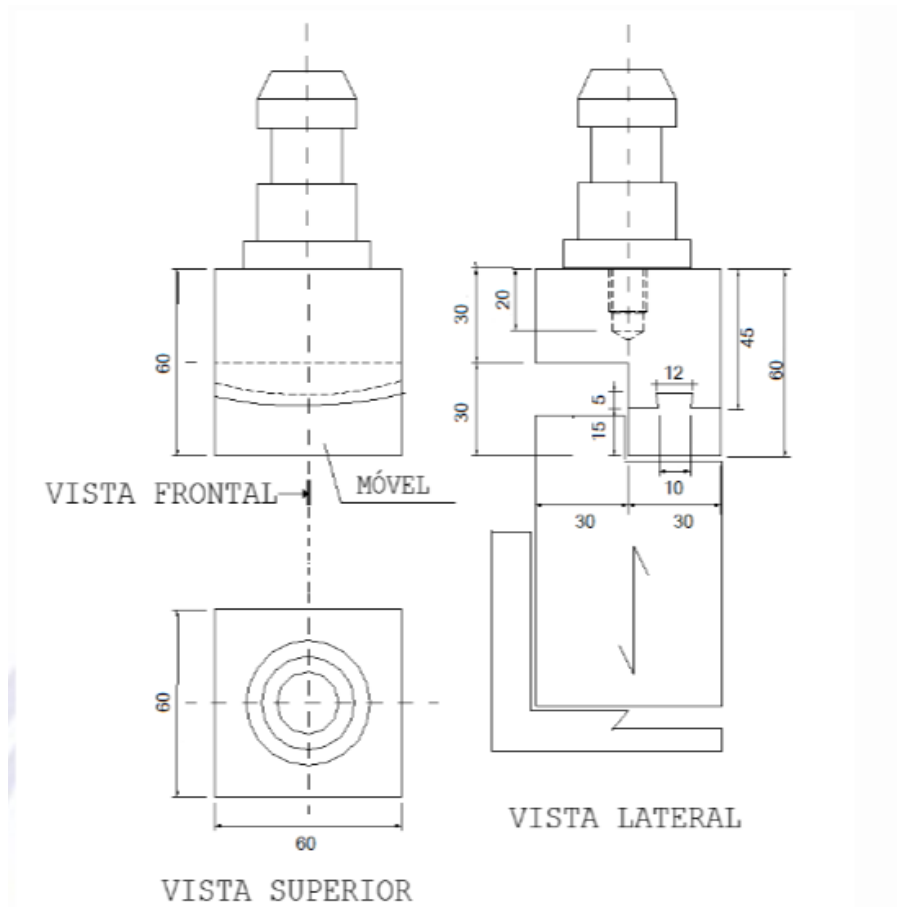
A resistência ao cisalhamento é obtida pela razão entre a força de ruptura e a área crítica (tendo seu plano paralelo à direção radial) do corpo de prova, cujo formato é mostrado na Figura 10. A Figura 11 mostra como é feito o ensaio, no qual carregamento aumenta a uma taxa de 2,5 MPa/min.

Figura 10: Corpo de prova para cisalhamento na direção paralela às fibras



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022, p. 22)

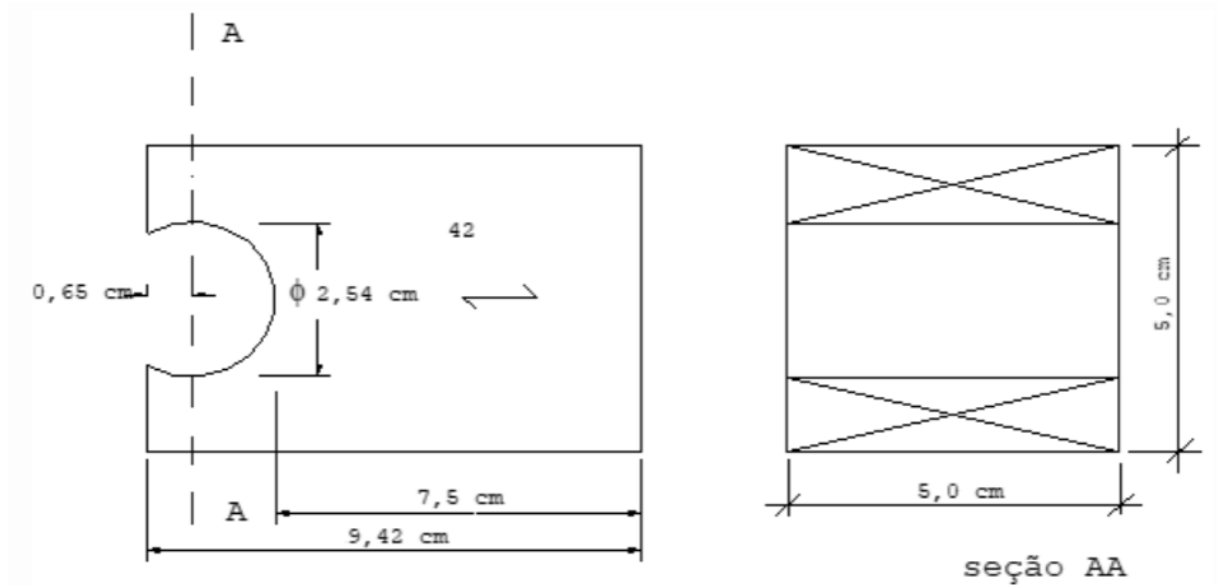
Figura 11: Arranjo de ensaio para cisalhamento paralelo às fibras (dimensões em mm)



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022, p. 23)

O ensaio para resistência ao fendilhamento paralelo às fibras requer o uso de acessórios específicos na máquina que se encaixem no orifício presente no corpo de prova (Figura 12). O carregamento segue um aumento constante de 2,5MPa/min até ruptura. A resistência se determina dividindo a força limite pela área crítica (sendo esta área preferencialmente na direção radial da madeira).

Figura 12: Arranjo de ensaio para cisalhamento paralelo às fibras (dimensões em mm)



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022, p. 24)

Por fim, o corpo de prova para o ensaio a flexão deve ter seção transversal de 5x5cm e comprimento, na direção das fibras, de 115cm, de preferência com o plano de flexão perpendicular à direção radial, não permitindo inclinações das fibras maiores de 6° em relação ao comprimento do objeto de ensaio. Esse é vinculado a dois apoios móveis com vão livre igual a 21 vezes a altura do corpo de prova. O carregamento para determinação da resistência é aplicado por um cutelo acoplado a máquina, que aplica uma força concentrada que segue constante aumento na proporção de 10MPa/min, até a falha. Para a rigidez, o carregamento segue os mesmos ciclos mostrados na Figura 8 e deve haver medidas de deslocamento nos pontos apresentados na mesma. A Equação 5 e 6 servem para determinar a resistência e a rigidez à flexão do lote a ser determinado.

$$f_M = \frac{M_{max}}{W_e} \quad (5)$$

$$E_{m0} = \frac{(F_{m,50} - F_{m,10}) \cdot L^3}{(v_{50} - v_{10}) \cdot 4 \cdot b h^3} \quad (6)$$

No qual:

- f_M e E_{m0} : resistência e rigidez à flexão;
- M_{max} : Máximo momento aplicado ao corpo de prova, em N.mm;
- W_e : módulo de resistência elástico da seção transversal, expresso em mm³, dado por $b \cdot h^2 / 6$, sendo b e h , respectivamente, a largura e a altura da seção transversal da peça, em mm;
- $F_{M,10}$ e $F_{M,50}$: Força correspondentes, em N, a 10% e 50% do carregamento máximo estimado por ensaio em corpo de prova gêmeo;

- V_{10} e V_{50} : deslocamento, em mm, no meio do vão para uma força equivalente a 10% e 50% do carregamento máximo estimado por ensaio em corpo de prova gêmeo.