

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

CLARA GASPAR FOSSI DE SOUZA

**Influência da aplicação repetida de forças na rigidez de peças fletidas de
Madeira Lamelada Colada**

**São Carlos
2023**

CLARA GASPAR FOSSI DE SOUZA

**Influência da aplicação repetida de forças na rigidez de peças
fletidas de Madeira Lamelada Colada**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais da
Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Área de concentração:
Desenvolvimento, Caracterização e
Aplicação de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Francisco
Antonio Rocco Lahr

**São Carlos
2023**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA 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).

S719i Souza, Clara Gaspar Fossi de
Influência da aplicação repetida de forças na
rigidez de peças fletidas de madeira lamelada colada /
Clara Gaspar Fossi de Souza; orientador Francisco
Antonio Rocco Lahr. São Carlos, 2023.

Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e
Área de Concentração em Desenvolvimento, Caracterização
e Aplicação de Materiais -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

1. Ensaio de flexão. 2. Forças cíclicas. 3.
Fenol-resorcinol. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharela **CLARA GASPAR FOSSI DE SOUZA**.

Título da dissertação: "Influência da aplicação repetida de forças na rigidez de peças fletidas de madeira lamelada colada".

Data da defesa: 27/07/2023.

Comissão Julgadora

Resultado

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

APROVADA

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

APROVADA

✓ Prof. Dr. **Fabricio Gomes Gonçalves**
(Universidade Federal do Espírito Santo/UFES)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais:

Prof. Associado **Rafael Salomão**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a **meu pai Ivan**, em memórias a **minha mãe**. E também ao **meu irmão Gabriel** e ao meu **professor Rocco**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo aquilo que eu tenha alcançado.

A minha família, pelo amor e dedicação ao longo da minha vida. À minha vó, Maria Aparecida, ao meu irmão, Gabriel, meu pai, aos meus tios e os meus amigos, por serem fonte de inspiração, dedicação e amor, e por estarem sempre ao meu lado.

Ao meu orientador, professor Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr que, nos anos de convivência, muito me ensinou, contribuindo para meu crescimento científico, intelectual e por me dar a oportunidade de ter desenvolvido esse trabalho.

Aos professores, por compartilharem seus conhecimentos e contribuírem para meu aprendizado.

Aos técnicos do Laboratório de madeiras e estruturas de madeira (laMEM) Jaime e Paulo, pela ajuda na realização dos ensaios mecânicos e ao marceneiro Silvio, pela amizade e ajuda na preparação dos corpos de prova.

À Escola de Engenharia de São Carlos, pela oportunidade de realização do curso de mestrado e por todo aprendizado e amizades que aqui adquiri.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

Aos meus amigos Leonor da Cunha Mastela, Crislayne Gabriela Andreto, Raíla Raiany de Sá, Gabriela Santanna Zanelli, Juliana Pimenta Bertuloso, Shayanny de Oliveira Salles e Ari Laurindo Neto, pelo apoio durante a pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Enfim, a todas outras pessoas não citadas que de uma forma ou outra estiveram envolvidos na realização desde trabalho e na participação desta etapa da minha vida, os meus sinceros agradecimentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A todos vocês, meu muito obrigada!

“A persistência é o menor caminho do êxito”.
Charles Chaplin

RESUMO

SOUZA, C. G. F. **Influência da aplicação repetida de forças na rigidez de peças fletidas de Madeira Lamelada Colada**. 71p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

A madeira lamelada colada (MLC) tem sido amplamente utilizada em aplicações estruturais devido à sua alta resistência e versatilidade. Conhecer o comportamento mecânico da MLC sob forças repetidas, tópico que se constitui em lacuna na área do conhecimento em que se insere, é de suma importância para garantir a durabilidade e o desempenho a longo prazo das estruturas de madeira. Este estudo tem como objetivo avaliar a influência das forças cíclicas sobre a rigidez da MLC quando os elementos estruturais estão submetidos à flexão, situação estrutural frequente dentre as aplicações usuais do referido produto. Investigações experimentais foram conduzidas com duas espécies de madeira, sendo elas Marupá (*Simarouba amara*) e Pequiá (*Caryocar villosum*), e um adesivo entre os usualmente empregados pela indústria do setor à base de fenol-resorcinol Cascophen RS-216-M (CASCO ®, Hexion). Os valores do módulo de elasticidade na flexão (E), obtidos antes da aplicação cíclica das forças, foram utilizados como referência para a construção do gráfico do módulo de elasticidade pelo número de ciclos [E x Nc]. Foram adotados os seguintes números de ciclos: de 0, 10, 100, 1.000, 86.400, 172.800, 345.600, 691.200, para frequência de 1Hz e 2Hz. Os resultados indicam que a aplicação repetida de forças não afeta significativamente a rigidez das peças de MLC. As madeiras selecionadas para esta pesquisa estão dentro do intervalo de densidade aparente estabelecido pelo documento normativo NBR7190/2022-1: Critérios de dimensionamento. À medida que o número de ciclos e frequência aumentou, os corpos de prova apresentaram rigidez próximas umas das outras. No gráfico de dispersão na madeira de Marupá para frequência de 1 Hz e 2 Hz o valor de R² foi de 2,08 e 24,67% respectivamente, na madeira de Pequiá para frequência de 1 Hz e 2 Hz o valor de R² foi de 38,86 e 11,95% respectivamente, o que mostra que os resultados não tem dependência linear entre as variáveis. Como não ocorreram danos aparentes nos corpos de prova ensaiados, foi conveniente avaliar a ocorrência de danos na linha de cola, em função do número de ciclos, aspecto que igualmente não foi identificado. Desse modo, as madeiras estudadas estão aptas para fabricação de MLC.

Palavras chaves: Ensaio de flexão. Forças cíclicas. Fenol-resorcinol.

ABSTRACT

SOUZA, C. G. F. **Influence of repeated application of forces on the stiffness of bent glued laminated wood parts.** 2023. 71 f. Dissertation (Master's) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2023.

Glued laminated wood (Glulam) has been widely used in structural applications due to its high strength and versatility. Knowing the mechanical behavior of Glulam under repeated forces, a topic that constitutes a gap in the area of knowledge in which it operates, is of paramount importance to guarantee the durability and long-term performance of wooden structures. This study aims to evaluate the influence of cyclic forces on the stiffness of the Glulam when the structural elements are subjected to bending, the most frequent structural situation among the usual applications of the referred product. Experimental investigations were conducted with two tropical wood species, namely Marupá (*Simarouba amara*) and Pequiá (*Caryocar villosum*), and an adhesive, Cascophen RS-216-M (CASCO®, Hexion) one of those usually used by industry in sector. The values of modulus of elasticity in bending (E), obtained before the cyclic application of forces, were used as a reference for the construction of the graph of the modulus of elasticity by the number of cycles [E × Nc]. The following cycle numbers were adopted: 0, 10, 100, 1,000, 86,400, 172,800, 345,600, 691,200, for frequencies of 1Hz and 2Hz. The results indicate that application repeated application of forces does not significantly affect the stiffness of Glulam parts. The woods selected for this research are within the apparent density range established by the normative document NBR7190/2022-1: - Design Criteria. As the number of cycles and frequency increases, the specimens exhibit stiffness close to each other. In the dispersion chart from Marupá for a frequency of 1 Hz and 2 Hz, R² values were 2.08 and 24.67% respectively, in from Pequiá for a frequency of 1 Hz and 2 Hz, R² values were 38.86 and 11.95% respectively, shows that the results do not present linear dependence between the variables. As there was no apparent damage in tested specimens, it was convenient to evaluate the occurrence of damage on the glue line, depending on the number of cycles, an aspect that was also not identified. Thus, the studied woods are suitable for manufacturing Glulam.

Keywords: Bending test. Cyclic forces. Phenol-resorcinol.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Detalhe de uma ligação executada com pinos metálicos em que ocorrem forças dinâmicas	25
Figura 2 - Figuras mostrando a) Ponte de MLC; b) Silos; c) Cobertura; d) Passarela de MLC.....	26
Figura 3 - Madeiras de árvores de Coníferas (Gimnospermas) A) macroscópica; B) microscópica.....	32
Figura 4 – Microestruturas de madeiras de árvores Dicotiledôneas, Angiospermas	33
Figura 5 - Síntese da cadeia produtiva de peças em madeira lamelada colada	34
Figura 6 - Dimensões finais das lamelas (cm).....	39
Figura 7 - Madeiras de a) Marupá; b) Pequiá.....	39
Figura 8 - Fotomicrografia (10x) das madeiras de a) Marupá; b) Pequiá.....	40
Figura 9 - Aspecto físico do adesivo Cascophen RS-216-M.....	40
Figura 10 - Esquema da montagem dos elementos de MLC	41
Figura 11 - Adesivo e montagem dos elementos de MLC.....	41
Figura 12 - Máquina de ensaio universal AMSLER.....	43
Figura 13 - Máquina de ensaios cíclicos	43
Figura 14 – Indicação da retirada da amostra no elemento de MLC visando realização da microscopia.....	45
Figura 15 - Amostras cortadas com dimensões adequadas para serem cortadas no micrótomo.....	45
Figura 16 - Equipamento micrótomo Laica do LaMEM a) Equipamento; b) Detalhe do equipamento cortando a amostras.....	45
Figura 17 - Amostras com cortes finais realizados pelo micrótomo nas madeiras de a) Marupá; b) Pequiá.....	46
Figura 18 - Montagem das lâminas para análise em microscópio ótico	46
Figura 19 - Microscópio SteREO Discovery.V8.....	47
Figura 20 - Corpo de prova de Marupá	48
Figura 21 - Valores médios do E_M em função do N_c para a madeira de Marupá na frequência de 1Hz	49
Figura 22 - Valores médios do E_M em função do N_c para a madeira de Marupá	

na frequência de 2Hz	50
Figura 23 - Gráfico de dispersão do E_M em função do Log N_c da madeira de Marupá com frequência de 1 Hz com linha de tendência linear	51
Figura 24 - Gráfico de dispersão do E_M em função do Log N_c da madeira de Marupá com frequência de 2 Hz com linha de tendência linear	52
Figura 25 - Corpo de prova de Pequiá	52
Figura 26 - Valores médios do E_M em função do N_c para a madeira de Pequiá na frequência de 1Hz	54
Figura 27 - Valores médios do E_M em função do N_c para a madeira de Pequiá na frequência de 2Hz	54
Figura 28 - Gráfico de dispersão do E_M em função do Log N_c da madeira de Pequiá com frequência de 1 Hz com linha de tendência linear	55
Figura 29 - Gráfico de dispersão do E_M em função do Log N_c da madeira de Pequiá com frequência de 2 Hz com linha de tendência linear	56
Figura 30 - Microscopia 12,5x das espécies a) Marupá, frequência de 1 Hz; b) Marupá, frequência de 2 Hz; c) Pequiá, frequência de 1 Hz; d) Pequiá, frequência de 2 Hz.....	57
Figura 31 - Microscopia 40x das espécies a) Marupá, frequência de 1 Hz; b) Marupá, frequência de 2 Hz; c) Pequiá, frequência de 1 Hz; d) Pequiá, frequência de 2 Hz.....	58

LISTA DE FIGURAS SUPLEMENTARES

Figura S 1 - Valores médios de f_M em função do N_c da madeira de Marupá na frequência de 1 Hz	67
Figura S 2 - Gráfico de dispersão do f_M em função do $\text{Log } N_c$ da madeira de Marupá com frequência de 1 Hz com linha de tendência linear	67
Figura S 3 - Valores médios de f_M da madeira de Marupá na frequência de 2 Hz	68
Figura S 4 - Gráfico de dispersão do f_M em função do $\text{Log } N_c$ da madeira de Marupá com frequência de 2 Hz com linha de tendência linear	68
Figura S 5 - Valores médios de f_M da madeira de Pequiá na frequência de 1 Hz	69
Figura S 6 - Gráfico de dispersão do f_M em função do $\text{Log } N_c$ da madeira de Pequiá com frequência de 1 Hz com linha de tendência linear	70
Figura S 7 - Valores médios de f_M da madeira de Pequiá na frequência de 2 Hz	70
Figura S 8 - Gráfico de dispersão do f_M em função do $\text{Log } N_c$ da madeira de Pequiá com frequência de 2 Hz com linha de tendência linear	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões e teor de umidade dos corpos de prova de Marupá.	48
Tabela 2 - Resultados obtidos nos ensaios de flexão estática para madeira de Marupá.	49
Tabela 3 - Dimensões e teor de umidade dos corpos de prova de Pequiá.	53
Tabela 4 - Resultados obtidos no ensaio de flexão estática para madeira de Pequiá.	53
Tabela 5 - Valores médios da espessura da linha de cola.	58

LISTA DE TABELAS SUPLEMENTARES

Tabela S 1 - Valores médios de resistência convencional à flexão para madeira de Marupá.	66
Tabela S 2 - Valores médios de resistência convencional à flexão para madeira de Pequiá.	69

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

MLC - Madeira Lamelada Colada

RFF - Resorcinol-fenol-formaldeído

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores

USP - Universidade de São Paulo

LaMEM - Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira

SET - Departamento de Engenharia de Estruturas

EESC - Escola de Engenharia de São Carlos

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

LISTA DE SÍMBOLOS

N_c - Números de ciclos

E_M - Módulo de elasticidade

$\log N_c$ - Logaritmo do número de ciclos

f_M - Resistência convencional à flexão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	24
2. OBJETIVOS	28
2.1 Objetivo geral	28
2.2 Objetivos específicos	28
3. JUSTIFICATIVA	29
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	30
4.1 ASPECTOS GERAIS DA ANATOMIA DA MADEIRA	30
4.1.1 Aspectos gerais.....	30
4.2 INSUMOS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE MLC	33
4.2.1 Cadeia produtiva da MLC.....	33
4.2.2 Processo produtivo da Madeira Lamelada Colada.....	34
4.4 ALUSÕES A ESTUDOS JÁ REALIZADOS NO QUE SE REFERE À FADIGA DA MADEIRA "SÓLIDA"	36
4.5 CONCLUSÃO REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	39
5.1 Material.....	39
5.1.1 Espécies de madeiras utilizadas na pesquisa	39
5.1. 2 Adesivo e montagem das peças de MLC	40
5.2 Métodos.....	42
5.2.1 Planejamento	42
5.2.2 Ensaio de flexão estática e forças cíclicas	43
5.2.3 Preparo de amostras para análise microscópica.....	44
5.2.4 Técnica microscópica empregada.....	47
5.2.5 Análise estatística	47
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
6.1 Madeira de Marupá	48
6.1.1 Descrição dos corpos de prova	48
6.1.2 Ensaio de flexão estática e forças cíclicas	48
6.2 Madeira de Pequiá	52
6.2.1 Descrição dos corpos de prova	52
6.2.2 Ensaio de flexão estática e forças cíclicas	53
6.3 Análise da microscopia.....	57

7. CONCLUSÕES	60
8. TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS.....	62
APÊNDICE	66

1. INTRODUÇÃO

A madeira lamelada colada (MLC) tem as propriedades típicas da madeira maciça: peso leve, baixa relação peso/resistência, flexibilidade, diversidade de formas para os elementos estruturais e fácil processamento. Além disto, é caracterizada pela facilidade de moldagem em seções em comparação à madeira maciça, e garantem alta resistência sob ações estáticas e dinâmicas. A MLC, é utilizada especialmente para estruturas de suporte de carga, como estruturas de cobertura, pontes e passarelas, é colada com resina de resorcinol-fenol-formaldeído (RFF), melamina-ureia-formaldeído (MUF) ou poliuretano a base de mamona (PUR) (MIRSKI *et al.*, 2020).

Na atualidade, a MLC é um produto conceituado internacionalmente e um dos mais versáteis e eficientes em aplicações estruturais. A MLC apresenta algumas vantagens, como permitir o uso de madeira de reflorestamento, ou até mesmo substituir espécies nativas por madeira tropical certificada. Ademais, as dimensões das peças não se limitam ao diâmetro do tronco, tornando as estruturas de madeira cada vez mais competitivas (BOURSCHEID; TEREZO, 2020).

Quando empregada em estruturas bem projetadas e aliada a manutenções preventivas regulares, a madeira apresenta-se como um material estrutural com características que concorrem diretamente com a maioria dos outros materiais convencionais aplicados para resolver questões de ciência aplicada em diversos ramos da construção civil. (MASCIA *et al.*, 2018).

O Brasil, em particular, é um país com diversidade e disponibilidade de madeira e, devido às reservas de flora tropical (madeira certificada), ou reflorestamento em grande escala, o uso de madeira para fins estruturais é mais do que desejável. Conforme o relatório IBÁ (2022), a área total de árvores plantadas em 2021 foi de 9,33 milhões de hectares, sendo 1,26 milhões de hectares no estado de São Paulo.

A partir das áreas certificadas do setor florestal no país, em especial da Floresta Tropical, é perceptível uma crescente disponibilidade de madeira oriunda de espécies de baixa e média densidade no mercado, o que representa expressivo potencial para emprego na produção de MLC. Desta forma, espécies com alta durabilidade natural já conhecidas no âmbito das aplicações estruturais estão sendo gradativamente substituídas por espécies de rápido crescimento,

conforme evidenciado por Almeida *et al.* (2023) e Araújo *et al.* (2023).

Em geral, há lacunas de informações técnicas sobre o comportamento da madeira ao longo do tempo, sendo necessário um melhor conhecimento dessas espécies para garantir a durabilidade da madeira aplicada em estruturas (LOPES *et al.*, 2017).

Muitas espécies com potencial comercial precisam ser minuciosamente investigadas antes que possam ser utilizadas em todas as áreas da economia e estudar suas propriedades físicas e mecânicas, o que possibilitaria seu aproveitamento mais racional, levando em conta também seu desempenho ao longo da vida útil prevista para as diferentes aplicações (MARTINS *et al.*, 2017).

A maioria das estruturas de engenharia está sujeita a cargas, geralmente variáveis no tempo, embora possam ser consideradas, de início, ações estáticas. Outras são submetidas diretamente a forças cíclicas ao longo do tempo, quando passam por variações de amplitude não previsíveis, situação que pode comprometer significativamente o desempenho durante a vida útil da estrutura (BADO; CASAS, 2021).

Portanto, o estresse mecânico da madeira exigida em diferentes situações é determinado por variáveis, muito importantes para realizar a análise estrutural, tais como: frequência de aplicação, diferenciação de intensidade da força e tempo de permanência. A madeira se deforma quando é submetida a forças cíclicas remanescentes, e que ocorre durante longo período após a interrupção da aplicação de força, um fenômeno chamado fadiga (PALMA; STEIGER, 2020).

Diante de um cenário tão promissor, existem alguns aspectos de comportamentos relacionados à madeira que não são objetos de pesquisas conclusivas, mas são importantes para melhor aproveitamento estrutural da madeira e esse é o caso da fadiga.

A NBR 7190/2022 não menciona quaisquer alterações nas propriedades mecânicas em decorrência do fenômeno fadiga, apesar da potencial influência em vários aspectos de projetos estruturais, como nas peças sujeitas à flexão e às ligações solicitadas por forças dinâmicas indicado por um círculo amarelo na Figura 1, sejam elas constantes (cíclica) ou variantes ao longo do tempo.

Figura 1 - Detalhe de uma ligação executada com pinos metálicos em que ocorrem forças dinâmicas

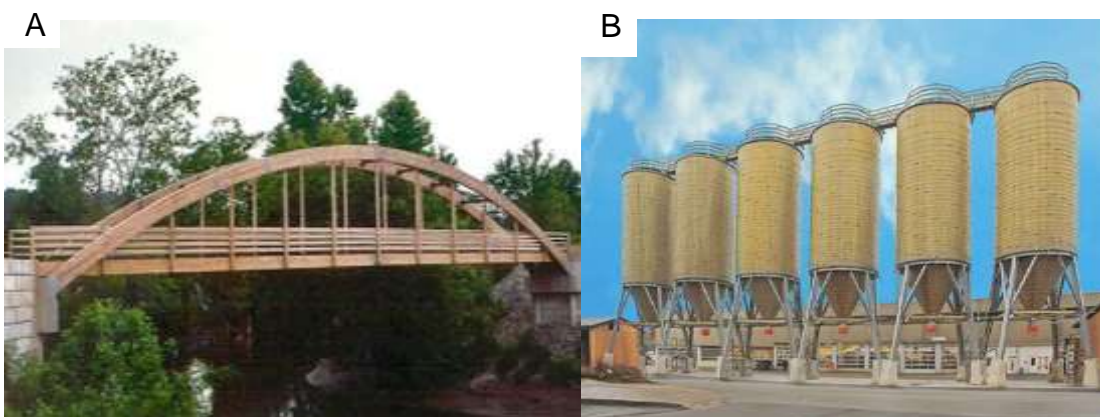


Fonte: <https://www.discoverlivesteam.com/magazineold/IMG_1932.JPG>

Este carregamento dinâmico também pode ser visto em pontes. Ao longo do tempo, essas ações repetidas em diferentes frequências e números de ciclos produzem o efeito fadiga, cujas consequências podem se configurar em patologias significativas, as quais podem comprometer o desempenho estrutural ao longo do tempo.

Portanto, o conhecimento do desempenho em fadiga é necessário e fundamental, pois os componentes estruturais da MLC são submetidos a forças cíclicas durante sua vida útil, como transporte de veículos em pontes, circulação de produtos em silos, efeitos do vento nas estruturas do telhado (Figura 2). Tais, exemplos se constituem em algumas das muitas referências de aplicações da MLC nos diferentes campos de aplicação do produto na construção civil, seja no país, seja internacionalmente.

Figura 2 - Figuras mostrando a) Ponte de MLC; b) Silos; c) Cobertura; d) Passarela de MLC





Fonte:A) <[http://madeiralaminadacolada.com/aplicacoes.php#!prettyPhoto\[gallery\]/37/](http://madeiralaminadacolada.com/aplicacoes.php#!prettyPhoto[gallery]/37/)>;
B)<<https://www.directindustry.fr/prod/holten-gmbh-co-kg/product-90461-1356579.html>>;
C)<[http://madeiralaminadacolada.com/aplicacoes.php#!prettyPhoto\[gallery\]/17/](http://madeiralaminadacolada.com/aplicacoes.php#!prettyPhoto[gallery]/17/) >
D)<<http://www.madeiratotal.com.br/palestra-do-engenheiro-civil-guilherme-stamato-em-santa-catarina-vai-apresentar-possibilidades-do-uso-estrutural-da-madeira-na-construcao-de-pontes/>>

As forças dinâmicas desempenham um papel importante no estudo da fadiga em elementos estruturais. De acordo com SEGUNDINHO (2010), VAŠKOVÁ; PONIŠTOVÁ; FOJTÍK (2017), ŠURDILOVIĆ (2022) a simples caminhada produz forças dinâmicas variáveis no tempo com componentes apontando em várias direções, com múltiplas frequências geradas pela aceleração e desaceleração da massa corporal, que pode variar de 0,7Hz a 2,44Hz. Os autores afirmam ainda que as passarelas são elementos estruturais com alto potencial de sofrer vibrações excessivas como resultado do efeito dinâmico da ação dos pedestres. Além de causar desconforto aos usuários (estado limite de utilização), eles também são responsáveis por causar a fadiga dos elementos estruturais ao longo do tempo, resultando em alterações em suas propriedades físicas e mecânicas.

Diante do exposto, a avaliação do comportamento de peças de MLC sob fadiga é o foco principal desta pesquisa, tratando-se de abordagem original de tópico relevante para viabilizar os adequados procedimentos - em nível de projeto - dos referidos elementos estruturais.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência das forças cíclicas sobre a rigidez do produto MLC quando os elementos estruturais estão submetidos à flexão.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos listados abaixo, foram realizados para alcançar o objetivo geral.

- Confeccionar os elementos de MLC;
- Realizar o ensaio de flexão estática nos elementos de MLC;
- Realizar o ensaio de flexão com aplicação de forças cíclicas;
- Analisar o comportamento da linha de cola nos elementos de MLC;
- Comparar e analisar os dados estatisticamente.

3. JUSTIFICATIVA

Como o Brasil é um país com elevado potencial madeireiro quando se trata de madeira de grandes reservas tropicais, ou de enormes áreas de reflorestamento, devido ao expressivo déficit de pontes no país e levando em conta que o fenômeno de fadiga reflete na durabilidade e vida útil dos elementos estruturais, evidencia-se a necessidade de estudo para analisar o comportamento da madeira aplicada na construção de pontes, passarelas e estruturas de cobertura, de maneira geral.

Desta forma, o nível de precisão do projeto será melhorado, o que resultará em estruturas com vida útil mais extensa e, igualmente importante, com maior confiabilidade.

Para utilização da MLC, como elementos estruturais é preciso analisar o comportamento da mesma sob todas as condições em que tais elementos serão solicitados. A questão aqui focada é: qual seria o dano causado na linha de cola após a solicitação de forças cíclicas?

O conhecimento de tais características, ainda uma incógnita na área do conhecimento em que a pesquisa se insere, é de fundamental importância para prever com segurança o comportamento das estruturas de MLC quando submetidas a forças cíclicas.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 ASPECTOS GERAIS DA ANATOMIA DA MADEIRA

4.1.1 Aspectos gerais

A madeira é utilizada há milhares de anos como matéria-prima renovável e de engenharia e tem sido utilizada para processamento de madeira em práticas artesanais e industriais devido ao seu peso leve, usinabilidade, boas propriedades mecânicas, sustentabilidade, estética e adequação técnica para processamento de madeira em práticas artesanais e industriais (ERMEYDAN et al., 2014). Além disso, a madeira pode ser tratada para resistir à deterioração e com técnicas de construção e revestimentos adequados, a madeira pode durar centenas de anos. Devido à sua sustentabilidade, a madeira continua a ter um impacto significativo e é cada vez mais utilizada em edifícios, pontes, guarda-corpos, travessas, coberturas, móveis e embalagens.

As propriedades físicas da madeira descrevem as características quantitativas da madeira e seu comportamento a influências externas, não as forças aplicadas. Estes incluem adsorção, permeabilidade, densidade, estabilidade dimensional, propriedades térmicas, propriedades acústicas e elétricas, durabilidade natural e resistência química. Essas características podem afetar significativamente as propriedades e a resistência da madeira usada em aplicações estruturais (JONES; BRISCHKE, 2017).

A porosidade da madeira é um parâmetro importante que afeta significativamente não apenas as propriedades do material, como fluxo, permeabilidade, adsorção e impregnação, mas também a condutividade térmica e resistência à tração e flexão (PLOTZE; NIEMZ, 2011).

A permeabilidade da madeira é a susceptibilidade do material ao umedecimento e a sua capacidade de permitir a passagem do líquido através dele. Essa propriedade é importante, entre outras, para os processos de impregnação (na preservação da madeira) e construção. Os principais fatores de determinação da susceptibilidade à permeação incluem a anatomia da madeira, a zona de seção do tronco (alburno, cerne), a direção anatômica e a pressão do líquido (JONES; BRISCHKE, 2017).

Na atualidade, a madeira lamelada colada é produzida a partir de madeira serrada. Produtos de madeira engenheirada feito de madeira macia (softwood)

normalmente tem menor densidade do que madeira dura (hardwood), sendo assim, tem menor rigidez e resistência (EHRHART; BRANDNER, 2018).

A rigidez está relacionada à capacidade de um material resistir à deformação e também é um indicador da capacidade do material de manter sua forma original quando sob tensão, enquanto a resistência está relacionada à capacidade de um material suportar uma carga sem falhar. É uma medida da força que a madeira pode suportar antes de atingir seu ponto de ruptura.

A alta densidade geralmente está associada a maior resistência e rigidez, tal como aumento da retratibilidade da madeira diante das mudanças de umidade (MARRA, 1992). Maior densidade da madeira também significa menos porosidade e maior espessura da parede celular, portanto, menos penetração do adesivo, o que resulta em uma ligação mais fraca. Por esta razão, acredita-se geralmente que a madeira de alta densidade tende a ter desempenho de adesão inferior (DUGMORE et al., 2019).

4.1.2 Anatomia da madeira

A estrutura anatômica das coníferas é relativamente simples, composta de raios, traqueídeos e canais de resina. Os traqueídeos são tubos longos e estreitos que possuem extremidades fechadas as quais podem preencher até 95% do volume da madeira (SANDBERG *et al.*, 2021). O comprimento médio dos traqueoides axiais varia entre 2-5 mm. Além disso, pode ocorrer variação dependendo da espécie, idade da árvore e localização das células no tronco (SCHMITT *et al.*, 2023).

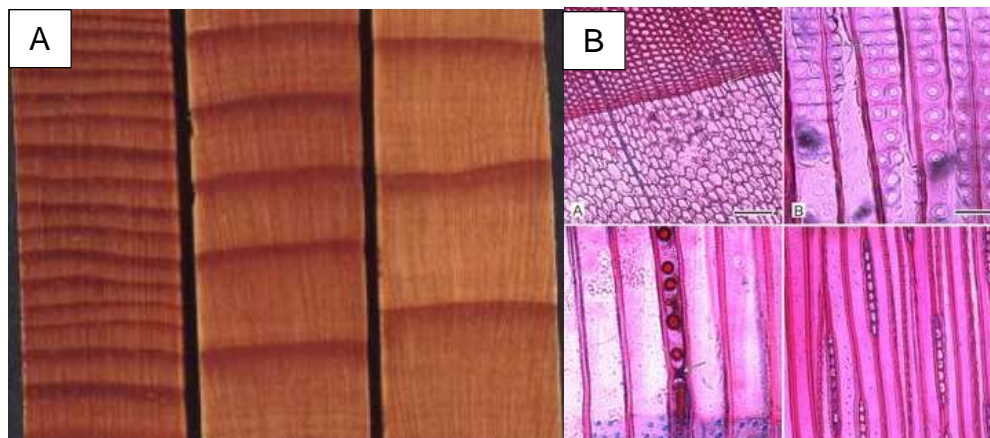
Quando formados pelo câmbio, os elementos celulares apresentam curta longevidade, com a perda do conteúdo celular. Quando isso ocorre, os elementos tornam-se tubos ocos de paredes lignificadas, os quais têm como funções a condução e sustentação do lenho (HARDTKE, 2023). A circulação de líquidos extraídos do solo pelas raízes nas regiões periféricas do alburno depende das paredes das células com pontoações areoladas, pelas quais ocorre a transferência de líquidos de uma célula para outra (KELLOMAKI, 2022).

Os raios ou células parenquimáticas apresentam paredes relativamente finas, em geral, não lignificadas, e pontoações simples. Os raios possuem largura e comprimentos variáveis e se estendem radialmente no lenho, em sentido perpendicular aos traqueídeos, cuja função é armazenar, transformar e

conduzir transversalmente substâncias nutritivas (SANDBERG *et al.*, 2021). O parênquima radial tem como função armazenar, transformar e conduzir substâncias nutritivas.

Na Figura 3 é possível observar a microestrutura da madeira de gimnospermas, também conhecidas como coníferas.

Figura 3 - Madeiras de árvores de Coníferas (Gimnospermas) A) macroscópica; B) microscópica



Fonte:(A)<<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/introduengmad/coniferaxfolhosa.pdf>>(B) SIEGLOCH; MARCHIORI, 2015.

As folhosas possuem tecidos mais especializados e estrutura mais complexa do que as coníferas. Apresentam maior número de tipos de células em sua composição. Dentre estas, os vasos desempenham a função de condução, enquanto as fibras são responsáveis pela sustentação (CHEN *et al.*, 2020).

Os vasos são um conjunto axial de elementos vasculares, que formam uma estrutura tubular contínua, de comprimento variável, os quais possuem capacidade de conduzir líquidos de forma ascendente (SANDBERG *et al.*, 2021). As fibras são células alongadas com parede secundária lignificada e possuem função de sustentação. As fibras representam a maior parte do lenho das folhosas e sua porção no volume total e a espessura de suas paredes influenciam diretamente na densidade e nas propriedades mecânicas da madeira (JAKOB *et al.*, 2022).

Na Figura 4 é possível observar a microestrutura da madeira de angiospermas dicotiledôneas, também conhecidas como folhosas.

Figura 4 – Microestruturas de madeiras de árvores Dicotiledôneas, Angiospermas



Fonte: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/introduengmad/coniferaxfolhosa.pdf>>

4.2 INSUMOS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE MLC

4.2.1 Cadeia produtiva da MLC

Entende-se por cadeia produtiva um conjunto de atividades e etapas consecutivas pelos quais os insumos passam por transformações e são transferidos desde a pré-produção até o consumo final de um bem ou serviço (LEITE; SANTOS; DO VALLE, 2017).

Segundo Polzl *et al.* (2003) a cadeia produtiva da madeira reúne as atividades relativas à madeira e seus derivados. Caracteriza-se pelo conjunto de atividades que asseguram a produção, da colheita à transformação da madeira até o estágio onde esta última, por associação de seus derivados a outros materiais, perde a característica de constituinte essencial do produto. Os autores ainda afirmam que o estudo da cadeia produtiva deve incluir a caracterização das empresas ou fabricantes, os seus processos internos e análises frente ao mercado.

A Figura 5 representa o esquema da cadeia produtiva da madeira lamelada colada, que é a disponibilidade florestal e identificação dos polos de matéria-prima para a produção de peças serradas e o processo produtivo de peças de MLC.

Figura 5 - Síntese da cadeia produtiva de peças em madeira lamelada colada



Fonte: A autora (2023).

4.2.2 Processo produtivo da Madeira Lamelada Colada

Segundo a norma NBR 7190-1 (ABNT, 2022a), entende-se que madeira lamelada colada (MLC) para fins estruturais são: peças de madeira engenheirada em processo industrializado de fabricação, composta de lamelas coladas umas às outras e dispostas com as fibras paralelas ao eixo longitudinal da peça final.

Algumas recomendações apresentadas pela norma:

- Evitar a composição de um mesmo elemento de MLC com espécies diferentes, ou que apresentem diferentes coeficientes de retração. As lamelas devem ter densidade aparente entre $0,40 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,75 \text{ g.cm}^{-3}$, para um teor de umidade de 12 %.
- Na produção de MLC as lamelas devem passar por um processo de preservação para que garanta uma durabilidade e proteção biológica.
- O teor de umidade das lamelas devem ser o mais homogêneo possível; as tábuas utilizadas na produção de MLC devem estar secas e com no máximo 18% de teor de umidade.
- Antes de iniciar o processo de produção, as lamelas devem se adequar às classes nas classes de resistência. As tábuas devem passar por uma classificação visual (nós e grã), e pelo módulo de elasticidade de acordo com a NBR 7190-2 (ABNT, 2022b).
- Os adesivos utilizados na produção de MLC devem ser estruturais e apresentar propriedades compatíveis às condições ambientais a que os elementos estruturais são submetidos durante toda a sua vida útil.

A qualidade do produto final dependerá de várias etapas do processo de fabricação. As propriedades de resistência e rigidez dos componentes MLC devem ser garantidas pelo fabricante por meio do controle de qualidade de cada componente do processo.

O processo produtivo de peças de MLC pode ser dividido nas seguintes etapas: (a) recebimento e estocagem dos lotes de madeira, com verificação do teor de umidade e classificação da madeira; (b) desengrosso das peças e eliminação dos defeitos encontrados; (c) execução e colagem das emendas do tipo *finger joint*; (d) laminação das tábuas (aparelhamento, colagem das faces e prensagem) prensadas por 24 horas com pressão que pode variar 0,7 a 1,2 MPa dependendo da densidade da madeira e (e) fabricação das peças de MLC (aparelhamento, usinagem, acabamento final, estocagem das peças).

4.3 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA FADIGA DE MATERIAIS

A resistência pode ser definida como a capacidade de um determinado material resistir uma força ou carga externa que tende a mudar seu tamanho e forma. As propriedades mecânicas da madeira e de derivados à base de madeira são adquiridas pelas respostas destes quando submetidos a uma dada tensão, manifestando a sua capacidade de desenvolverem deformações reversíveis, irreversíveis e de resistirem à fratura (MELO; DEL MENEZZI, 2010). Para Bodig e Jayne (1993), a resistência mecânica da madeira depende de a resistência do material ser comprimido, fletido ou tracionado sob carga, e podendo ocorrer deformação elástica (mudança transitória e reversível) ou deformação plástica dependente do tempo de residência da carga (irreversível).

Ao combinar características elásticas e plásticas, a madeira e seus derivados são classificados como materiais viscoelásticos. A resiliência da madeira diz respeito à sua capacidade de retornar à forma original após a remoção da carga. A madeira tem a capacidade de se deformar sem romper, mesmo após encolhimento ou estiramento. As propriedades elásticas dos sólidos são observadas somente quando a carga aplicada fica abaixo do limite proporcional. No entanto, exceder esse limite resulta em deformação plástica irreversível, seguida de falha do material. Quando a madeira está sob tensão ou pressão uniforme, sofre deformação ao longo do tempo em resposta a cargas sustentadas (fluência) ou repetidas (fadiga). Isso pode levar à diminuição da

resistência ao longo do tempo. (MELO; DEL MENEZZI, 2010).

O limite de resistência e comportamento elástico da madeira varia não apenas entre as espécies, mas também dentro do mesmo indivíduo, dependendo do local de coleta (BRAZ *et al.*, 2013; JAKOB *et al.*, 2022). Na fase elástica a deformação é reversível, ou seja, quando a carga é removida, a madeira volta lentamente ao estado inicial. Deve-se lembrar que não há material totalmente elástico com deformação mínima após a suspensão da carga mesmo na fase elástica.

Com aumento na eficácia de materiais compósitos, como por exemplo a MLC em componentes estruturais, é possível oferecer numerosas vantagens, como alta rigidez, resistência à fadiga superior e potencial de economia de peso. Entretanto, os laminados compósitos são suscetíveis a danos por delaminação devido à sua baixa resistência interlaminar na direção da espessura (JAGANNATHAN; CHANDRA; MANJUNATHA, 2015). Além disso, durante a operação, o dano de delaminação é propagado pelo carregamento de fadiga, afetando a vida útil do componente. Por isso, o dano depende da capacidade do componente manter sua integridade e funcionalidade na presença de defeitos ou danos subcríticos. Então é fundamental compreender o início da lesão e crescimento de delaminação para prever com precisão a vida útil do componente e manter período de manutenção seguro. O teste de fadiga geralmente é realizado para avaliar a delaminação (BRUNNER *et al.*, 2013; CARRERAS *et al.*, 2017; JONES; HU; KINLOCH, 2015).

4.4 ALUSÕES A ESTUDOS JÁ REALIZADOS NO QUE SE REFERE À FADIGA DA MADEIRA "SÓLIDA"

Os pesquisadores Lewis e Asce (1960), foram uns dos primeiros a apresentar trabalhos sobre fadiga aplicado ao material madeira, no qual foi explicada a curva para relacionar a tensão atuante *versus* o número de ciclos (curva σ -N) para quantificar o fenômeno.

Tsai e Ansell (1990) investigaram o comportamento de fadiga da madeira considerando repetidos e invertidos carregamentos sob flexão de quatro pontos. Os autores observaram que a fadiga é menor com carregamento reverso, diminuindo com o aumento do nível de reversão de tensão. Verificaram também que a umidade influencia negativamente a vida em fadiga, diminuindo a

resistência estática e acelerando o processo de dano por fadiga, e concluíram que a vida em fadiga é quase independente da espécie de madeira quando normalizada por sua resistência estática.

Karenlampi, Tynjala, Strom (2002) investigaram o comportamento mecânico dinâmico da madeira de abeto, tratada a vapor a 101°C. Os corpos de prova foram submetidos a carregamento de fadiga compressiva fora do eixo em deformação unidirecional. Foram descritos os arranjos experimentais e, depois, foi relatado a evolução da deformação compressiva e o curso das cargas compressivas cíclicas.

Yildirim *et al.* (2015) investigaram o comportamento à fadiga e a resistência estática de madeira de pinheiro escocês e faia usando um equipamento de teste de flexão de três pontos. Os testes de fadiga foram realizados em níveis de tensão de 80, 70, 60, 50 e 40% em relação à resistência estática final do material. Observou-se que a vida em fadiga diminui à medida que o nível de estresse aumenta e vice-versa. Eles também verificaram que a resistência à fadiga da faia é maior do que o pinheiro escocês: as tensões de projeto permitidas para faia e pinheiro escocês podem ser definidas em níveis de tensão de 50 e 40%, respectivamente.

No Brasil um dos trabalhos mais relevante na área é o de Guimarães *et al.* (2012), na qual o objetivo foi avaliar o efeito do carregamento cíclico em relação às propriedades mecânicas na flexão estática e na constante elástica em 4 espécies de madeiras: *Dipteryx odorata*, *Pouteria guianensis*, *Cedrelinga catenaeformis* e *Tectona grandis*. Foi feita uma comparação com a avaliação dos módulos de elasticidade obtidas pelo uso de ultrassom devido à ausência de uma normalização brasileira na área. Para a realização dos ensaios tiveram como base as orientações obtidas junto à norma D143-94 da *American Society for Testing and Materials* tendo-se mostrado adequados para avaliação do problema proposto.

Para essas madeiras de quatro espécies florestais citada acima, as dimensões nominais de 2,5 cm x 2,5 cm de seção e 41 cm de comprimento, a uma frequência de 0,4 Hz e número de ciclos foram de 40.000 e 100.000 e força em flexão a 40% do módulo de ruptura (f_M).

Verificou-se que a utilização de uma frequência, número de ciclos e carga aplicada baixos não resultou em diminuição das características de resistência à

flexão estática.

Portanto, constata-se que a questão relativa à fadiga continua sem solução, resultando, como mencionado anteriormente, na ausência de diretrizes normativas que permitam considerar adequadamente o impacto da repetição das cargas nas propriedades físicas e mecânicas dos elementos estruturais feitos de madeira. Isso tem um efeito significativo no desempenho e na durabilidade desses elementos ao longo de sua vida útil, especialmente no caso de pontes e passarelas de madeira.

4.5 CONCLUSÃO REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É essencial destacar que a revisão bibliográfica revelou uma lacuna significativa e escassez de informação na literatura científica em relação aos estudos sobre forças cíclicas e o seu efeito sobre a madeira lamelada colada, sendo identificados poucos trabalhos específicos que abordam essa temática.

Menciona-se que foram utilizadas as seguintes bases de dados: Engineering Village, ScienceDirect e Researchgate, com algumas palavras-chave, e não foram encontrados trabalhos internacionais diretamente relacionados ao tema. Palavras-chave: Fatigue, Glulam.

A compreensão da resposta estrutural e da rigidez da madeira lamelada colada diante de forças cíclicas é de extrema importância para o projeto adequado e a utilização segura desse material em aplicações sujeitas a solicitações dinâmicas.

Nesse contexto, fica claramente comprovada a relevância de pesquisas como a aqui apresentada, com o intuito de colaborar para preencher essa lacuna de conhecimento e fornecer orientações mais precisas e confiáveis para a utilização da madeira lamelada colada em situações que envolvam forças cíclicas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Material

A madeira utilizada na pesquisa foi adquirida pela Universidade de São Paulo (USP) e todas as atividades foram conduzidas no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC).

As lamelas foram cortadas na marcenaria do LaMEM, no total de 32, com dimensões nominais de 45 × 2 × 1 cm (comprimento, largura e espessura, respectivamente) (Figura 6).

Figura 6 - Dimensões finais das lamelas (cm)

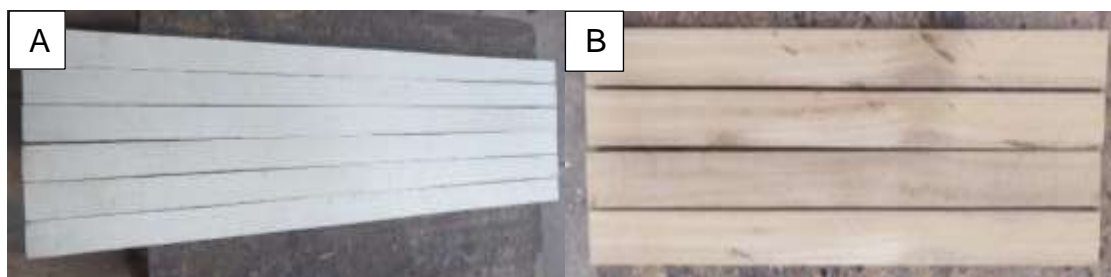


Fonte: A autora.

5.1.1 Espécies de madeiras utilizadas na pesquisa

As espécies de madeira utilizada neste estudo foram a Marupá (*Simarouba amara*) e a Pequiá (*Caryocar villosum*) (Figura 7). A escolha destas espécies se deve ao fato de que madeira do Marupá tem uma densidade aparente de 458 kg.m⁻³ e a madeira de Pequiá de média densidade aparente de 730 kg.m⁻³, de modo que estas densidades se encontram entre o limite superior (750 kg.m⁻³) e inferior (400 kg.m⁻³) recomendado pela norma NBR 7190-1 (ABNT, 2022a).

Figura 7 - Madeiras de a) Marupá; b) Pequiá



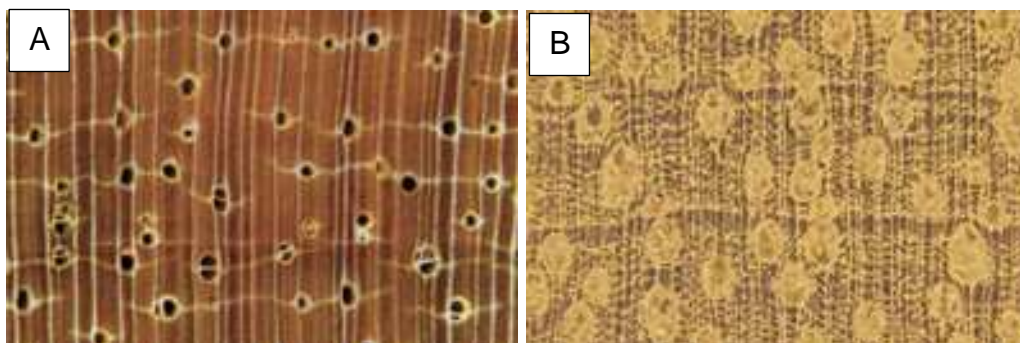
Fonte: A autora (2023).

A madeira de Marupá possui características anatômicas macroscópicas que favorecem a penetração do adesivo pelos seus raios devido à estratificação na sua face tangencial (2 por mm). Essa estratificação está relacionada com a

frequência uniforme de raios ao longo de sua face (Figura 8a).

A madeira de Pequiá possui características anatômicas macroscópicas que favorecem a penetração do adesivo pelos seus raios, que são muito numerosos; na face tangencial (Figura 8b).

Figura 8 - Fotomicrografia (10x) das madeiras de a) Marupá; b) Pequiá



Fonte: IPT (1983).

5.1. 2 Adesivo e montagem das peças de MLC

Na colagem das lamelas foi utilizado adesivo à base de fenol-resorcinol Cascophen RS-216-M (CASCO®, Hexion), disponível no LaMEM e usualmente empregado pela indústria do setor. O adesivo é composto por duas fases: uma líquida vermelha e uma sólida, em um pó marrom (Figura 9). Para aplicação do adesivo foi utilizada uma proporção de 5:1, sendo 5 partes do componente líquido e 1 parte do componente sólido.

Figura 9 - Aspecto físico do adesivo Cascophen RS-216-M

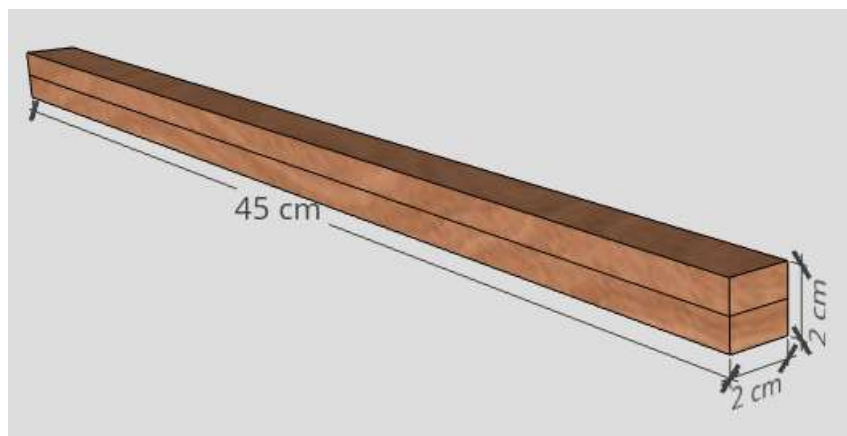


Fonte: A autora (2023).

As lamelas foram organizadas em pares, para sua colagem. Para a confecção de cada elemento de MLC foram unidas duas lamelas com as fibras paralelas entre si (Figura 10). Foram confeccionados um total de 16 elementos de MLC, sendo quatro de Marupá e quatro de Pequiá, para frequência de 1Hz e

quatro de Marupá e quatro de Pequiá, para frequência de 2Hz.

Figura 10 - Esquema da montagem dos elementos de MLC



Fonte: A autora (2023).

As lamelas foram coladas com gramatura de 300 g.m^{-2} por linha de cola dupla, sendo esta gramatura sugerida pelos fabricantes. Foi utilizado um pincel para poder distribuir o adesivo (Figura 11A) na superfície da madeira, e na sequência, as lamelas foram unidas e prensadas, durante 24 horas a uma pressão de 1 MPa (Figura 11B). Logo após a prensagem, os elementos foram retirados da prensa e mantidos no laboratório até a cura completa do adesivo. Em seguida, os elementos foram levados para marcenaria, onde foram aplainados para retirada do excesso de adesivo e ajustados nas dimensões finais de $2 \times 2 \times 45 \text{ cm}$ (altura \times largura \times comprimento) (Figura 11C).

Figura 11 - Adesivo e montagem dos elementos de MLC



Fonte: A autora (2023).

5.2 Métodos

5.2.1 Planejamento

O planejamento para realização da pesquisa seguiu as seguintes etapas:

- Separação das madeiras
- Confeção dos corpos de prova de MLC. Para cura completa do adesivo os corpos de prova ficaram 7 dias no laboratório.
- Realização de ensaios de flexão estática, forças cíclicas e microscopia.

No ensaio de flexão estática, a cada finalização de um ciclo proposto foram obtidos os módulos de elasticidade dos corpos de prova.

No ensaio de forças cíclicas, foram determinados os ciclos de 0, 10, 100, 1.000, 86.400, 172.800, 345.600, 691.200. A partir de 86.400 ciclos foi calculado o tempo que correspondia ao número de ciclos.

Para 1 Hz os tempos para cada ciclos são:

- 86.400 corresponde a 1 dia;
- 172.800 a 2 dias;
- 345.600 a 4 dias;
- 691.200 a 8 dias.

Para 2 Hz os tempos para cada ciclos são:

- 86.400 corresponde a 12 horas;
- 172.800 a 1 dias;
- 345.600 a 2 dias;
- 691.200 a 4 dias.

O cálculo feito para obter o tempo respectivo em dias para cada ciclo seguiu o exemplo:

$$86400 \text{ ciclos} / 60 \text{ min} = 1440 \text{ min}$$

$$1440 \text{ min} / 60 \text{ s} = 24 \text{ horas} = 1 \text{ dia.}$$

Na microscopia o corpo de prova permaneceu 5 horas em cozimento na panela de pressão para ser possível o corte com micrótomo.

5.2.2 Ensaio de flexão estática e forças cíclicas

Para o ensaio de flexão estática e forças cíclicas, foi utilizada Máquina de ensaios universal AMSLER e de ensaio forças cíclicas disponível no LaMEM (Figura 12 e 13).

Figura 12 - Máquina de ensaio universal AMSLER



Fonte: A autora (2023).

Figura 13 - Máquina de ensaios cíclicos



Fonte: A autora (2023).

O ensaio de flexão estática foi realizado conforme estabelecido pela NBR 7190-3 (ABNT, 2022c) nos 32 corpos de prova, com um vão livre de 42 cm. O módulo de elasticidade foi determinado a partir da Equação 1.

$$E_M = \frac{F \times L^3}{4 \times \delta \times b \times h^3} \quad (1)$$

Onde F representa a força obtida no ensaio de flexão associada ao deslocamento relativo ($\delta=L/200$), L é o comprimento útil da amostra (distância entre apoios) e b (base) e h (altura) são as dimensões da seção transversal das amostras.

A determinação do vão do ensaio, foi utilizada a norma NBR 7190-3 (ABNT, 2022c), que estabelece a utilização de um vão livre igual a 21 vezes a altura do corpo de prova.

Os valores do módulo de elasticidade na flexão (E_M), obtidos antes da aplicação cíclica das forças, foram utilizados como referência para a construção do gráfico do módulo de elasticidade pelo número de ciclos [$E_M \times N_c$]. Foram adotados os seguintes números de ciclos: de 0, 10, 100, 1.000, 86.400, 172.800, 345.600, 691.200, para frequências de 1Hz e 2Hz.

O ensaio de flexão estática a três pontos foi adaptado para condição não destrutiva, admitindo que o deslocamento na máquina de fadiga foi limitado, conforme a norma Brasileira NBR 7190/1997 (ABNT, 1997). A medida L/200 verifica o estado limite de utilização e foram utilizadas duas frequências distintas: 1 e 2Hz. Tal deslocamento garante a linearidade física e geométrica do material, comumente utilizada na determinação do MOE em ensaios não destrutivos, como nos trabalhos de Christoforo *et al.* (2017), Icimoto *et al.* (2015), Zangiácomo *et al.* (2014), Segundinho *et al.* (2013), e Lahr *et al.* (2017).

5.2.3 Preparo de amostras para análise microscópica

As amostras para análises de técnicas microscópicas foram preparadas a partir dos elementos de MLC, obtendo-se corpos de prova com dimensões aproximadas de 1 cm no máximo. Esta técnica permite analisar a microestrutura da linha de cola após os ensaios de forças cíclicas, a fim de analisar se ocorreu algum dano ao longo dos ensaios. A figura 14 mostra o corte realizado na MLC para obtenção do material visando a imagem microscópica da linha de cola.

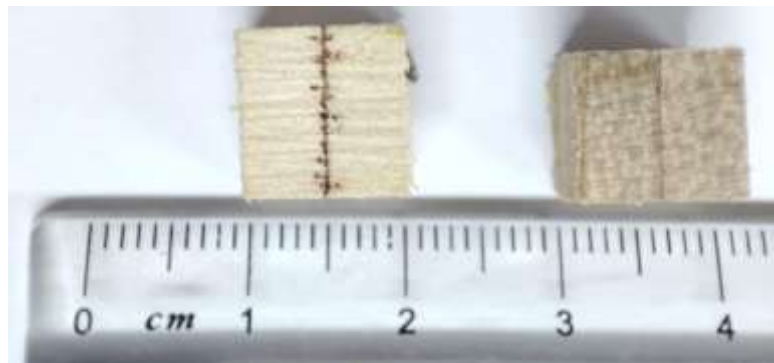
Figura 14 – Indicação da retirada da amostra no elemento de MLC visando realização da microscopia



Fonte: A autora (2023).

A partir do corpo de prova retirado da MLC, que tiveram dimensões compatíveis com o equipamento de microtomia, as dimensões nominais finais foram de aproximadamente 1cm x 1cm x 1cm. A figura 15 mostra os cortes finais das amostras a serem levadas ao micrótomo.

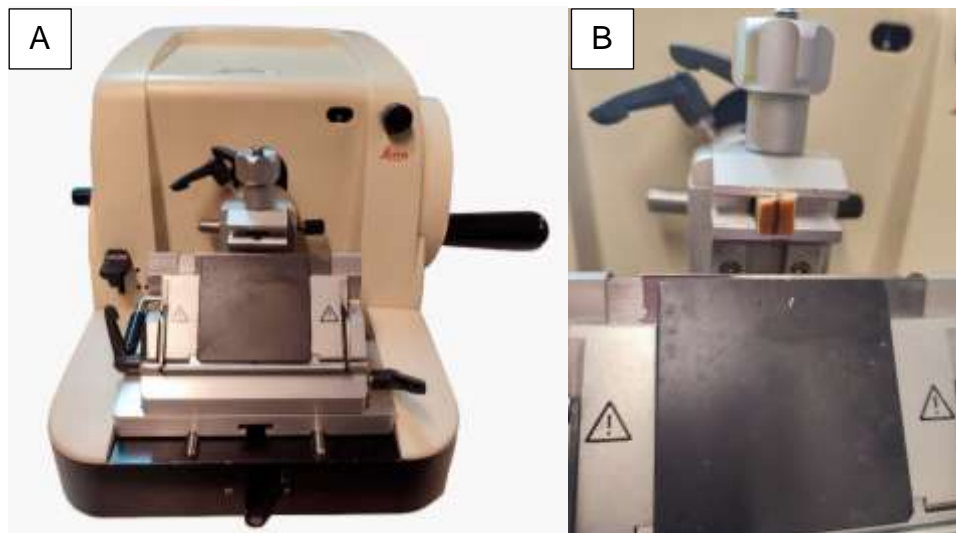
Figura 15 - Amostras cortadas com dimensões adequadas para serem cortadas no micrótomo



Fonte: A autora (2023).

A Figura 16 apresenta o micrótomo sendo utilizado para corte e preparação das amostras.

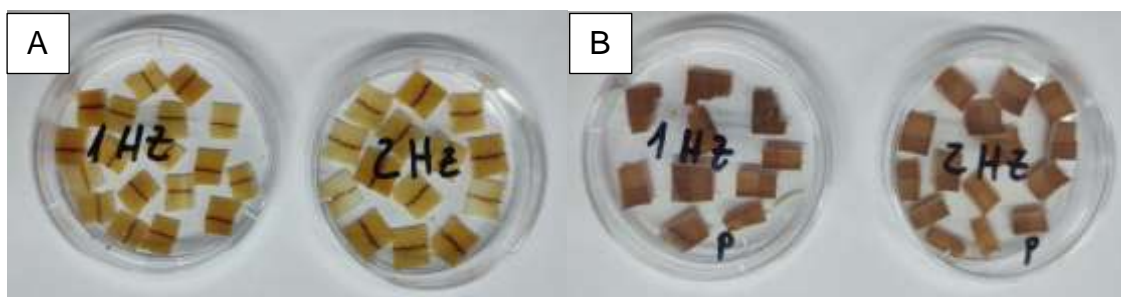
Figura 16 - Equipamento micrótomo Laica do LaMEM a) Equipamento; b) Detalhe do equipamento cortando a amostras.



Fonte: A autora (2023).

A Figura 17 ilustra os cortes finais realizados pelo micrótomo.

Figura 17 - Amostras com cortes finais realizados pelo micrótomo nas madeiras de a) Marupá; b) Pequiá



Fonte: A autora (2023).

As análises da linha de cola foram realizadas no microscópio óptico. A Figura 18 mostra a montagem das lâminas.

Figura 18 - Montagem das lâminas para análise em microscópio óptico



Fonte: A autora (2023).

5.2.4 Técnica microscópica empregada

Para análise das amostras foi utilizado o equipamento SteREO Discovery Estereomicroscópio (Figura 19), que é um instrumento óptico que permite a observação de amostras em três dimensões, em que se emite uma luz através da amostra e, em seguida, refletindo essa luz para os olhos do observador por meio de um sistema de lentes. A luz refletida cria uma imagem tridimensional da amostra, permitindo que o observador veja as estruturas em seus detalhes.

Figura 19 - Microscópio SteREO Discovery.V8



Fonte: A autora (2023).

5.2.5 Análise estatística

A análise estatística dos ensaios mecânicos foi conduzida sob o delineamento inteiramente casualizado. Os resultados obtidos foram analisados por meio de análise de variância e teste de comparação de médias, aplicando-se o teste de Tukey a 5% de significância.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Madeira de Marupá

6.1.1 Descrição dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios, foram ao total de oito corpos de prova, sendo quatro corpos de prova para a frequência de 1 Hz e quatro para a frequência de 2 Hz. Na Tabela 1 estão apresentados as dimensões dos corpos de prova (Figura 20) e as medidas do teor de umidade.

Figura 20 - Corpo de prova de Marupá



Fonte: A autora (2023).

Tabela 1 - Dimensões e teor de umidade dos corpos de prova de Marupá.

Frequência	CP	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Umidade (%)
1 Hz	1	448,0	21,26	23,92	12,23
	3	448,5	21,22	24,02	12,70
	10	447,0	21,06	24,64	12,69
	2	446,0	21,33	24,67	12,84
2 Hz	13	448,0	21,19	24,18	12,47
	6	448,0	20,88	24,35	12,36
	12	448,0	21,24	23,96	12,53
	4	449,0	20,95	23,78	12,36

Fonte: A autora (2023).

6.1.2 Ensaio de flexão estática e forças cíclicas

No ensaio de flexão estática, os oito (vigas) corpos de prova foram ensaiados para obter os módulos de elasticidade dos elementos de MLC, de acordo com os ciclos propostos na metodologia. A Tabela 2 mostra os valores médios do módulo de elasticidade (E_M) para a madeira de Marupá em função do

número de ciclos (N_c) e da frequência da fadiga.

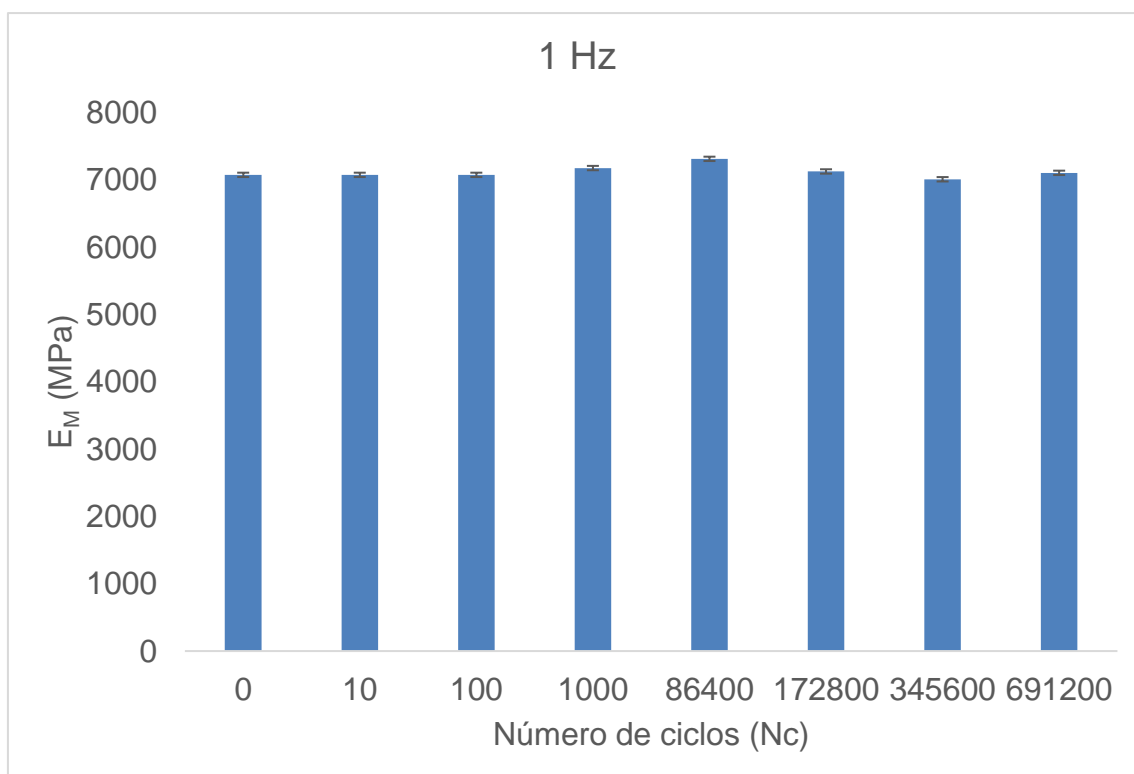
Tabela 2 - Resultados obtidos nos ensaios de flexão estática para madeira de Marupá.

FREQ.	NÚMERO DE CICLOS							
	0	10	100	1.000	86.400	172.800	345.600	691.200
1 Hz	7072,98	7072,98	7072,98	7174,02	7310,77	7123,65	7007,41	7102,98
2 Hz	7902,98	7902,98	7794,72	7902,98	7560,73	7891,19	7813,75	7653,25

Fonte: A autora (2023).

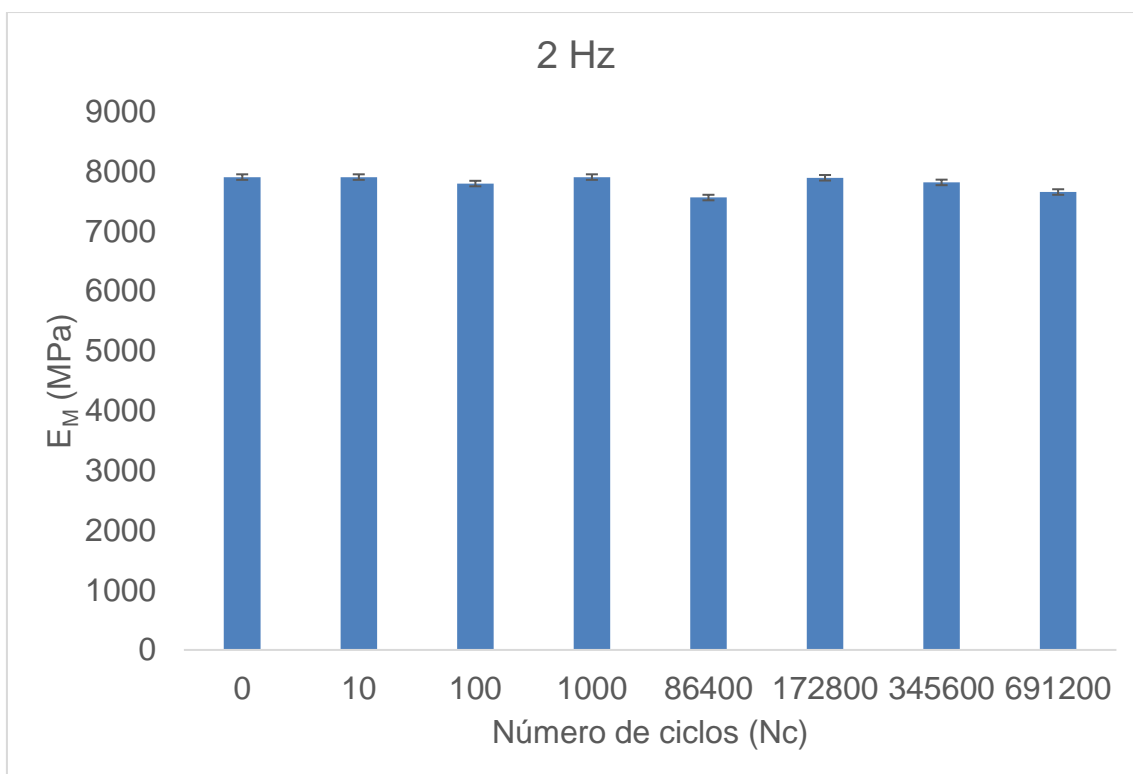
É possível perceber a variação dos valores médios do módulo de elasticidade (E_M) para madeira de Marupá em função do número de ciclos (N_c) e da frequência de 1 Hz (Figura 21) e de 2 Hz (Figura 22) na força cíclica.

Figura 21 - Valores médios do E_M em função do N_c para a madeira de Marupá na frequência de 1Hz



Fonte: A autora (2023).

Figura 22 - Valores médios do E_M em função do N_c para a madeira de Marupá na frequência de 2Hz



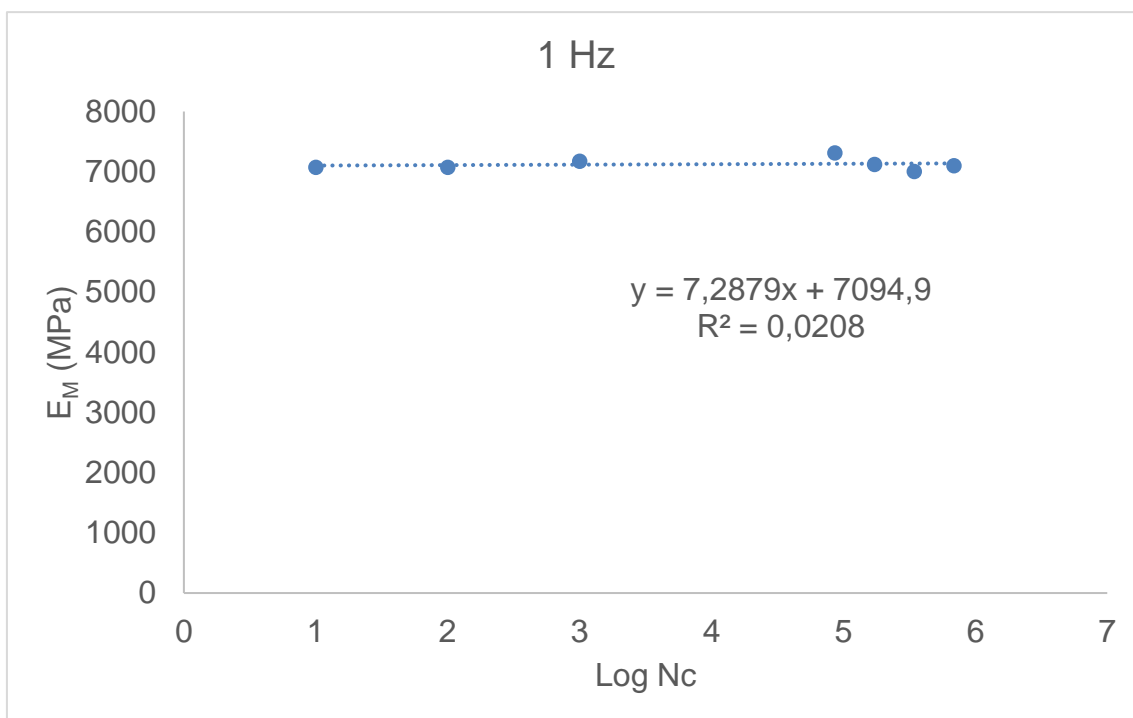
Fonte: A autora (2023).

Quanto à evolução da rigidez dos elementos de MLC em função do número de ciclos, foi observado que ocorreu uma pequena variação na rigidez, conforme exemplificado na Tabela 2 e nas Figuras 21 e 22. Essa variação da rigidez, é justificado principalmente pela reorganização na estrutura da madeira e também pela variação de umidade (GUIMARÃES *et al.*, 2012).

Resultados semelhantes foram encontrados por Macêdo (2000) para peças de madeira maciça e madeira com emendas dentadas, com espécie de *Pinus caribea hondurensis* e *Eucalyptus grandis*, dimensões nominais de 6 cm x 12 cm de seção e 130 cm de comprimento, frequências de 9 Hz, 5 Hz e 1 Hz e número de ciclos variando de 1.000 até 150.000; Carvalho *et al.* (2022) para madeira maciça de Caixeta, Cedroarana, Cambará, Tatajuba e Roxinho, dimensões nominais de 2 cm x 2 cm de seção e 28 cm de comprimento, frequências de 0,5 Hz e 1 Hz e número de ciclos: de 450, 4.500 e 45.000 e Guimarães *et al.* (2012) para madeiras de quatro espécies florestais (*Dipteryx odorata*, *Pouteria guianensis*, *Cedrelinga catenaeformis* e *Tectona grandis*), dimensões nominais de 2,5 cm x 2,5 cm de seção e 41 cm de comprimento, a uma frequência de 0,4 Hz e número de ciclos: de 40.000 e 100.000.

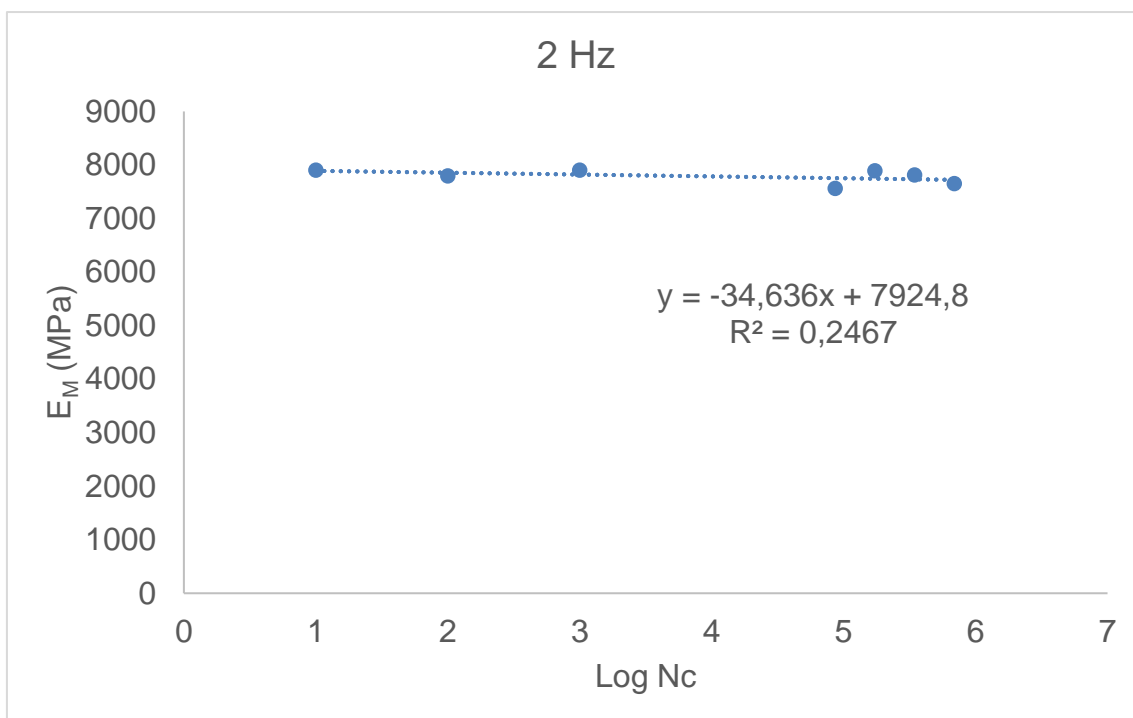
A partir dos gráficos de dispersão do módulo de elasticidade em função do número de ciclos da madeira de Marupá com frequência de 1 Hz (Figura 23) e 2 Hz (Figura 24), o valor de R^2 de 0,021 e 0,247 respectivamente, mostra que os resultados não tem dependência linear entre as variáveis. O número de ciclos não influencia na rigidez.

Figura 23 - Gráfico de dispersão do E_M em função do $\text{Log } N_c$ da madeira de Marupá com frequência de 1 Hz com linha de tendência linear



Fonte: A autora.

Figura 24 - Gráfico de dispersão do E_M em função do $\text{Log } N_c$ da madeira de Marupá com frequência de 2 Hz com linha de tendência linear



Fonte: A autora (2023).

6.2 Madeira de Pequiá

6.2.1 Descrição dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios, foram ao total de oito corpos de prova, sendo quatro corpos de prova para a frequência de 1 Hz e quatro para a frequência de 2 Hz. Na Tabela 3 estão apresentados as dimensões dos corpos de prova (Figura 25) e as medidas do teor de umidade.

Figura 25 - Corpo de prova de Pequiá



Fonte: A autora (2023).

Tabela 3 - Dimensões e teor de umidade dos corpos de prova de Pequiá.

Frequência	CP	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Umidade (%)
1 Hz	4	450,0	20,17	21,49	12,53
	3	450,0	20,04	20,53	12,40
	5	450,0	20,03	21,47	12,39
	8	435,0	20,81	20,71	12,64
2 Hz	1	450,0	20,41	21,20	12,57
	9	437,0	20,73	21,08	12,46
	7	440,0	20,79	20,92	12,63
	10	436,0	20,75	20,52	12,46

Fonte: A autora (2023).

6.2.2 Ensaio de flexão estática e forças cíclicas

No ensaio de flexão estática, os oito corpos de prova foram ensaiados para obter os módulos de elasticidade dos elementos de MLC, sendo em decorrência dos ciclos propostos na metodologia. A tabela 4 mostra os valores médios do módulo de elasticidade (E_M) para a madeira de Pequiá em função do número de ciclos (N_c) e da frequência da fadiga.

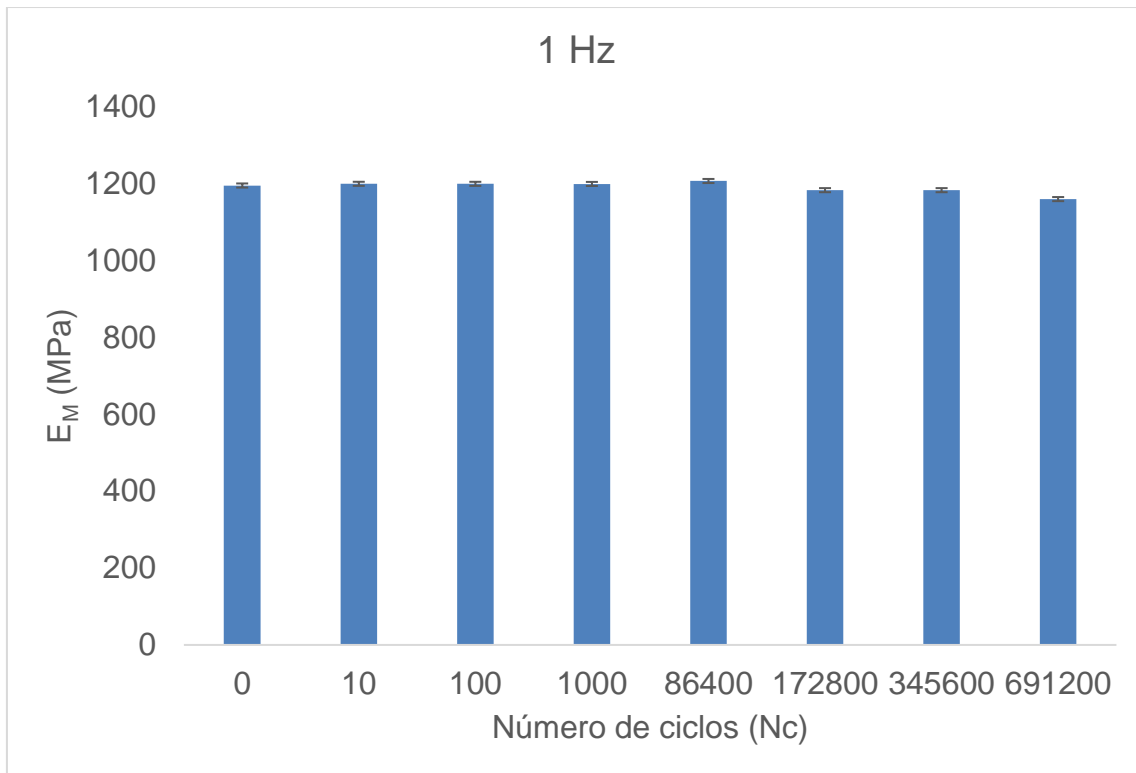
Tabela 4 - Resultados obtidos no ensaio de flexão estática para madeira de Pequiá.

FREQ.	NÚMERO DE CICLOS							
	E_M (MPa)							
	0	10	100	1.000	86.400	172.800	345.600	691.200
1 Hz	1194,40	1198,81	1198,77	1198,79	1206,16	1182,30	1182,30	1159,08
2 Hz	1222,49	1177,47	1173,62	1185,81	1176,96	1208,58	1165,64	1197,82

Fonte: A autora (2023).

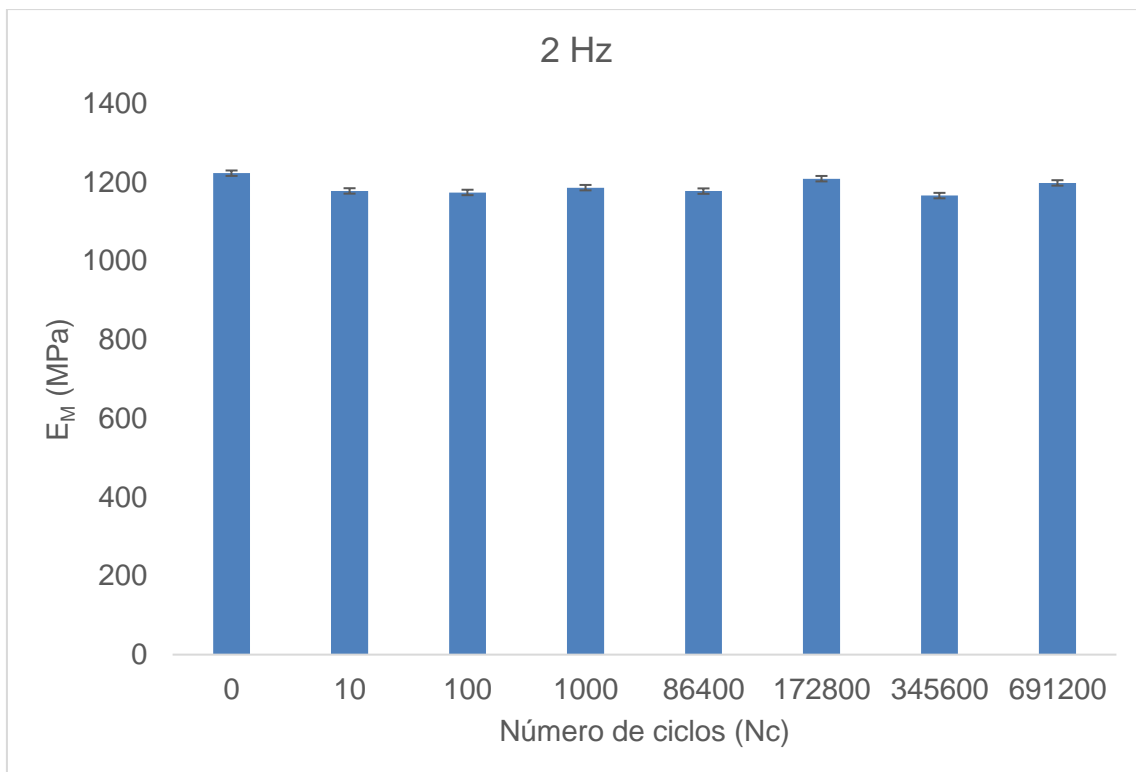
A variação dos valores médios do módulo de elasticidade (E_M) para madeira de Pequiá em função do número de ciclos (N_c) e da frequência na fadiga de 1 Hz e 2 Hz pode ser observada nas Figuras 26 e 27, respectivamente.

Figura 26 - Valores médios do E_M em função do N_c para a madeira de Pequiá na frequência de 1Hz



Fonte: A autora (2023).

Figura 27 - Valores médios do E_M em função do N_c para a madeira de Pequiá na frequência de 2Hz

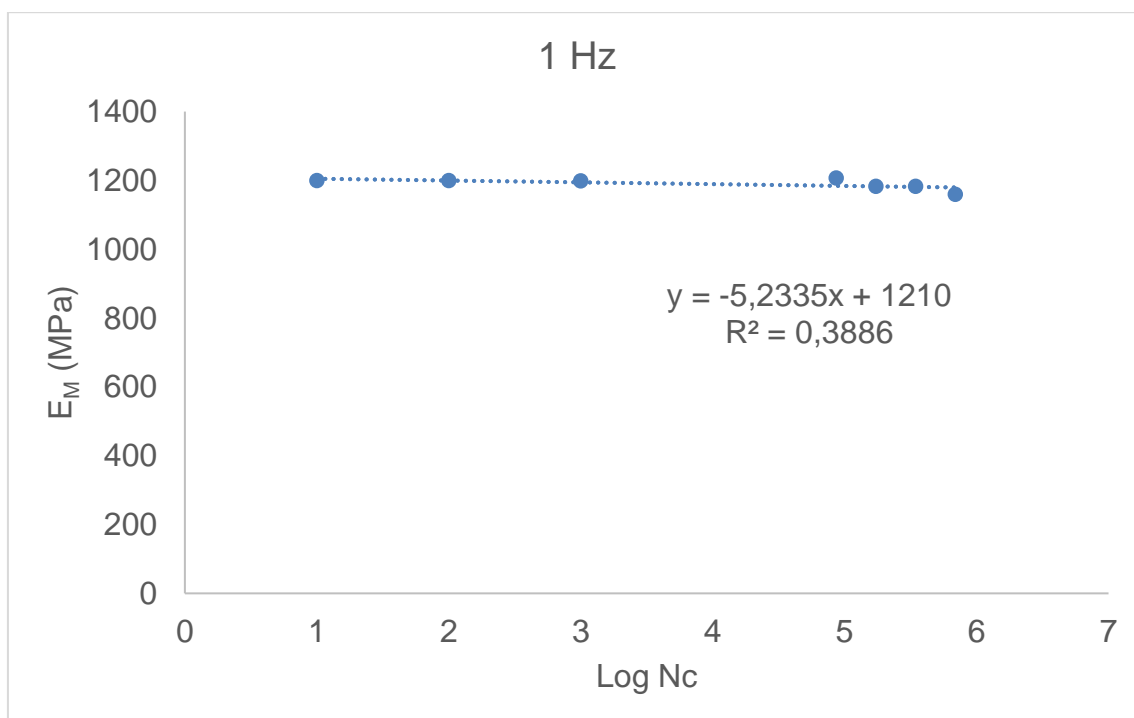


Fonte: A autora (2023).

Quanto à evolução da rigidez dos elementos de MLC em função do número de ciclos, foi observado que ocorreu uma pequena variação na rigidez, conforme exemplificado na Tabela 4 e na Figura 26 e 27. Essa variação da rigidez é justificada principalmente pela reorganização na estrutura da madeira (GUIMARÃES *et al.*, 2012).

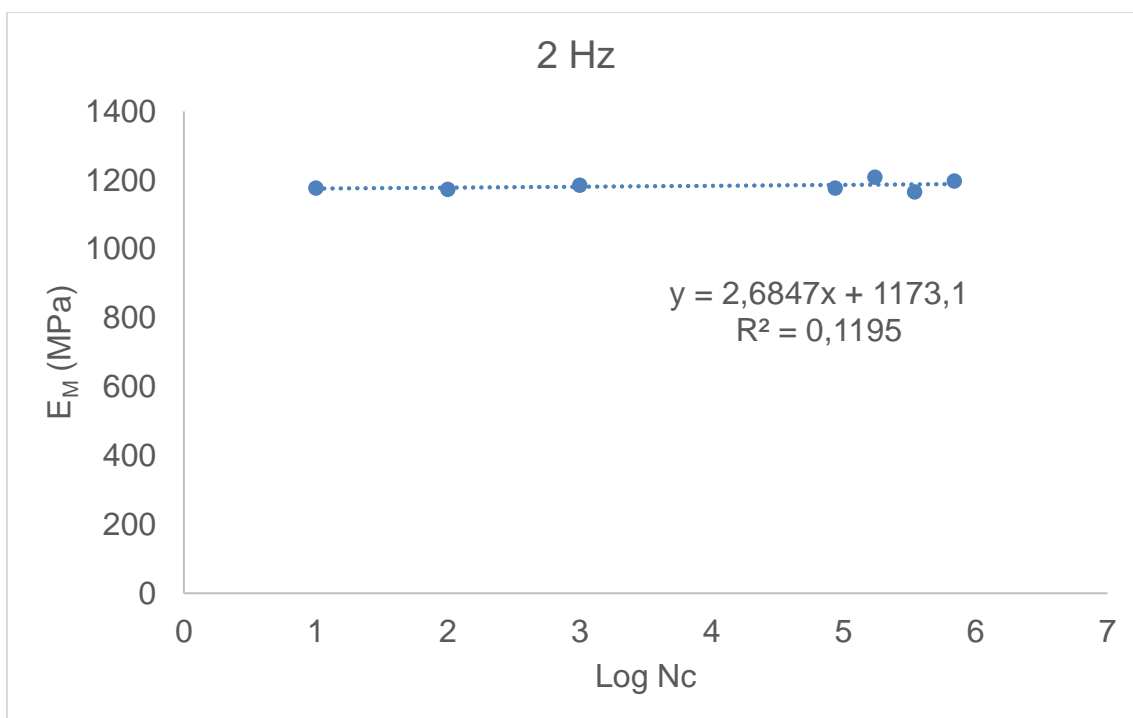
Nos gráficos de dispersão do módulo de elasticidade para madeira de Pequiá nas frequências de 1 e 2 Hz (Figuras 28 e 29) os valores de R^2 de 0,388 e 0,119, respectivamente, mostram que os resultados não apresentam dependência linear entre as variáveis. Em resumo, o número de ciclos não influencia na rigidez.

Figura 28 - Gráfico de dispersão do E_M em função do $\text{Log } N_c$ da madeira de Pequiá com frequência de 1 Hz com linha de tendência linear



Fonte: A autora (2023).

Figura 29 - Gráfico de dispersão do E_M em função do Log N_c da madeira de Pequiá com frequência de 2 Hz com linha de tendência linear



Fonte: A autora (2023).

Conforme foi explicitado no item 4.5 deste trabalho, não foi possível encontrar artigos/trabalhos tratando do tema aqui abordado.

Além de configurar a originalidade do trabalho, o mencionado tópico restringe sobremaneira a discussão dos resultados obtidos.

Menciona-se, apenas a título de ilustração, o trabalho de FERRAZ *et al.* (2020) que, estudando a ação de forças cíclicas sobre peças de compensado estrutural, concluíram que há redução de 21% da rigidez ao se atingir o número de cem mil ciclos de força que provoca o deslocamento vertical no ponto médio das amostras ensaiadas (flexão a três pontos).

Todavia, qualquer comparação com os resultados aqui obtidos não se configura como viável, uma vez que – na produção do compensado estudado pelos mencionados autores – foi utilizado adesivo fenol-formaldeído, cujo desempenho é sabidamente inferior ao da resina utilizada no presente trabalho.

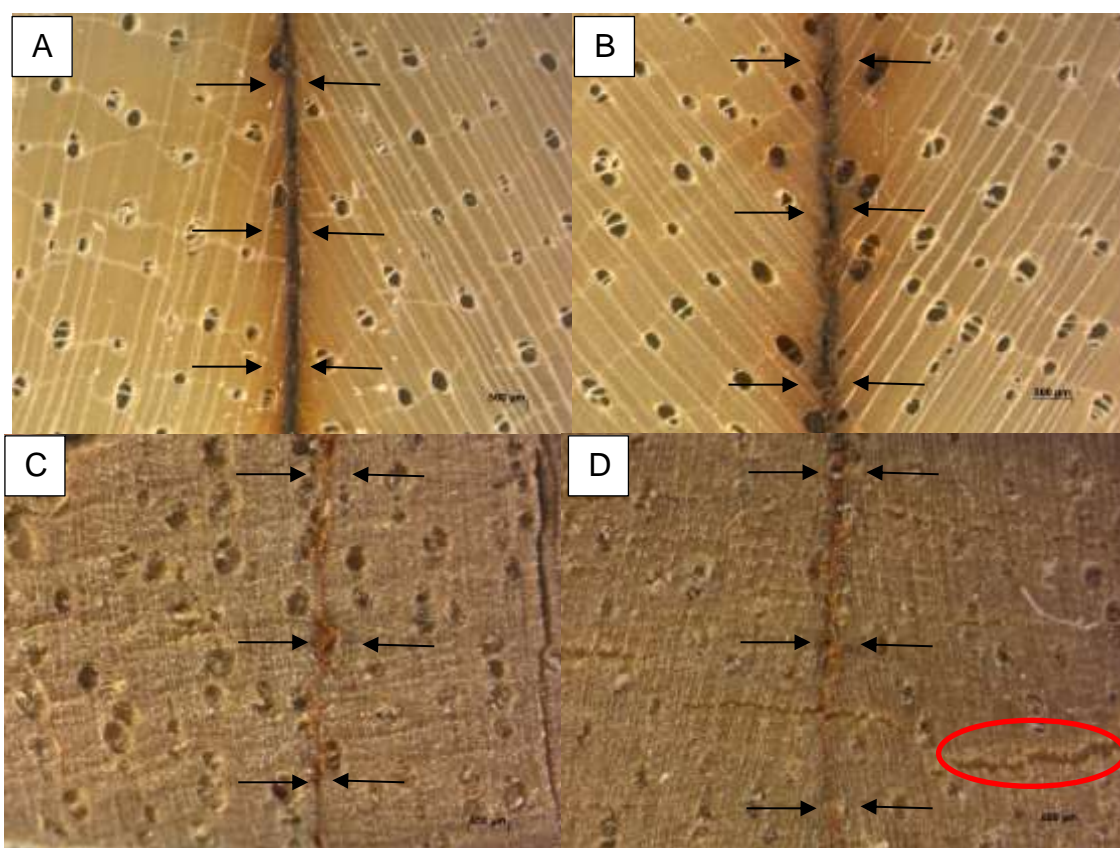
Deste modo, é possível admitir que os resultados aqui obtidos permitem a abertura de uma importante linha de pesquisa na área do conhecimento em que se insere. Algumas sugestões para o prosseguimento do trabalho estão contidas no item 8 – Trabalhos Futuros.

6.3 Análise da microscopia

Na análise microscópica é possível observar que não ocorreu qualquer dano na linha de cola, sendo que os corpos de prova foram retirados da posição na qual ocorreram as maiores tensões.

Na Figura 30 estão apresentadas as imagens microscópicas das amostras (aumento de 12,5x) onde se observa todo o comprimento do corpo de prova. As setas indicam a linha de cola.

Figura 30 - Microscopia 12,5x das espécies a) Marupá, frequência de 1 Hz; b) Marupá, frequência de 2 Hz; c) Pequiá, frequência de 1 Hz; d) Pequiá, frequência de 2 Hz

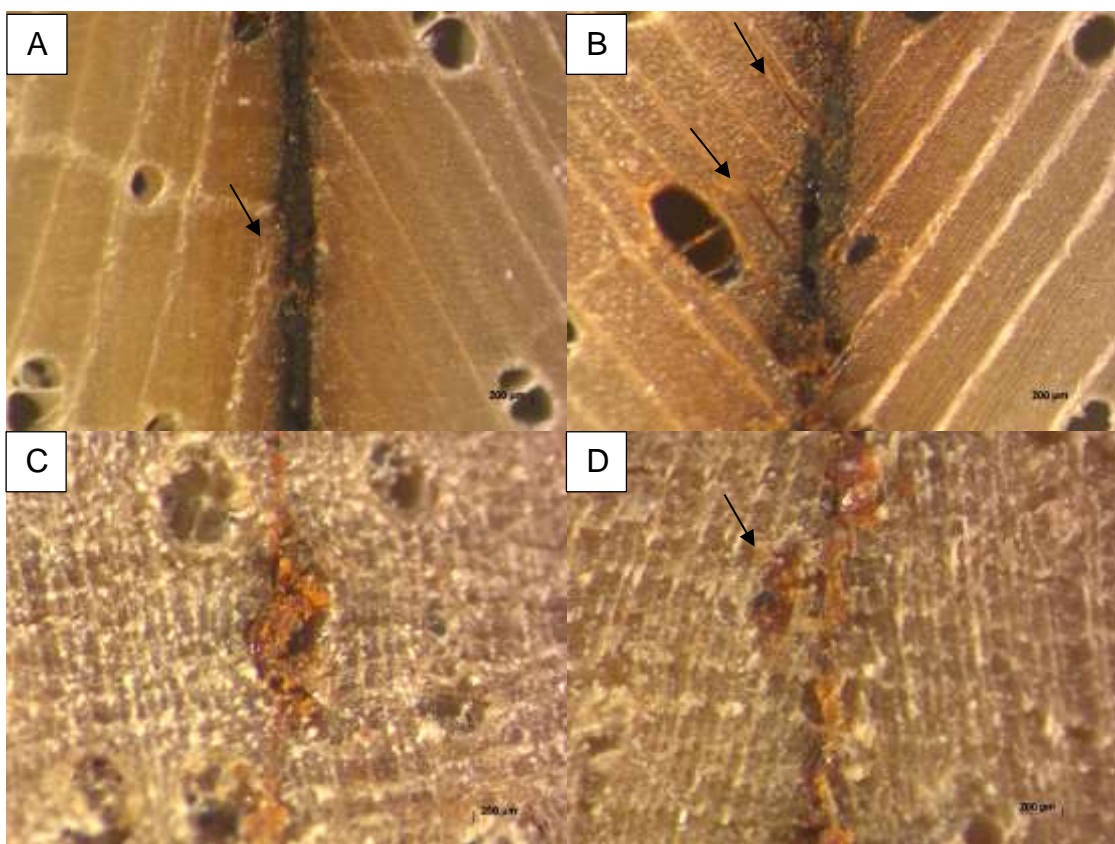


Fonte: A autora (2023).

Na Figura 30D, as fissuras indicada com círculo foi em decorrência ao preparo da amostra.

Para as medidas da espessura da linha de cola, foram usadas as imagens com aumento de 40x. Constata-se a penetração do adesivo na madeira, conforme indicado pelas setas. Na Figura 31 estão apresentadas as imagens microscópicas das espécies.

Figura 31 - Microscopia 40x das espécies a) Marupá, frequência de 1 Hz; b) Marupá, frequência de 2 Hz; c) Pequiá, frequência de 1 Hz; d) Pequiá, frequência de 2 Hz



Fonte: A autora (2023).

Na Tabela 5 estão apresentados os valores médios da espessura da linha de cola, foram no total 10 medidas ao longo da amostra.

Tabela 5 - Valores médios da espessura da linha de cola.

Frequência	Espessura da linha de cola (μm)	
	Marupá	Pequiá
1 Hz	111,12 (11,69)	46,18 (5,36)
2 Hz	135,84 (23,45)	59,11 (8,91)

Valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão.

Fonte: A autora (2023).

Observa-se que, mesmo sendo possível distinguir a pequena penetração do adesivo na espécie Pequiá (muito provavelmente em decorrência da posição

dos raios medulares em relação às faces nas quais se aplicou o adesivo), não foi constatada redução na rigidez dos corpos de prova de MLC. Assim, resta demonstrada a alta capacidade resistiva da linha de cola, no âmbito do número de ciclos de forças aplicadas.

Por outro lado, no caso da espécie Marupá a penetração do adesivo se deu de modo visível até cerca de 0,5 mm, o que mostra a maior permeabilidade da espécie, além da contribuição favorável da posição dos raios medulares em relação às faces coladas. Também no caso do Marupá não foram detectadas variações da rigidez dos corpos de prova de MLC, no âmbito do número de ciclos de forças aplicadas.

7. CONCLUSÕES

A partir da experimentação e das análises é possível concluir que:

- Os valores médios dos módulos de elasticidade são estatisticamente equivalentes entre os ciclos, portanto não foi possível detectar redução das propriedades de rigidez em flexão estática, no contexto das variáveis frequência e número de ciclos adotados no trabalho.
- O intervalo de densidades indicado pela NBR7190:2022 para espécies a utilizar em MLC se mostrou adequado (400 a 750 kg/m³), pois não foram identificados danos nas linhas de cola, com as técnicas de microscopia adotadas. Este aspecto deixa subentendido que a permeabilidade das espécies, no intervalo considerado, é compatível para seu emprego em MLC.

8. TRABALHOS FUTUROS

- Analisar os efeitos da fadiga nas madeiras estudadas e sua avaliação nas propriedades mecânicas. Recomenda-se trabalhar em níveis de frequência, carga e ciclos superiores aos testados nesse estudo.
- A coleta de dados automatizada também é recomendada, no caso de disponibilidade de equipamentos para este fim.
- Utilizar outras técnicas de imagem microscópicas (Microscopia Eletrônica de Varredura) no sentido de viabilizar a observação mais detalhada das linhas de cola e da penetração do adesivo nas peças utilizadas na montagem dos corpos de prova de MLC.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas **NBR:7190-1**: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro. p. 93, 2022a.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas **NBR:7190-2**: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. Rio de Janeiro. p. 21, 2022b.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas **NBR:7190-3**: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro. p. 42, 2022c.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.
- ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; AQUINO, V. B. M.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Analytical study of the dimensional stability of tropical Brazilian wood species. **Ciência Florestal**, v. 33, p. e65389, 2023.
- ARAUJO, V. A.; AGUIAR, F. S.; JARDIM, P. I. L. G.; MASCARENHAS, F. J. R. MARINI, L. J.; AQUINO, V. B. M.; SANTOS, H. F.; PANZERA, T. H.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. Is the Cross-Laminated Timber (CLT) a wood panel, a building, or a construction system? A systematic review on its functions, characteristics, performances, and applications. **Forests**, v. 14, p. 264-292, 2023.
- BADO, M. F.; CASAS, J. R. A review of recent distributed optical fiber sensors applications for civil engineering structural health monitoring. **Sensors**, v. 21, n. 5, p. 1818, 2021.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. Mechanics of wood and wood products. Florida: Krieger Publishing. 1993, 712p.
- BOURSCHEID, C. B.; TEREZO, R. F. Eucalyptus spp. glued laminated timber with reinforced fiber finger-joints. **Floresta**, v. 51, n. 1, p. 109-117, 2020.
- BRAZ, R. L.; OLIVEIRA, J. T. S.; ARANTES, M. D. C.; RODRIGUES, B. P. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Toona ciliata* em diferentes idades. **Floresta**, v. 43, n. 4, p. 663-670, 2013.
- BRUNNER, A. J.; STELZER, S.; PINTER, G.; TERRASI, G. P. Mode II fatigue delamination resistance of advanced fiber-reinforced polymer – matrix laminates: towards the development of a standardized test procedure, **International Journal Fatigue**, v.50, p. 57-62, 2013.
- CARRERAS, L.; RENART, J.; TURON, A.; COSTA, J.; ESSA, Y.; MARTIN DE LA ESCALERA, F. An efficient methodology for the experimental characterization of mode II delamination growth under fatigue loading **International Journal Fatigue**, v. 95, p. 185-193, 2017.
- CARVALHO, J. S.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; AQUINO, V. B. de M. Effect of fatigue on tropical wood species. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 2, p. 187-198, 2022.

CHEN, C.; KUANG, Y.; ZHU, S.; BURGERT, I.; KEPLINGER, T.; GONG, A.; LI, T.; BERGLUND, L.; EICHHORM, S. J.; HU, L. Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. **Nature Reviews Materials**, v. 5, n. 9, p. 642-666, 2020.

CHRISTOFORO, A.L.; PANZERA, T.H.; ARAUJO, V.A.; FIORELLI, J.; LAHR, F. A. R. Timber beam repair based on polymer-cementitious blends”. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 2, pp. 366-375, 2017.

DUGMORE, M.; NOCETTI, M.; BRUNETTI, M.; NAGHIZADEH, Z.; WESSELS, C. B. Bonding quality of cross-laminated timber: evaluation of test methods on *Eucalyptus grandis* panels. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 217–227, 2019.

EHRHART, T.; BRANDNER, R. Rolling shear: Test configurations and properties of some European soft and hardwood species. **Engineering Structures**, v. 172, p. 554-572, 2018.

ERMEYDAN, M. A.; CABANE, E.; HASS, P.; KOETZ, J.; BURGERT, I. Fully biodegradable modification of wood for improvement of dimensional stability and water absorption properties by poly(ϵ -caprolactone) grafting into the cell walls. **Green Chemistry**, v. 16, p. 3313-3321, 2014.

FERRAZ, A. L. N.; BALANCO, G. G.; AQUINO, V .B. M, ALMEIDA, J. P. B.; CHISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Avaliação do efeito da fadiga no módulo de elasticidade na flexão de painéis de madeira compensada. **Revista Matéria**, v. 25, n. 4, e-12886, p. 1-8, 2020.

GUIMARÃES, L. E. S.; BUSSINGUER, A. P.; DEL MENEZZI, C. H. S.; SIQUEIRA, M. L.; SOUZA, M. R. Efeito do carregamento cíclico sobre as propriedades de flexão e ultrassom em madeiras de quatro espécies florestais. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 96, p. 473-481, 2012.

HARDTKE, C. S. Phloem development. **New Phytologist**, v. 239, p. 852-867, 2023.

IBÁ. **Indústria Brasileira de Árvores 2022**. Brasília, p. 44-51, 2022.

IPT. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Informações sobre madeiras**. Butantã, SP, 1983.

ICIMOTO, F. H.; FERRO, F. S.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO, F. A. L. Influence of specimen orientation on determination of elasticity in static bending. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 17, n.2, p. 229-238, 2015.

JAGANNATHAN, N.; CHANDRA, A. R. A.; MANJUNATHA, C. M. Onset-of-growth behavior of mode II delamination in a carbon fiber composite under spectrum fatigue loads. **Composite Structures**, v.132, p. 477-483, 2015.

JAKOB, M.; MAHENDRAN, A. R.; GINDL-ALTMUTTER, W.; BLIEM, P.; KONNERTH, J.; MUELLER, U.; VEIGEL, S. The strength and stiffness of oriented wood and cellulose-fibre materials: A review. **Progress in Materials Science**, v. 125, p. 100916, 2022.

- JONES, D.; BRISCHKE, C. Wood as bio-based building material. **Performance of Bio-based Building Materials**. P.21-96, 2017.
- JONES, R.; HU, W.; KINLOCH, A. J. A convenient way to represent fatigue crack growth in structural adhesives, **Fatigue & Fracture Engineering Materials Structures**, v. 38, p. 379–391, 2015.
- KARENLAMPI, P.P.; TYNJALA, P.; STROM, P. Off-axis fatigue loading of steamed wood. **International Journal Fatigue**, v. 24, p. 1235-1242, 2002.
- KELLOMÄKI, S. Structure Structures of Selected Tree Species. **In: Management of Boreal Forests: Theories and Applications for Ecosystem Services**. Cham: Springer International Publishing, p. 85-109, 2022.
- LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L.; VARANDA, L. D.; CHAHUD, E.; ARAUJO, V. A.; BRANCO, L. A. M. N. Shear and longitudinal modulus of elasticity in wood: relations based on static bending test. **Acta Scientiarum**, v. 39, n.4, p. 433-437, 2017.
- LEITE, T. M.; SANTOS, P. A. F. M; DO VALLE, I. M. R. **The use of glued laminated timber in Brazil: overview and challenges**. Buenos Aires, Argentina, 2017.
- LEWIS, W. C.; ASCE, M. Design considerations for fatigue in Timber Structures. **Journal of the Structural Division: Proceedings of the American Society of Civil Engineers**. v. 86, n. ST5, May. 1960.
- LOPES, D. J. V.; PAES, J. B.; JANKOWSKY, I. P.; SEGUNDINHO, P. G. A.; VIDAURRE, G. B. Influências do diâmetro e umidade da madeira na qualidade do tratamento preservativo. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e20160207, 2017.
- MACÊDO, A. N. **Fadiga em Emendas Dentadas em Madeira Laminada Colada (MLC)**. 226p.2000. São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SET, 2000.
- MARRA, A. A. **Technology of wood bonding: principles in practice**. Van Nostrand Reinhold; 1992.
- MARTINS, C. S.; ABREU, J. J. C. ; PEREIRA, D. T. O. ; SANTOS, D. Q. ; MELO, V. L. M. ; NOBRE, J. R. C. ; SOUSA, M. A. R. ; FIGUEIREDO, M. F. . Propriedades físicas de três espécies de madeiras comercializadas no sudeste do Pará. **In: III CBCTEM Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira**, 2017, Florianópolis. Anais Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Campinas - SP: Galoá, v. 2, 2017.
- MASCIA, N. T.; BERTOLINE, C. A. A., BASÁGLIA, C. D., DONADON, B. F. Numerical analysis of glued laminated timber beams reinforced by Vectran fibers. **Ambiente Construído**, v. 18, p. 359-373, 2018.
- MELO, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S. Comportamento reológico da madeira e derivados. **Revista Ciência da Madeira**, v. 1, n. 1, p. 25-40, 2010.
- MIRSKI, R.; DZIERKA, D.; CHUDA-KOWALKA, M.; KAWALERCZYK, J.; KULINKI, M.; LABEDA, K. A utilidade da madeira de pinho (*Pinus Sylvestris*

- L.) para a produção de elementos estruturais. Parte II: Propriedades de resistência da madeira laminada colada. **Materiais**, v.13, 4029, 2020.
- PALMA, P.; STEIGER, R. Structural health monitoring of timber structures—Review of available methods and case studies. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 118528, 2020.
- PLÖTZE, M., NIEMZ, P. Porosity and pore size distribution of different wood types as determined by mercury intrusion porosimetry. **European Journal Wood and Wood Products**, v. 69, p. 649–657, 2011.
- POLZL, W.; SANTOS, A. J.; TIMOFEICZYK JR., R.; POLZL, P. K. Cadeia produtiva do processamento mecânico da madeira: segmento da madeira serrada no Estado do Paraná. **Revista Floresta**, v. 33, p.127-134, 2003.
- SANDBERG, D.; KUTNAR, A.; KARLSSON, O.; JONES, D. **Wood modification technologies: principles, sustainability, and the need for innovation**. CRC Press, 2021.
- SCHMITT, U.; KOCH, G.; HIETZ, P.; THOLEN, D. Wood Biology. In: Springer Handbook of Wood Science and Technology. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 41-138.
- SEGUNDINHO, P. G. A. **Estudo das vibrações induzidas por pedestres em passarelas de madeira**. 361p. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia de São Carlos) – Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 361, 2010.
- SEGUNDINHO, P.G.A.; ZANGIÁCOMO, A.L.; CARREIRA, M.R.; DIAS, A. A.; LAHR, F. A. R. Avaliação de vigas de madeira laminada colada de cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm.). **Cerne**, v. 19, n.3, pp. 441-449, 2013.
- SIEGLOCH, A. M.; MARCHIORI, J. N. C. Anatomia da madeira de treze espécies de coníferas. **Revista Ciência da Madeira**, v. 6, n. 3, p. 149-165, 2015.
- ŠURDILOVIĆ, M. S.; ŽIVKOVIĆ, S.; TURNIĆ, D.; MILOŠEVIĆ, M. Modelling of pedestrian-induced loading serviceability limit state analysis of footbridges. FACTA UNIVERSITATIS. **Series: Architecture and Civil Engineering**, v. 20, n.1, p. 23-34, 2022.
- TSAI, K. T.; ANSELL, M. P. The fatigue properties of wood in flexure. **Journal Materials Science**, v. 25, n.2A, p. 865-78, 1990.
- VAŠKOVÁ, V.; PONIŠTOVÁ, L; FOJTÍK, R. Dynamics effects on a wooden footbridge. **MATEC Web of Conferences** 107, 00012. 2017.
- YILDIRIM, M. N.; UYSAL, B.; OZCIFCI, A.; ERTAS, A. H. Determination of fatigue and static strength of scots pine and beech wood. **Wood Research**, v. 60, n. 4, p. 679-86, 2015.
- ZANGIÁCOMO, A. L.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Módulo de elasticidade aparente em vigas roliças estruturais de madeira *Pinus elliottii*. **Ambiente Construído**, v. 14, n.1, pp. 7-13, 2014.

APÊNDICE

O ensaio de flexão estática foi realizado conforme estabelecido pela NBR 7190-3 (ABNT, 2022c) nos 32 corpos de prova, com vão livre de 42 cm. A resistência convencional à flexão foi determinada a partir da Equação 2.

$$f_M = \frac{3}{2} \times \frac{F \times L}{b \times h^2} \quad (2)$$

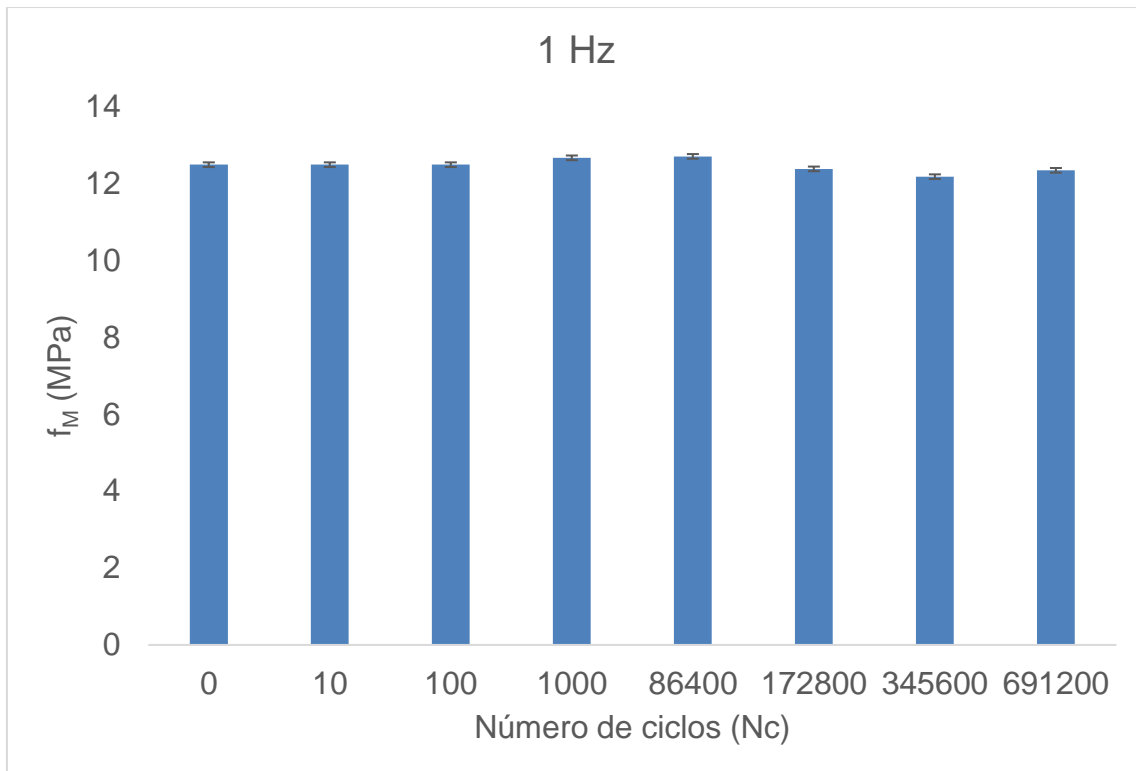
Onde F representa a força obtida no ensaio de flexão, L é o comprimento útil da amostra (distância entre apoios) e b (base) e h (altura) são as dimensões da seção transversal das amostras. Os valores da resistência convencional à flexão (f_M), obtidos antes da aplicação cíclica das forças, foram utilizados como referência para a construção do gráfico do módulo de elasticidade pelo número de ciclos [$f_M \times N_c$]. Foram adotados os seguintes números de ciclos: de 0, 10, 100, 1.000, 86.400, 172.800, 345.600, 691.200, para frequência de 1 Hz e 2 Hz.

Tabela S 1 - Valores médios de resistência convencional à flexão para madeira de Marupá.

FREQ.	NÚMERO DE CICLOS							
	f_M (MPa)							
	0	10	100	1.000	86.400	172.800	345.600	691.200
1 Hz	12,49	12,49	12,49	12,66	12,70	12,38	12,17	12,34
2 Hz	13,70	13,70	13,51	13,70	13,09	13,66	13,52	13,25

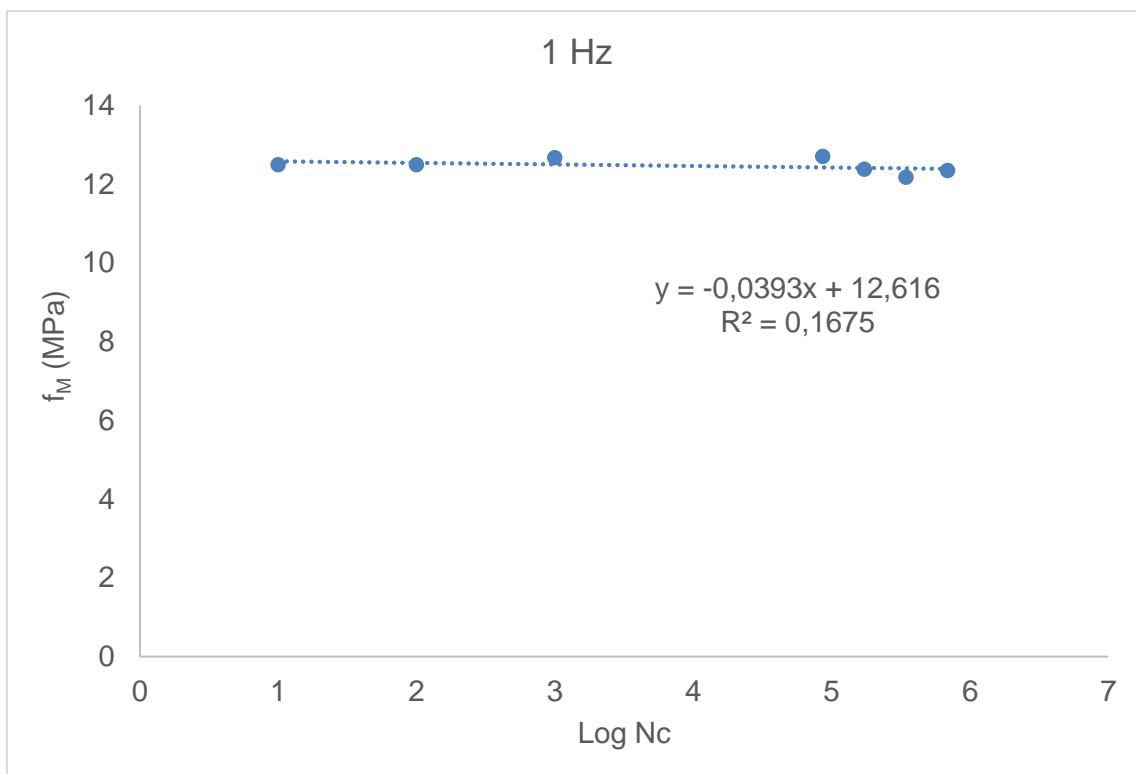
Fonte: A autora (2023).

Figura S 1 - Valores médios de f_M em função do N_c da madeira de Marupá na frequência de 1 Hz



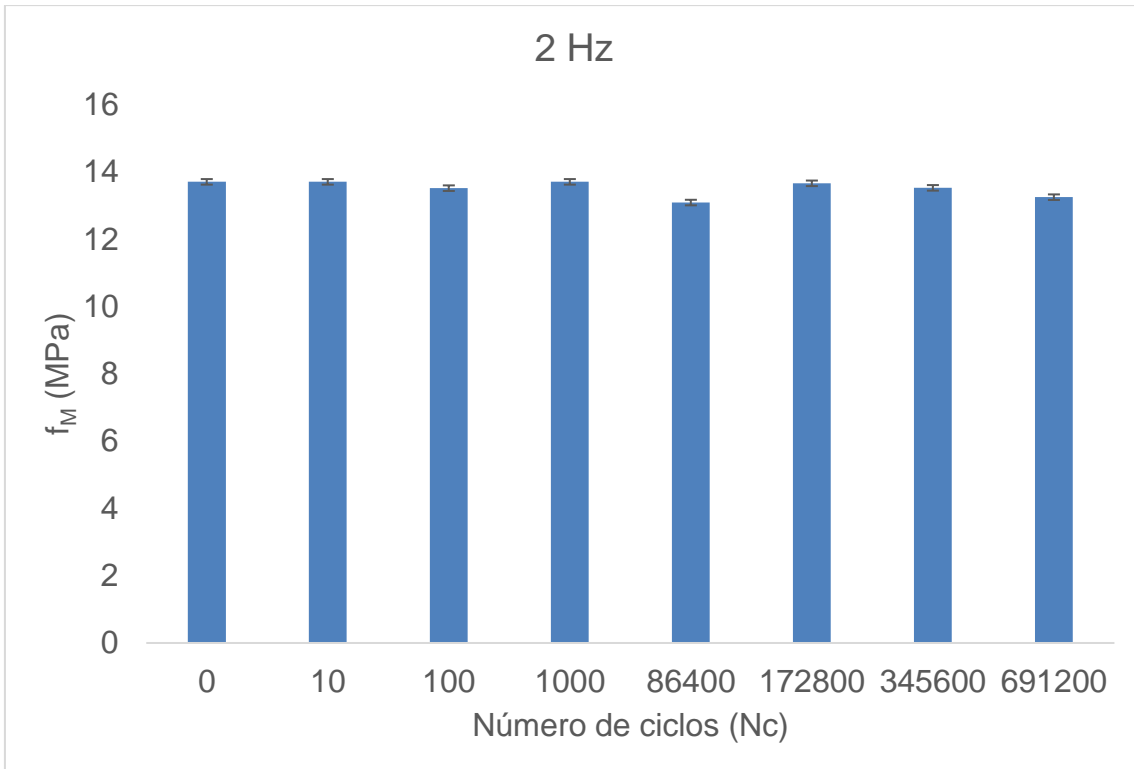
Fonte: A autora (2023).

Figura S 2 - Gráfico de dispersão do f_M em função do $\text{Log } N_c$ da madeira de Marupá com frequência de 1 Hz com linha de tendência linear



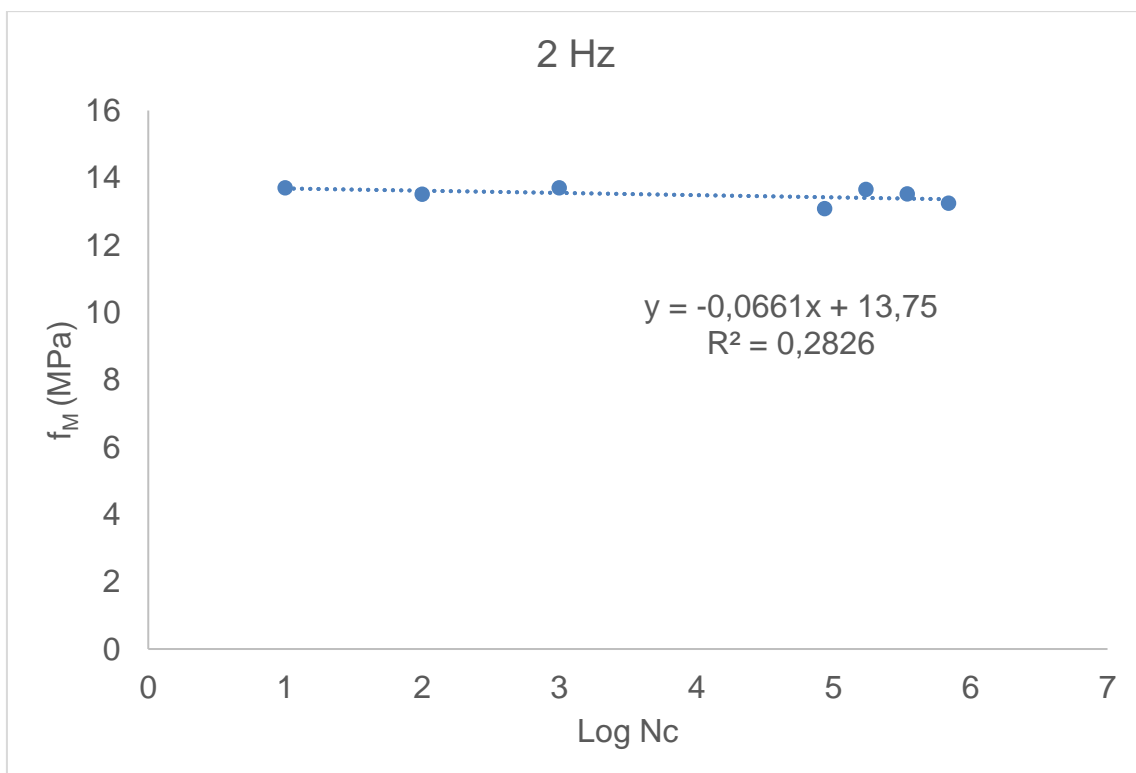
Fonte: A autora (2023).

Figura S 3 - Valores médios de f_M da madeira de Marupá na frequência de 2 Hz



Fonte: A autora (2023).

Figura S 4 - Gráfico de dispersão do f_M em função do Log Nc da madeira de Marupá com frequência de 2 Hz com linha de tendência linear



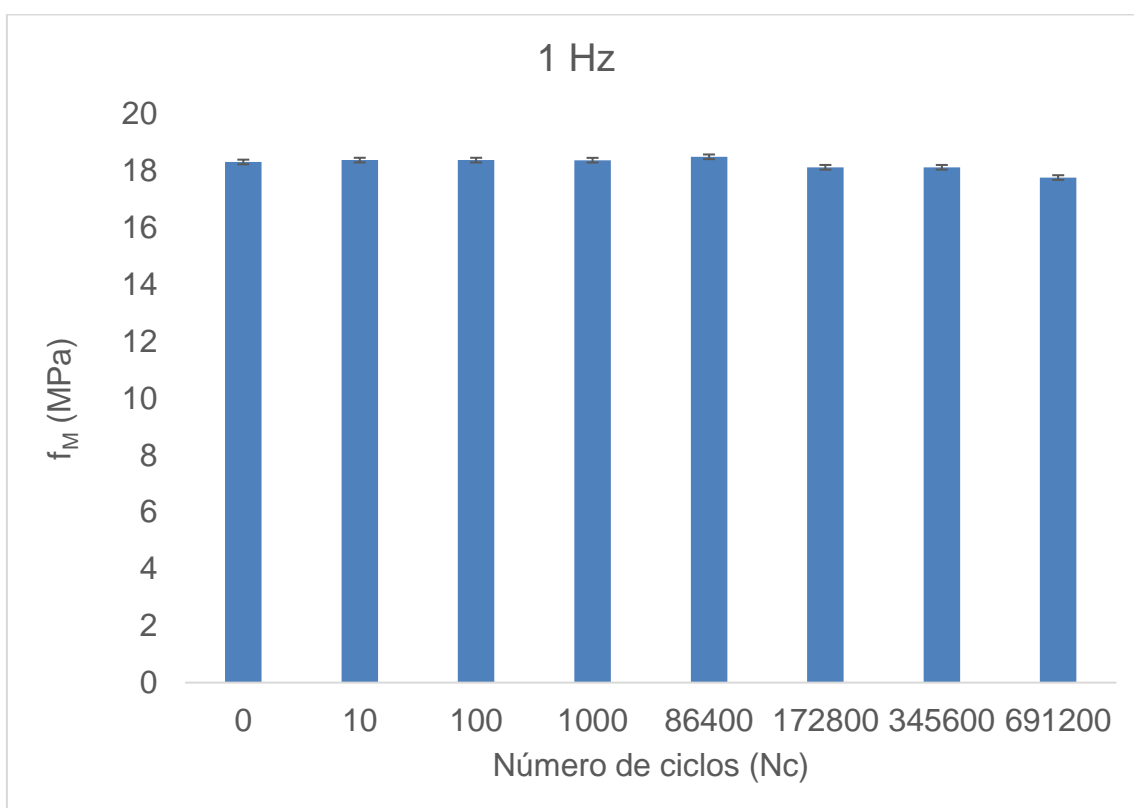
Fonte: A autora (2023).

Tabela S 2 - Valores médios de resistência convencional à flexão para madeira de Pequiá.

FREQ.	NÚMERO DE CICLOS							
	f_M (MPa)							
	0	10	100	1.000	86.400	172.800	345.600	691.200
1 Hz	18,31	18,37	18,37	18,37	18,49	18,12	18,12	17,76
2 Hz	18,62	17,94	17,88	18,06	17,93	18,41	17,76	18,24

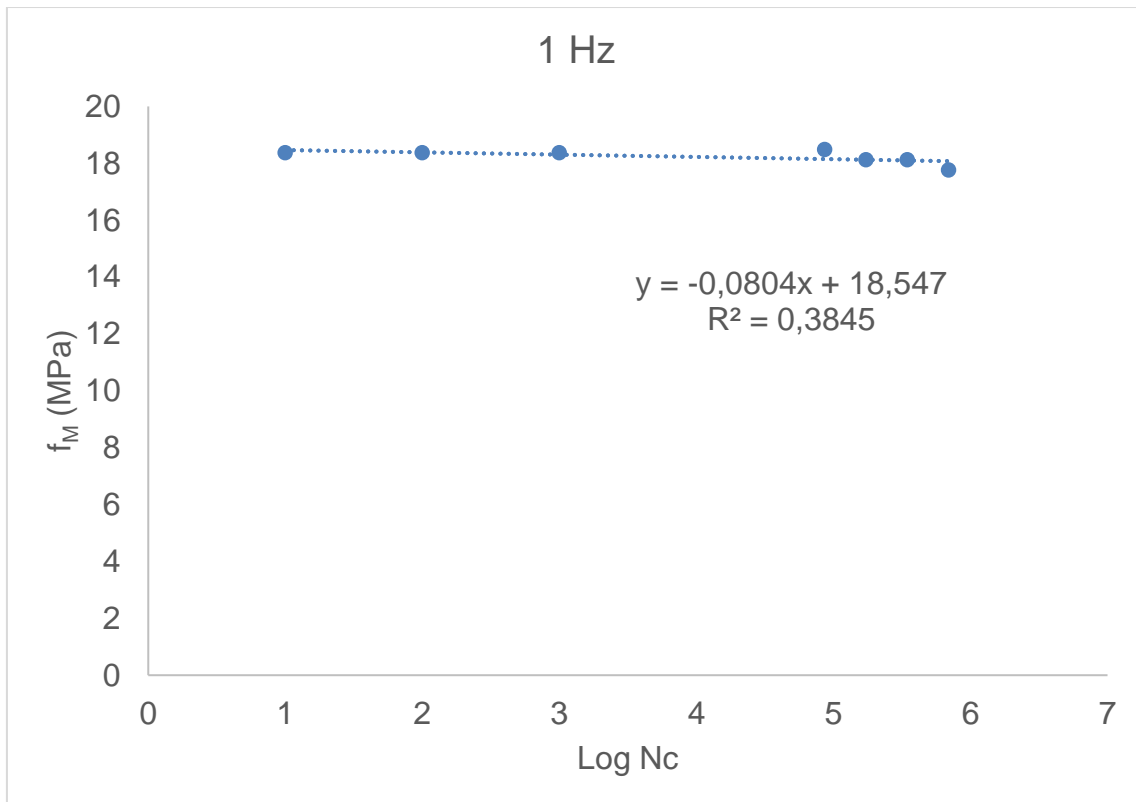
Fonte: A autora (2023).

Figura S 5 - Valores médios de f_M da madeira de Pequiá na frequência de 1 Hz



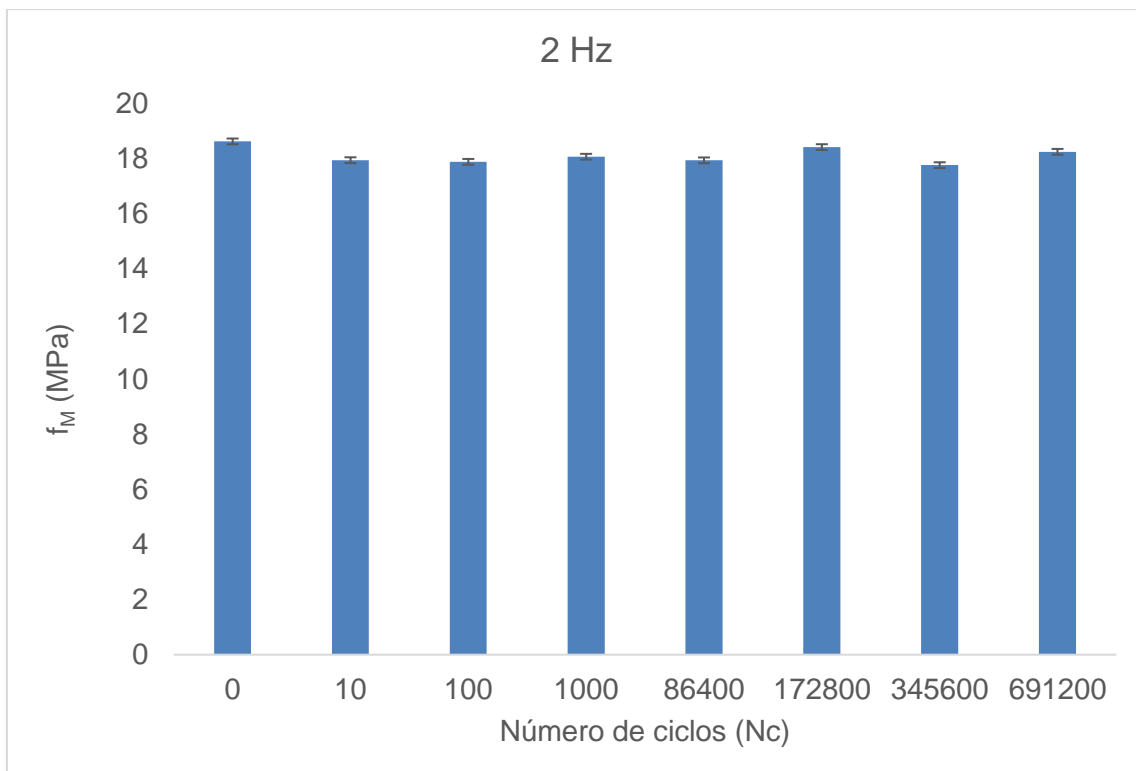
Fonte: A autora (2023).

Figura S 6 - Gráfico de dispersão do f_M em função do Log Nc da madeira de Pequiá com frequência de 1 Hz com linha de tendência linear



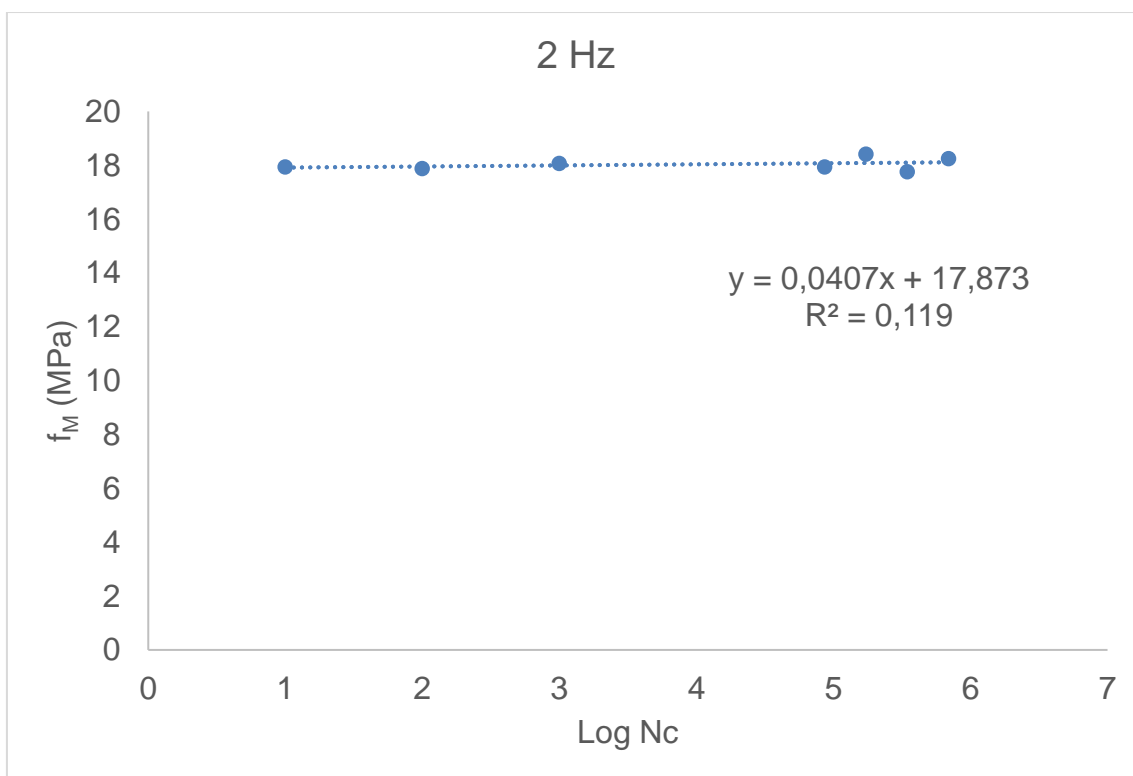
Fonte: A autora (2023).

Figura S 7 - Valores médios de f_M da madeira de Pequiá na frequência de 2 Hz



Fonte: A autora (2023).

Figura S 8 - Gráfico de dispersão do f_M em função do Log Nc da madeira de Pequiá com frequência de 2 Hz com linha de tendência linear



Fonte: A autora (2023).

Observa-se que, para a espécie Marupá, foram detectadas pequenas variações em f_M , para as duas frequências adotadas, as quais não podem ser consideradas significativas para os valores de R^2 obtidos.

No caso do Pequiá, tal situação também se evidenciou, igualmente com valores pequenos de R^2 .

Neste contexto, não é possível registrar uma afirmação conclusiva a respeito da influência do número de ciclos no valor de f_M .

Justifica-se a inserção deste item como Apêndice pelo fato de que, no caso de elementos estruturais fletidos de MLC, usualmente o estado limite de serviço referente ao deslocamento vertical (flecha) é dominante no respectivo dimensionamento.