

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

GIOVANA GOBATTO BALANCO

Influência do número de ciclos de solicitação na rigidez à flexão na madeira

São Carlos

2023

GIOVANA GOBATTO BALANCO

Influência do número de ciclos de solicitação na rigidez à flexão na madeira

Versão Corrigida

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

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

Orientador(a): Francisco Antonio Rocco Lahr

São Carlos

2023

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).

B171i Balanco, Giovana Gobatto
Influência do número de ciclos de solicitação na rigidez à flexão na madeira / Giovana Gobatto Balanco; orientador Francisco Antonio Rocco Lahr. São Carlos, 2023.

Tese (Doutorado) - 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. Madeira. 2. Fadiga. 3. Propriedade mecânica. 4. Módulo de elasticidade. 5. Pinus. 6. Simarouba. 7. Caryocar. 8. Peltogyne. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **GIOVANA GOBATO BALANCO**.

Título da tese: "Influência do número de ciclos de solicitação na rigidez à flexão na madeira".

Data da defesa: 07/06/2023.

Comissão Julgadora

Resultado

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

APROVADA

Prof. Dr. **Diego Henrique de Almeida**
(Universidade Federal de Rondônia/UFRO)

APROVADA

Profa. Associada **Carla Cristina Schmitt Cavalheiro**
(Instituto de Química de São Carlos/IQSC-USP)

APROVADO

Prof. Dr. **Victor Almeida de Araujo**
(Desenvolvimento de Produtos Lignocelulósicos/LIGNO)

APROVADA

Prof. Dr. **André Luis Christoforo**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

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**

À minha mãe, irmão, sobrinha,
e ao meu noivo,
com todo meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

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

Agradeço a Deus por ter me mantido forte e perseverante, por ser meu refúgio e minha esperança.

À minha mãe por todo incentivo, por todo exemplo, por nunca sair do meu lado.

Ao meu pai por todo o carinho e amor.

Ao meu irmão por todo o companheirismo. Saiba que eu sempre quis ser “alguém” por mim, para ter uma boa vida, mas também por você, esse título faz parte disso.

A minha sobrinha Jade e minha afilhada Manu que me trazem tanta alegria.

Aos meus avós Gabriel, Iracy e Marlene por todo o apoio e amor.

Ao meu noivo Arthur por sua compreensão e dedicação de sempre.

Tudo isto é para vocês e por vocês que são os grandes amores da minha vida e me inspiram a ser uma pessoa melhor a cada dia.

Ao meu amigo Nathan, por todo companheirismo, aprendizado e apoio.

Ao professor Rocco por todos os ensinamentos acadêmicos e de vida nos últimos 8 anos.

Ao professor André por ser sempre tão solícito e generoso.

Ao Victor da secretaria de pós-graduação por toda a ajuda, você é um funcionário ímpar.

Sempre serei grata.

RESUMO

BALANCO, G. G. **Influência do número de ciclos de solicitação na rigidez à flexão na madeira.** 2023. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Nesta tese a madeira de quatro espécies foram submetidas a ensaios de carregamentos cíclicos aplicados a fim de analisar o fenômeno de fadiga nestes materiais. Os corpos de prova das espécies *Pinus sp.* - *Pinaceae*, *Simarouba amara Aubl.* - *Simaroubaceae*, *Caryocar villosum (Aubl.) Pers.*, *Caryocaraceae* e *Peltogyne sp.* – *Leguminosae* foram submetidos a 700.000 carregamentos cíclicos. Por meio de ensaios de flexão estática de três pontos determinou-se o módulo de elasticidade longitudinal dos corpos de prova. O módulo de elasticidade inicial foi determinado sem a aplicação de ciclos nos corpos de prova e posteriormente o módulo de elasticidade foi mensurado a cada 100.000 ciclos de solicitações devidas aos carregamentos, totalizando 8 mensurações. A análise da influência do número de ciclos na rigidez à flexão da madeira foi realizada comparando-se os módulos de elasticidade ao longo das aplicações dos carregamentos. Para determinar a relação entre o fenômeno da fadiga e o possível decréscimo das propriedades mecânicas da madeira foram apresentadas equações para cada uma das madeiras estudadas, junto ao p valor e R^2 . Conclui-se que madeiras de diferentes classes de resistência apresentam comportamentos diferentes quando submetidas a fadiga. Esta conclusão foi reforçada ao observar que um corpo de prova da espécie Roxinho, sendo esta espécie a de maior rigidez estudada nesta tese, rompeu a 700.000 ciclos e este comportamento de fissuras e/ou rupturas não foi observado nas demais madeiras. Sugere-se que o estudo da fadiga deve ser realizado por classe de resistência, uma vez que a análise por classe dá importância a estrutura anatomia da amostra estudada e a influência desta estrutura na resposta mecânica da madeira.

Palavras-chave: Madeira; Fadiga; Propriedade mecânica; Módulo de elasticidade; Pinus; Caxeta; Marupá, Piquia; Roxinho.

ABSTRACT

BALANCO, G. G. **Influence of the number of load cycles on flexural stiffness of wood.** 2023. Tese (Doutorado) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2023.

In this thesis, wood from four species was submitted to cyclic loading tests applied in order to analyze the phenomenon of fatigue in these materials. The specimens of *Pinus* sp. - Pinaceae, *Simarouba amara* Aubl. - Simaroubaceae, *Caryocar villosum* (Aubl.) Pers., Caryocaraceae and *Peltogyne* sp. – Leguminosae were subjected to 700,000 cyclic loadings. Through three-point static bending tests, the longitudinal Elastic Modulus of the specimens was determined. The initial Elastic Modulus was determined without applying cycles to the specimens and subsequently Elastic Modulus was measured every 100,000 cycles of requests due to loading, totaling 8 measurements. The analysis of the influence of the number of cycles on the flexural rigidity of the wood was carried out by comparing the Elastic Modulus along the load applications. To determine the ratio between the phenomenon of fatigue and the possible decrease in the mechanical properties of the wood, equations were presented for each of the woods studied, along with the p value and R^2 . Woods of different resistance classes presented different behavior when submitted to fatigue. This conclusion was reinforced when observing that a specimen of the Roxinho species, this species being the one with the highest rigidity studied in this thesis, broke at 700,000 cycles and this behavior of fissure and/or rupture was not observed in the other woods. It is suggested that the study of fatigue should be carried out by resistance groups, since this analysis gives importance to the anatomical structure of the sample studied and the influence of this structure on the mechanical response of the wood.

Key words: Wood; Fatigue; Mechanical Property, Elastic Modulus; *Southern yellow pine*; *Marupa*; *Simaruba*; *Pekea*; *Amarante*; *Purpleheart*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2 – MADEIRA PINUS (<i>PINUS SP.</i> , <i>PINACEAE</i>)	8
FIGURA 1 - MADEIRA CAXETA (<i>SIMAROUBA AMARA AUBL.</i> , <i>SIMAROUBACEAE</i>).....	10
FIGURA 3 – MADEIRA PIQUIÁ (<i>CARYOCAR VILLOSUM (AUBL.) PERS.</i> , <i>CARYOCARACEAE</i>).....	11
FIGURA 4 – ROXINHO (<i>PELTOGYNE SP.</i> , <i>LEGUMINOSAE</i>).....	13
FIGURA 5 – CORPO DE PROVA	31
FIGURA 6 – CORPO DE PROVA POSICIONADO NA MÁQUINA DE SIMULAÇÃO DE FADIGA QUE APLICA OS ESFORÇOS NO CENTRO DO CORPO DE PROVA BIAPOIADO NAS EXTREMIDADES	32
FIGURA 7 – MÁQUINA DE SIMULAÇÃO DE FADIGA.....	33
FIGURA 8 – APOIO DO CORPO DE PROVA NA MÁQUINA DE FADIGA	33
FIGURA 9 - ESQUEMA COM PARAFUSO E PORCA PARA AJUSTE DO DESLOCAMENTO APLICADO NO CORPO DE PROVA	34
FIGURA 10 – A) PORCA ROTACIONADA EM SENTIDO HORÁRIO PELO OPERADOR DA MÁQUINA B) CONFORME A PORCA É ROTACIONADA EM SENTIDO HORÁRIO A PEÇA QUE DESLOCA O CORPO DE PROVA É EMPURRADA PARA BAIXO, EMPURRANDO TAMBÉM O CORPO DE PROVA, RESULTANDO EM MAIOR FLECHA/DESLOCAMENTO.....	34
FIGURA 11 – RELÓGIO COMPARADOR INSTALADO NA PARTE INFERIOR DO EQUIPAMENTO	35
FIGURA 12 – EMIC E COMPUTADOR INSTALADO PARA A LEITURA DOS DADOS ENSAIADOS PELA MÁQUINA.....	38
FIGURA 13 – CORPO DE PROVA POSICIONADO PARA ENSAIO NA EMIC	38
FIGURA 14 - CONFIGURAÇÕES INSERIDAS NO PROGRAMA TESC NO COMPUTADOR CONECTADO A EMIC	39
FIGURA 15 – CORPO DE PROVA DURANTE O ENSAIO	40
FIGURA 16 – CORPO DE PROVA DURANTE O ENSAIO	40
FIGURA 17 - CORPO DE PROVA EM ENSAIO DE FLEXÃO DE TRÊS PONTOS PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	41
FIGURA 18 - DEFLECTION Δ GENERATED IN THE SPECIMEN BY THE APPLICATION OF FORCE F	41
FIGURA 19 - GRÁFICO COM VALORES DE MÓDULO DE ELASTICIDADE X NÚMERO DE CICLOS ATÉ 300.000, PARA OS CORPOS DE PROVA DA MADEIRA CAXETA (<i>SIMAROUBA SPP.</i> , <i>SIMAROUBACEAE</i>).....	43
FIGURA 20 – CORPO DE PROVA DE ROXINHO COM FISSURA.....	45
FIGURA 21 – CORPO DE PROVA INDICANDO A FISSURA NA REGIÃO CENTRAL INFERIOR	45

FIGURA 22 – GRÁFICO COM OS RESULTADOS MÉDIOS PARA TODOS OS CORPOS DE PROVA	46
FIGURA 23 – ANÁLISE DE VARIANCIA ANOVA PARA TODOS OS CORPOS DE PROVA AGRUPADOS	47
FIGURA 24 - GRÁFICO COM OS RESULTADOS MÉDIOS E DESVIO PADRÃO DOS CORPOS DE PROVA DE PINUS	48
FIGURA 25 - GRÁFICO COM OS RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS CORPOS DE PROVA DE PINUS	49
FIGURA 26 – ANÁLISE DE VARIANCIA ANOVA PARA OS CORPOS DE PROVA DE PINUS AGRUPADOS	50
FIGURA 27 - GRÁFICO COM OS RESULTADOS MÉDIOS E DESVIO PADRÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CAXETA	51
FIGURA 28 – ANÁLISE DE VARIANCIA ANOVA PARA OS CORPOS DE PROVA DE CAXETA AGRUPADOS.....	52
FIGURA 29 - GRÁFICO COM OS RESULTADOS MÉDIOS E DESVIO PADRÃO DOS CORPOS DE PROVA DE PIQUIÁ	53
FIGURA 30 – ANÁLISE DE VARIANCIA ANOVA PARA OS CORPOS DE PROVA DE PIQUIÁ AGRUPADOS.....	54
FIGURA 31 - GRÁFICO COM OS RESULTADOS MÉDIOS E DESVIO PADRÃO DOS CORPOS DE PROVA DE ROXINHO	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	6
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	7
3.1. Madeira	7
3.1.1. Pinus.....	7
3.1.2. Caxeta	9
3.1.3. Piquiá	10
3.1.4. Roxinho.....	12
3.2. Embasamento teórico sobre o tema	14
3.2.1. Normas.....	14
3.2.2. Estudos em fadiga na madeira maciça.....	15
3.2.3. Estudos em fadiga em produtos derivados da madeira.....	19
3.3. Considerações finais sobre a revisão bibliográfica	30
4. METODOLOGIA	31
5. RESULTADOS	43
5.1. Resultados preliminares	43
5.2. Resultados finais	44
5.2.1. Pinus.....	47
5.2.2. Caxeta	50
5.2.3. Piquiá	52
5.2.4. Roxinho.....	54
6. CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS	59

1. INTRODUÇÃO

Na construção civil, a madeira apresenta uma alta empregabilidade desde o período histórico onde o homem deixou de ser nômade e passou a fixar moradia. Atualmente, a crescente busca da sociedade por fonte de materiais sustentáveis para suas atividades básicas faz com que a madeira apresente grande visibilidade na construção civil como fonte de matéria prima para novos sistemas construtivos (ARAUJO, 2021).

Para dimensionar elementos estruturais em madeira, é necessário conhecer adequadamente as propriedades físicas e mecânicas deste material, pois somente assim será possível otimizar o seu desempenho frente a solicitações externas sofridas pela estrutura com um dimensionamento racional e economia de material. A ABNT NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) e ABNT NBR 7190-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022a) estabelece que os estados limites devem ser respeitados para garantir segurança e manutenção da vida útil da estrutura.

De acordo com as normas citadas anteriormente, no que se refere aos estados limites últimos, a resistência da madeira deve ser maior que as tensões geradas no sistema por solicitações externas e, o sistema estrutural escolhido e suas peculiaridades, deve garantir a estabilidade da estrutura como um todo. Já quanto aos estados limites de utilização, a ABNT NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) estabelece que grandes deformações e vibrações devem ser evitadas para a garantia de um desempenho adequado da estrutura e uma vida útil.

As propriedades de rigidez são informações importantes utilizadas no dimensionamento de elementos estruturais em madeira, no Brasil esta propriedade da madeira é definida por meio do valor médio do módulo de elasticidade, determinado na fase de comportamento elástico-linear. A forma de ensaio pode ser de flexão com peça estruturais, ou com o ensaio de compressão paralela às fibras e ensaio de no ensaio de compressão perpendicular às fibras, com corpos de prova isentos de defeitos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022a).

Contudo, já são empregadas no Brasil, várias técnicas de ensaios não destrutivos para a determinação da rigidez da madeira como ultrassom, vibração transversal e vibração longitudinal (CARREIRA e CANDIAN, 2008; ESPINOSA et al., 2017; SZOSTAK, TROCHONOWICZ e KOWALCZYK, 2020).

Em função de sua ortotropia, as propriedades mecânicas da madeira são

influenciadas por diferentes fatores, como por exemplo, a umidade, o tempo de duração da carga e a estrutura da madeira (PFEIL e PFEIL, 2003; CARVALHO, CHRISTOFORO e LAHR, 2018). Em acordo com Larson et al. (2001), os módulos de elasticidade e de ruptura da madeira possuem alta correlação com a densidade da madeira. Evans et al. (2000) relatam que o módulo de elasticidade e outras propriedades mecânicas da madeira sofrem grande influência da presença de lenho juvenil, o que foi atestado também por Leonello et al. (2012), devido a um aumento dos valores desta propriedade no sentido da medula para a casca da árvore. Ferreira et al. (2006) encontraram diferença de 6% entre o módulo de elasticidade do lenho de tração e lenho normal de dois clones de *Eucalyptus*.

Até agora, foram apresentadas informações referentes ao material madeira em si e o impacto de variações inter e intraindivíduos em suas propriedades mecânicas. Vale lembrar que aspectos como local de origem dos lotes também podem trazer influência nas propriedades, assim como o posicionamento das peças em relação à altura das árvores (ROCCO LAHR, 1995). Contudo, é possível que algumas situações de projeto possam alterar propriedades mecânicas da madeira como seu módulo de elasticidade durante a vida útil da estrutura?

O módulo de elasticidade, grandeza que interfere na capacidade de recuperar a forma original depois de removida a carga, reduz-se com o tempo, devido à ocorrência de fenômenos de fluência, por exemplo, caso a estrutura tenha sido sujeita a esforços próximos da respectiva tensão de ruptura. O mesmo efeito se pode afirmar para a fadiga do material, provocada por cargas cíclicas continuadas ou então por tensões médias uniformes, afetando sobretudo em ligações estruturais. Nos projetos, as peças de madeira trabalham com cerca de 30% de seu valor de ruptura, limite este estabelecido pelos coeficientes de minoração “*k_{mod}*” e pela flecha máxima impostos pela norma ABNT NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997). Mesmo com a adoção destes valores para peças aplicadas em situação de projetos, a redução da rigidez ocasionada por cargas cíclicas já foi observada por Carvalho (2017) utilizando um número de ciclos relativamente baixo, número de ciclos máximo aplicado 45000.

A fadiga é o fenômeno mecânico que ocorre quando um material está sujeito a ciclos repetitivos de esforços de tensão ou deformação oscilantes. Ela é a resposta dada por um material ao ser submetido a ciclos de esforços que, na prática, são a aplicação de carga repetidas vezes em uma face do material sendo essa carga sempre na mesma direção e sentido. Ela pode ser definida ainda como o fenômeno de deterioração ou falha que um material sofre quando é submetido às cargas citadas (ARTEIRO e CASTRO, 2014; DOWLING, 2017).

É possível definir a resistência à fadiga ou a cargas alternadas como a capacidade que um elemento estrutural tem em se deformar sem atingir a ruptura, quando está sujeito a esforços de compressão, tração e flexão. No caso de pontes, passarelas, pisos, escoras e coberturas, objetivo principal de aplicação deste trabalho, não há inversão de esforços e, sim, aplicação de forças que provocam solicitações sempre de mesma direção, sentido e intensidade.

A ruptura ou falha se deve ao decréscimo de propriedade mecânica do material ao longo do tempo de exposição aos ciclos de carga. As falhas apresentadas pelo material variam entre pequenas perdas de rigidez e resistência da peça até a ruptura e isso se dá ao fato de os ciclos de esforços serem aplicados em um local, fragilizando o material no ponto de aplicação, levando a perda de suas propriedades iniciais (BRANCO, 1999). Vale ressaltar que a ruptura por fadiga ocorre mais provavelmente quando a força aplicada está acima do limite de proporcionalidade do material. Isto é praticamente improvável quando tratamos de situações em que a “flecha máxima” observada é $L/200$ (comprimento da peça/200), no caso da ABNT NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) em vigor. O desgaste ou ruptura por fadiga pode ocorrer quando uma estrutura é solicitada por ações cíclicas relevantes, tais como as provenientes de equipamentos de elevação, pontes rolantes, vibrações de máquinas, sendo nestes casos, necessário verificar a resistência à fadiga dos elementos existentes, por exemplo, para realizar cálculos de dimensionamentos apropriados.

Vale ressaltar que a ABNT NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), já citada neste parágrafo, não faz alusão explícita à questão da fadiga nas suas prescrições de projeto. Também é importante frisar que a fadiga pode causar falhas prematuras na peça, ou seja, diminuir a vida útil do sistema. Em materiais metálicos, que trabalham com resistência de cálculo da ordem de 50% da ruptura, por exemplo, esta situação pode ser mais frequente, porém ela não deve ser descartada no caso da madeira, a utilização de ordens de rupturas menores para a madeira proporciona apenas maior segurança e não anulam a possibilidade deste fenômeno ocorrer nas peças (CALLISTER JR, 2008; SHACKELFORD, 2008).

Os comportamentos dos materiais em fadiga são facilmente afetados por alguns fatores, entre eles: superfície do material e seus tratamentos, número de ciclos aplicados, a duração do esforço, frequência, tensão média, o teor de umidade e a temperatura ambiente. O último item se refere a alterações do ambiente que geram fadiga térmica, esta pode ocorrer por causa de tensões térmicas (CALLISTER JUNIOR, 2008; ASKELAND e PHULÉ, 2008).

Como se pode notar, a fadiga ocorre em muitos materiais e em suas diversas aplicações, como máquinas, veículos, móveis e estruturas (CALLISTER, 1999). Entre as causas de fadiga em elementos podem ser citados como exemplo: o carregamento e descarregamento em um eixo de transmissão de um veículo; compressão e descompressão de uma aeronave; aquecimento e resfriamento de uma matriz de forjamento de peças; vibrações ocasionadas por veículos trafegando sobre uma ponte. A fadiga não é gerada apenas por grandes cargas, ela ocorre em automóveis, aeronaves, máquinas e pontes, mas também é um fenômeno mecânico muito recorrente em estruturas de casas como móveis e pisos, por exemplo, ao ser solicitado pela carga de uma pessoa sobre ele.

Há a suspeita de que o risco de falha por fadiga em materiais fibrosos como a madeira é menor do que em materiais cristalinos como o aço, porém ainda é preciso estudo maior sobre a madeira para que se confirme esta afirmação.

Informações sobre o comportamento da madeira sob fadiga não são muito extensas. É geralmente recomendado que a fadiga seja considerada no projeto quando mais de 100.000 ciclos de carga são esperados, porém 100.000 ciclos é um número muito pequeno quando se tratando de projetos estruturais que devem durar por vinte anos ou mais sendo solicitados por repetidos ciclos.

Em teoria, se deseja prever um número de ciclos ou vida à fadiga, a chamada tensão limite de fadiga que não deve ser ultrapassada, ou seja, a tensão que um material pode suportar sob um número de ciclos de carga. Infelizmente, poucos dados estão disponíveis sobre as tensões de limitação de fadiga da madeira sob várias condições.

A fadiga da madeira já foi investigada em alguns trabalhos conduzidos a partir de 1980. Okuyama, Kohara, Itoh, Marsoem e Bordonné são responsáveis por oito trabalhos sobre as respostas mecânicas da madeira à repetição de carga, publicados entre 1984 e 1994, onde abordam vários fatores importantes sobre a fadiga na madeira maciça (Okuyama, Itoh e Marsoem, 1984; Bordonne, Okuyama e Marsoem, 1987; Marsoem, Bordonné e Okuyama, 1987; Okuyama, Marsoem, 1987; Kohara e Okuyama, 1992; Kohara e Okuyama, 1993; Kohara e Okuyama, 1994a; Kohara e Okuyama, 1994b).

Além destes trabalhos podem ser citadas também as pesquisas sobre madeiras em fadiga conduzidas por Carvalho (1996), Carvalho (1997), Clorius et al. (2000), Gong e Smith (2003), Ando et al. (2005), Macedo (2000), Guimarães et al. (2012), Salmi et al. (2012), Myslicki, Vallé e Walther (2016).

Hayashi, Sasaki e Fuyuki desenvolveram estudos de fadiga na madeira focados em emendas no Instituto de Pesquisa de Madeira em Kyoto no Japão em 1979, 1980, 1981, 1983 e 1984 (Hayashi e Sasaki, 1981; Hayashi, Sasaki e Fuyuki, 1983; Hayashi e Sasaki, 1984, Sletteland apud Dagher et al., 1996).

Dagher et al. (1996) realizou testes de fadiga em treliças em escala real compostas de chapas com dentes estampados. Os testes determinam as tensões residuais.

Dagher et al. (1996) e Dagher e West (1998) estudaram a fadiga em ligações com o intuito de determinar a tensão residual do teste de fadiga e serviram para estabelecer parâmetros de projetos para as pontes e sugerir valores de redução na capacidade admissível de arrancamento, tração e cisalhamento da chapa.

A partir de 1980 estudos sobre produtos de madeira foram realizados por diferentes autores. Os estudos com maior relevância foram desenvolvidos por Kyanka (1980), Bonfield et al. (1994), Dinwoodie et al. (1995), Bao e Eckelman (1995), Bao, Eckelman e Gibson (1996), Thompson et al. (1996), Pritchard et al. (2001), Hacker e Ansell (2001), Thompson et al. (2002), Sasaki et al. (2003), Thompson et al. (2005), Sugimoto, Yamasaki e Sasaki (2006), Sugimoto e Sasaki (2006a), Sugimoto e Sasaki (2006b), Sugimoto e Sasaki (2007), Sugimoto, Sasaki e Yamasaki (2007a), Sugimoto, Sasaki e Yamasaki (2007b), Macedo e Calil Junior (2007), Sugimoto e Yamasaki (2008), Miyazaki e Nakano (2008), Del Menezzi et al. (2011), Sasaki, Oya e Yamasaki (2014), Li e Lam (2016), Li et al. (2016), Nagase, Kobayashi e Yasumura (2018), Ferraz et al. (2020) e Christoforo et al. (2020). Devido aos produtos de madeira serem diversos como, por exemplo, MDP (Medium Density Particleboard ou Painel de Partículas de Média densidade), MDF (Medium Density Fiberboard ou Painel de Fibras de Média Densidade), OSB (Oriented Strand Board ou Painel de Tiras de Madeira Orientadas) e variarem também porcentagens de materiais na constituição bem como modo de confecção, tipos de produtos ligantes e espécies de madeira, o número de trabalhos citados acima não é excessivo sobre o tema e ainda há uma vasta gama de estudos que podem ser desenvolvidos.

Assim, o objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência da fadiga no módulo de elasticidade da madeira por meio de ensaios que simulem situações repetitivas correntes em estruturas como, por exemplo, os esforços sofridos por: longarinas de uma ponte quando solicitadas pela passagem de carros, a trama de um telhado quando solicitada pela ação do vento ou o ciclo de instalação de escoras de madeira em canteiros de obras.

2. OBJETIVOS

Frente à contextualização apresentada na seção anterior, os objetivos do presente trabalho foram organizados conforme mostrado abaixo.

Objetivos primários:

- Determinar a relação entre o fenômeno da fadiga e o possível decréscimo dos valores das propriedades mecânicas da madeira;

- Determinar valores confiáveis para o módulo de elasticidade de madeiras das classes de resistência C20, C30, C40 e C60 quando submetidas ao efeito da fadiga mecânica em aplicações de longo prazo;

- Determinar a partir de quantos ciclos de fadiga o decréscimo das propriedades mecânicas se torna expressivo e deve ser considerado nos cálculos de projetos e na vida útil das estruturas;

Objetivos secundários:

- Comparar os valores dos corpos de prova ensaiados para determinar além das médias amostrais também a variância apresentada nos ensaios laboratoriais;

- Investigar se há diferenças no comportamento das madeiras Pinus (*Pinus sp.*, *Pinaceae*), Caxeta (*Simarouba sp.*, *Simaroubaceae*), Piquiá (*Caryocar villosum (Aubl.) Pers.*, *Caryocaraceae*) e Roxinho (*Peltogyne sp.*, *Leguminosae*) quando submetidas ao mesmo ensaio de fadiga, ou seja, se madeiras de diferentes classes de resistência apresentam comportamentos diferentes entre si;

- Aumentar a base de dados sobre o efeito da fadiga em madeiras comercializadas e utilizadas no Brasil.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1. Madeira

A madeira é um material com função estrutural interessante para muitas aplicações pois possui propriedades que competem com os demais materiais usualmente utilizados. Quando devidamente projetada e empregada a madeira pode ser aplicada em uma gama diversa de estruturas e produtos. A madeira é diariamente aplicada na resolução de problemas de engenharia. Na engenharia civil, por exemplo, ela é utilizada em fôrmas e cimbramentos para execução de concreto, concreto armado e protendido; em estruturas de residências, comércios, galpões e prédios; em coberturas residenciais urbanas e rurais, comerciais e industriais; em estruturas de transposição de obstáculos de pequeno e grande porte como passarelas, pontes e viadutos; em estruturas de armazenamento como silos; em estruturas de linhas de transmissão de energia elétrica e telefônica; em peças de acabamentos como forros, pisos, painéis de divisórias, caixilhos, portas, janelas e lambris; além de ser empregada em móveis e artigos de decoração (FERNÁNDEZ E ECHENIQUE, 1981; HELLMEISTER, ROCCO LAHR e DIAS, 1991; BARROS JÚNIOR, ROCCO LAHR e NOGUEIRA, 1993; PINHEIRO E ROCCO LAHR, 1999; ROCCO LAHR, CALIL e DIAS, 2002; CHRISTOFORO et al., 2012 e STOLF et al., 2014).

3.1.1. Pinus

O Pinus (*Pinus sp.*, *Pinaceae*) é uma madeira que foi introduzida no Brasil e sua madeira no país é provida de reflorestamento. Ela é popularmente conhecida também como Pinheiro e Pinheiro-americano, porém o Pinus é o nome popular mais utilizado. Internacionalmente ela recebe o nome popular de *Southern yellow pine* (IPT, 2023d).

A ocorrência do Pinus no Brasil está nos estados do Amapá, Espírito Santo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo (IPT, 1989). Esta madeira ainda pode ser encontrada nos Estados Unidos.

Entre as características citadas pelo IPT (1989) para o Pinus estão o cerne e alborno indistintos pela cor branco-amarelada com brilho moderado e camadas de crescimento distintas, expondo uma brusca transição de tons entre o lenho inicial e o tardio, o que pode ser observado na figura abaixo.

Figura 1 – Madeira Pinus (*Pinus sp.*, *Pinaceae*)



Fonte: IPT, 2023d (Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/7-pinus.htm)

Esta madeira possui densidade baixa, grã direita, textura fina e tem classe de resistência C30 de acordo com a norma NBR 7190 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997) e classes de resistência 1, 2 ou 3 de acordo com a norma NBR 7190-2 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2022).

Assim como a Caxeta, o Pinus tem durabilidade natural reduzido por ser suscetível a fungos manchadores e apodrecedores, perfuradores marinhos, broca-de-madeira e a cupins, e IPT (1989b) aponta ainda a suscetibilidade a fungos emboloradores. Esta madeira também é considerada como fácil de ser preservada e trabalhada e de secagem fácil. Ela é vastamente utilizada na indústria brasileira sendo uma das madeiras mais conhecidas popularmente. O pinus é empregado na construção civil geral e estrutural, se destacando em ser muito utilizada na fabricação de fôrmas para concreto. Além de seu consumo crescente em produtos engenheirados estruturais leves, o Pinus também é empregado em móveis, bobinas, carretéis, embalagens e outros usos menores (IPT, 2023d).

3.1.2. Caxeta

Caxeta (*Simarouba amara* Aubl., *Simaroubaceae*) é um nome popular utilizado para algumas espécies de madeira clara de baixa densidade, por isso, é importante sempre indicar o nome científico desta madeira. A espécie citada pode ser popularmente encontrada também é vastamente conhecida como Caixeta ou Marupá. Além destes nomes principais ainda recebe os nomes Caixeta, Marupaúba, Paraparaíba, Pararaúba, Parariúba, Pau-paraíba, Simaruba, Tamanqueira. Internacionalmente ela recebe nomes populares diferentes de acordo com o país. Na Costa Rica, Honduras, Nicarágua e Panamá ela pode ser encontrada como *Aceituno*, na Alemanha, Espanha e França ela recebe o nome de *Marupá* assim como no Brasil e na Colômbia, Estados Unidos, Guiana, Itália, Suécia, Venezuela e Inglaterra é conhecida como *Simaruba*, nome também utilizado no Brasil (ASTM, 2018; ASTM, 2020a; ATIBT,1982; BSI,1991).

A ocorrência da Caxeta no Brasil se dá em seis estados, Amazônia, Acre, Amapá, Mato Grosso, Pará, Rondônia. Fora do Brasil a ocorrência dela se dá na América Central, Bolívia, Colômbia, Equador, Guiana, Guiana Francesa, Peru, Suriname e na Venezuela (IPT, 2023a).

Esta madeira apresenta cerne e alburno esbranquiçados a levemente amarelados, brilho moderado e superfície lustrosa como pode ser observado na figura 1.

Figura 2 - Madeira Caxeta (*Simarouba amara* Aubl., *Simaroubaceae*)



Fonte: IPT, 2023a (Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/43-caxeta.htm)

Esta madeira possui densidade baixa, grã direita, textura média a grossa e tem classe de resistência C20 de acordo com a norma NBR 7190 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997) e D20 de acordo com a norma NBR 7190-3 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2022).

A sua durabilidade natural não é muito longa por ser suscetível a fungos manchadores e apodrecedores, perfuradores marinhos, broca-de-madeira e a cupins, porém se trata de uma madeira fácil de preservar com tratamento em autoclave, tendo penetração total e uniforme do preservante. Esta madeira também é considerada como fácil de ser trabalhada e é empregada na construção civil, em mobílias, instrumentos musicais, embalagens e outros usos menores (Berni et al.,1979; INPA,1991; IBAMA,1997a).

3.1.3. Piquiá

Piquiá de nome científico *Caryocar villosum* (Aubl.) Pers., *Caryocaraceae*, também é muito conhecida pelo nome Pequiá. Além destes ela ainda recebe os nomes pequi, pequi-roxo, piqui, piqui-rosa, piquiá-bravo, piquiá-verdadeiro. Internacionalmente encontramos esta

madeira com os nomes *abe a beurre* na Guiana Francesa, *bats souari* e *pekea* na Inglaterra (IPT, 1989b; IPT, 2023c).

A sua decorrência se dá em maior parte no Brasil nos estados do Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia e Roraima (IPT, 2023c).

Seu cerne é esbranquiçado e levemente rosado ou ainda, bege amarelado com superfície lustrosa, como mostra a figura abaixo (IPT, 2023c).

Figura 3 – Madeira Piquiá (*Caryocar villosum* (Aubl.) Pers., *Caryocaraceae*)



Fonte: IPT, 2023c (Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/72-piquia.htm)

Esta madeira possui densidade alta, grã reversa, textura grossa, é pesada e tem classe de resistência C40 de acordo com a norma NBR 7190 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997).

Esta madeira tem durabilidade natural alta por ser resistente ao ataque de fungos, perfuradores marinhos, broca-de-madeira e cupins.

Por se tratar de uma madeira densa tem baixa permeabilidade de preservante mesmo sob pressão e, por isso, possui baixa tratabilidade, porém este fator não impacta muito

em seu uso pois, como exposto, se tratar de uma madeira com resistência natural a ataques de organismos xilófagos (IPT, 1989b).

O Piquiá é uma madeira difícil de ser trabalhada por conta de sua densidade, peso e sua grã reversa. Apesar disto, é uma madeira utilizada na construção civil pesada interna e externa em dormentes ferroviários, defensas, postes, vigas, caibros e para produzir cruzetas e mourões. Duas aplicações interessantes que esta madeira recebe é em embarcações nas quilhas, conveses, costados e cavernas, e na tanoaria para a produção de barris (IPT, 2023c).

3.1.4. Roxinho

O Roxinho recebe o nome científico *Peltogyne sp.*, *Leguminosae*, e popularmente é conhecido também como roxinho-pororoca, pau-roxo, pau-roxo-da-terra-firme, pau-roxo-da-várzea, amarante, violeta e coataquiçaua. Este gênero é encontrado em praticamente todas as matas nativas brasileiras além de ocorrer na Bolívia, Colômbia, Guiana, Guiana Francesa e Suriname. Esta madeira pode ser encontrada internacionalmente com os nomes *amarante*, *bois violet*, *purple hart*, *purpleheart*, *violet holz* (IPT, 2023b).

Seu cerne roxo é o que dá seus nomes populares, sendo uma madeira bem característica e fácil de reconhecer.

Figura 4 – Roxinho (*Peltogyne sp.*, *Leguminosae*)



Fonte: IPT, 2023b (Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/49-roxinho.htm)

Esta madeira possui densidade alta, grã direita e irregular, textura fina a média e tem classe de resistência C60 de acordo com a norma NBR 7190 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997) e D60 de acordo com a norma NBR 7190-3 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2022).

O Roxinho tem durabilidade natural alta ao ataque de fungos apodrecedores e cupins, porém possui baixa resistência a perfuradores marinhos. Esta madeira tem baixa permeabilidade de preservante e seu cerne é impermeável a alguns tratamentos mesmo sob pressão (Berni et al.,1979; IPT,1989a; IBAMA,1997a).

Esta madeira é moderadamente difícil de ser trabalhada por conta de sua dureza e também pela exsudação de resina quando aquecida pelas ferramentas. Apesar destes fatores, é uma madeira utilizada na construção civil pesada e leve tanto interna como externa, ela pode ser encontrada em dormentes ferroviários, estacas, estruturas de cobertura, esquadrias, assoalhos, entre diversas outras aplicações. Além da construção civil, ela também é utilizada em embarcações, assim como o Piquiá, móveis, e outras aplicações de menor relevância (IPT, 2023b).

3.2. Embasamento teórico sobre o tema

Para facilitar a continuidade do desenvolvimento deste estudo bem como, tornar mais prática a abordagem do tema nos resultados e em trabalhos futuros, esse tópico apresenta as normas internacionais e nacionais sobre madeira e também os principais trabalhos sobre fadiga em peças e componentes estruturais de madeira maciça e produtos derivados de madeira.

3.2.1. Normas

A norma da ASTM nomeada D2719 (2019a) apresenta os métodos de ensaio padrão para painéis estruturais em cisalhamento. A norma D3043 da ASTM de 2017 expõe os métodos de teste padrão para painéis estruturais em flexão. A norma ASTM - D3500 (2020b) apresenta os métodos de teste padrão para painéis estruturais de madeira em tensão. A ASTM - D6815 de 2015 traz as especificações padrão para avaliação da duração da carga e efeitos de fluência da madeira e produtos à base de madeira. A ASTM - D6874 (2020c) apresenta os métodos de teste padrão para avaliação não destrutiva da rigidez da madeira e de materiais à base de madeira usando vibração transversal ou propagação de onda de tensão. Há também a ASTM - E606 (2019b) que apresenta os métodos de teste padrão para teste de fadiga controlada por tensão, porém não é específica para madeiras, trazendo em seu conteúdo o foco em testes e peças metálicas.

Todas as normas citadas podem servir de parâmetro para o ensaio ou aplicação de peças que sofrem o efeito da fadiga. Elas devem ser consultadas e utilizadas de acordo com a finalidade específica da peça, do projeto.

No Brasil as normas ABNT NBR 9487:1986 “Classificação de madeira serrada de folhosas”, ABNT NBR 7190:1997 “Projeto de estruturas de madeira”, ABNT NBR 7190-1:2022 “Projeto de estruturas de madeira - Parte 1: Critérios de dimensionamento”, ABNT NBR 7190-2:2022 “Projeto de estruturas de madeira - Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira”, ABNT NBR 7190-3:2022 “Projeto de estruturas de madeira Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas”, ABNT NBR 7190-4:2022 “Projeto de estruturas de madeira Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização peças estruturais”, ABNT NBR ISO 1096:2006 “Madeira compensada - Classificação”, ABNT NBR 15799:2013 “Pisos de madeira com e sem acabamento – Padronização e classificação”, ABNT NBR 9533:2012 “Compensado - Determinação da resistência à flexão estática”, ABNT NBR 14810-2:2018 “Painéis de

partículas de média densidade” e ABNT NBR 15316-2:2019 “Painéis de fibras de média densidade”, por exemplo, que apresentam as classificações, métodos de ensaios e critérios para projetos de madeira e de painéis de madeira, não prescrevem requisitos para considerar o efeito da fadiga nas propriedades do material. No país, ainda não há normativas sobre madeiras e produtos derivados de madeiras que abordem a fadiga. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986, 1997, 2006, 2012, 2013, 2018, 2019, 2022a, 2022b, 2022c, 2022d).

Tendo isso em vista, os trabalhos publicados sobre o tema ganham maior importância e devem ser consultados e utilizados sempre que necessário. Assim como, novas pesquisas sobre o tema se fazem essenciais para sanar dúvidas a respeito de tal fenômeno sobre as diversas madeiras utilizadas no Brasil.

3.2.2. Estudos em fadiga na madeira maciça

A partir de 1980 a fadiga na madeira começou a ser objeto de estudo e investigação. Okuyama, Kohara, Itoh, Marsoem e Bordonné são responsáveis por oito trabalhos publicados entre 1984 e 1994, todos utilizando corpos de prova de madeira maciça.

Okuyama, Itoh e Marsoem (1984) apresentaram as respostas mecânicas da madeira a cargas repetidas. No estudo citado, a madeira *Picea sp.* foi utilizada e a fadiga na tração e compressão foi investigada até a fratura dos corpos de prova. Esta é a primeira parte do trabalho desenvolvido pelos autores que inclusive, recebeu o nome de “Respostas mecânicas da madeira a cargas repetidas, 1: Fraturas por fadiga por tração e compressão”.

Marsoem, Bordonné e Okuyama (1987) apresentaram as respostas mecânicas da madeira ao carregamento repetido com enfoque no efeito da forma de onda na fadiga de tração. O trabalho é continuidade do anterior apesar de um dos autores não ser o mesmo conforme pode ser observado. O estudo recebeu inclusive o número “2” em seu título para indicar a sequência do estudo, o mesmo ocorre em todos os oito trabalhos que recebem em seu nome a numeração de acordo com os momentos de publicação.

Bordonne, Okuyama e Marsoem (1987) apresentaram as respostas mecânicas da madeira ao carregamento repetido focando desta vez o efeito da forma de onda na energia dissipada. Naquele trabalho foi publicado no mesmo ano do anterior é sequência que complementa os dois anteriores.

Okuyama e Marsoem (1987) apresentaram as respostas mecânicas da madeira ao carregamento repetido, publicado no mesmo ano dos dois anteriores, esse é o quarto da série de oito trabalhos sobre as respostas mecânicas da madeira a ciclos de carregamento repetidos que geram fadiga no material.

Kohara e Okuyama (1992) apresentaram as respostas mecânicas da madeira ao carregamento repetido com foco no efeito do tempo de duração e do número de repetições no tempo de falha na flexão.

Kohara e Okuyama (1993) apresentaram o esquema de partição de perda de energia para prever o tempo de vida à fadiga de tração. A partir desse trabalho já se torna mais aplicável os estudos sobre a fadiga em peças em situações reais, no sentido de prever os reais efeitos da fadiga sobre a madeira e a vida a fadiga bem como a vida útil do elemento estrutural.

Kohara e Okuyama (1994a) apresentaram o estudo sobre a dependência da perda de energia na amplitude da tensão e efeito das formas de onda no tempo de fadiga. O estudo é mais completo em relação aos efeitos de tensão e forma de onda, servindo de precedente para demais estudos sobre o mesmo tópico.

Kohara e Okuyama (1994b) apresentaram o oitavo e último estudo da sequência sobre as respostas mecânicas da madeira ao carregamento repetido. O tópico abordado foi a variação dos comportamentos de perda de energia de acordo com as espécies de madeira.

Carvalho (1996) e Carvalho (1997) apresentaram estudos sobre madeiras portuguesas e suas estruturas anatômicas e propriedades mecânicas. Nestes dois estudos a fadiga foi estudada nos elementos estruturais de madeira. O estudo apontou um importante fator sobre a temperatura e o teor de umidade do ambiente ao qual a madeira está exposta. Esses dois parâmetros têm grande influência no valor da resistência à fadiga e os resultados experimentais apontaram que a cada 1% diminuído no valor do teor de umidade, há uma diminuição de cerca de 4% da resistência à fadiga. Os resultados experimentais obtidos também indicaram que o quociente entre a resistência à fadiga e a resistência à flexão estática é, em média, da ordem de um terço e, o quociente entre a resistência à fadiga e a massa volumétrica da madeira é, em média, da ordem de 6 a 7.

Clorius et al. (2000) apresentou um estudo sobre a falha de elementos de madeira submetida a ciclos de carga em compressão paralela às fibras. Os corpos de prova foram ensaiados até a falha no carregamento por fadiga. Foi utilizada onda quadrada em um nível de excitação de tensão correspondente a 80% da resistência de curto prazo. Naquele estudo quatro

frequências foram usadas sendo elas 0,01 Hz, 0,10Hz, 1Hz e 10 Hz. Durante os ensaios a fluência, deformação máxima, rigidez e trabalho foram monitorados. Algumas hipóteses levantadas foram rejeitadas ao longo do estudo e ao final, foi indicada a relação entre a redução da rigidez e a fluência acumulada assim como, o esboço de um modelo explicando os efeitos da duração do carregamento e das sequências de carregamento.

Gong e Smith (2003) apresentaram um estudo sobre a fadiga usando testes de compressão paralelos aos grãos. Os corpos de prova foram ensaiados para investigar os efeitos da forma de onda e da sequência de carregamento na vida de fadiga de baixo ciclo. Foram utilizadas formas de onda triangulares, sinusoidais e quadradas, com nível de pico de tensão de 90% da resistência à compressão estática e frequência de carga de 0,5 Hz. Para formas de onda quadradas foram adotadas taxas de trabalho variando de 0,10 a 0,90. Para os dois tipos de sequências de carregamento cíclico escalonado foram usados uma relação de trabalho de 0,50. Os resultados experimentais indicaram que a vida em fadiga é função do trabalho realizado pela carga e da forma da onda ao longo de um ciclo. O dano se acumulou mais rapidamente em formas de onda quadradas com uma alta taxa de trabalho. A forma de onda menos prejudicial entre as aplicadas é a onda triangular. Para formas de onda com o mesmo trabalho, a taxa de carregamento máxima é a mais forte influência no acúmulo de danos na madeira. Sequências de carregamento cíclico escalonado de alto a baixo são mais prejudiciais do que as sequências de baixo a alto, sugerindo que a madeira tem "memória". O estudo tem aplicação prática para o comportamento de membros em compressão e conexões em sistemas estruturais sujeitos a esforços de cargas cíclicas.

Ando et al. (2005) estudaram as propriedades de fadiga por torção de duas espécies de madeiras japonesas (Madeira de faia ou Faia-japonesa e Cedro-branco) sob torque controlado. As frequências aplicadas foram de 0,1 Hz e 1 Hz. Os resultados experimentais apontaram a relação entre o nível de tensão de cisalhamento e o logaritmo do número de ciclos até a ruptura. Os limites de fadiga torcional de ambas as espécies foram assumidos em cerca de 30% dos níveis de tensão.

Macedo (2000) estudou a resistência e rigidez de emendas dentadas à fadiga na tração. Foram aplicadas diferentes cargas de carregamentos cíclicos e níveis de frequência em corpos de prova de *Eucalyptus grandis* e *Pinus cariebea var. hondurensis*, colados com adesivo do tipo fenol-resorcinol ou com o adesivo de poliuretano à base de mamona. Os resultados laboratoriais apontam que a alteração do módulo de elasticidade das emendas dos corpos de prova não estava relacionada com a quantidade de ciclos aplicados. Foram estabelecidos

coeficientes de redução para as emendas dentadas em relação à resistência à fadiga da madeira maciça analisada.

Guimarães et al. (2012) publicaram sobre o efeito do carregamento cíclico em flexão estática nas propriedades mecânicas da madeira, constante elástica, velocidade de propagação da onda. O estudo utilizou quatro espécies florestais de madeira, *Dipteryx odorata*, *Pouteria guianensis*, *Cedrelinga catenaeformis* e *Tectona grandis*. Os corpos de prova das quatro espécies foram submetidos a carregamentos de 40.000 e 100.000 ciclos, a uma frequência de 0,4 Hz e carga em flexão a 40% do valor da ruptura. Antes e após os carregamentos foi realizada a leitura do tempo de propagação da onda de ultrassom para obter a velocidade e a constante elástica das amostras. Os resultados dos experimentos apontaram que a velocidade de propagação da onda e a constante elástica tiveram valores ligeiramente superiores conforme o aumento do número de ciclos. Para as quatro espécies analisadas o aumento da constante elástica variou entre 3 e 8% nos ciclos de 40.000 e 100.000, respectivamente.

Salmi et al. (2012) estudaram o carregamento cíclico ao longo das direções radial e tangencial da madeira. A utilização da madeira em diferentes posições durante o ensaio tem o intuito de gerar fadiga localizada nas peças. O estudo publicado relatou pela primeira vez a existência de uma redução localizada na elasticidade causada pela impactação por compressão repetida aplicada ao longo da direção tangencial da madeira. Os autores utilizaram técnicas de ultrassom e tomografia de raios-x para quantificar a fadiga induzida e a queda no módulo de cisalhamento. Foi utilizada também uma técnica de entrelaçamento para aumentar a precisão do perfil de profundidade de rigidez ultrassônica. Ambas as geometrias, radial e tangencial apresentaram deformação localizada, porém a camada fatigada apresentou diferenças entre as geometrias radial e tangencial da madeira sendo a radial com perfil mais íngreme.

Myslicki, Vallé e Walther (2016) estudaram a fadiga em ciclos de curta duração da madeira de faia e juntas de madeira coladas com adesivo. Foram realizados testes cíclicos com um aumento gradual da tensão enquanto a deformação plástica foi monitorada. A amplitude da deformação plástica fornece sinais confiáveis para uma estimativa da resistência à fadiga. Isso é validado por testes cíclicos tradicionais com amplitudes de tensão constantes. Os autores concluíram que a abordagem de teste fornece resultados confiáveis e apresentou um alto potencial para economia de custos e tempo para juntas de madeira coladas com adesivo.

Os estudos da fadiga por carregamentos cíclicos tiveram abordagem em ligações de elementos a partir de 1976 com Sletteland apud Dagher et al. (1996). Para peças estruturais

como as de pontes houve a necessidade de se estudar o comportamento da ligação quando sob efeito de fadiga. Sletteland sendo acompanhados por Hayashi, Sasaki e Fuyuki desenvolveram no Instituto de Pesquisa de Madeira em Kyoto no Japão em 1979, 1980, 1981, 1983 e 1984 focados em emenda, porém os estudos indicaram diferenças significativas não obtendo resultados satisfatórios. Devido a isso, anos depois, a Universidade de Maine conduziu estudos para o melhor entendimento do comportamento das ligações quando submetidas à fadiga.

Dagher e West (1998) investigou a fadiga nas ligações utilizando chapas dentadas com o intuito de determinar a tensão residual. O estudo utilizou 155 corpos de provas estáticas. Os resultados possibilitaram estabelecer parâmetros de projetos para as pontes e sugerir valores de redução na capacidade admissível de tração, cisalhamento e arrancamento das chapas dentadas.

Dagher et al. (1996) realizou testes de fadiga em treliças em escala real compostas de chapas dentadas. Os testes utilizaram 34 corpos de prova, carregamentos cíclicos com frequência de 5Hz, 2.000.000 de ciclos e determinaram as tensões residuais. Com a definição dos 2.000.000 de ciclos nos ensaios, é possível observar a interação entre fadiga e corrosão nas chapas de dentes estampados. Vale ressaltar que a AASHTO LRFD (2008) não é um documento normativo específico para pontes de madeira, levando em consideração o tráfego diário médio em pontes de madeira, os autores indicaram ao longo do estudo que 700.000 ciclos seriam suficientes para o critério de dimensionamento das pontes e, portanto, para o estudo.

3.2.3. Estudos em fadiga em produtos derivados da madeira

Estudos sobre a fadiga dos produtos derivados de madeira já foram conduzidos considerando vários fatores influenciadores. Entre os principais fatores estão as condições de carga que incluem a forma de onda de carregamento e a frequência de carga. Estudos apontam que, conforme esperado, tanto a forma de onda de carregamento como a frequência de carga afetam a vida da madeira e compósitos de madeira em tensão, compressão e torção. (OKUYAMA, ITOH e MARSOEM, 1984; MARSOEM, BORDONNÉ e OKUYAMA, 1987; KOHARA e OKUYAMA 1994a; KOHARA e OKUYAMA 1994b; CLORIUS et al., 2000; GONG e SMITH, 2003; ANDO et al., 2005).

Os painéis à base de madeira, tais como compensado e OSB (Oriented Strand Board ou Painel de Tiras de Madeira Orientadas) são amplamente utilizados na construção civil

como pisos, paredes e vigas de edifícios. Os painéis possuem resistência e rigidez à carga de cisalhamento causado por ventos e forças sísmicas, portanto, o estudo da carga de cisalhamento repetitiva aplicada no painel é importante tendo em vista que em diversos países além da ação do vento, os painéis são solicitados com frequências por ações como as de terremotos (LEE e STEPHENS, 1988, SHRESTHA, 1999).

Kyanka (1980) investigou o comportamento da madeira e dos painéis à base de madeira submetidos à fadiga. O estudo buscou apresentar uma visão geral do estado de fadiga para madeira e produtos de madeira. Os autores apontaram as dificuldades encontradas ao tentar modelar o comportamento de produtos de madeira expostos a fenômenos de carregamento cíclico.

Bonfield, Ansell, Dinwoodie, Thompson, Hacker, Pritchard, Paxton e Mundy publicaram sete trabalhos nos anos de 1994, 1995, 1996, 2001, 2002 e 2005 sobre a fadiga em produtos derivados de madeira.

Bonfield et al. (1994) publicaram o primeiro trabalho de uma sequência de três sobre a fadiga e deformação de painéis de madeira. Esta primeira parte apresentou os parâmetros, dados e resultados da fadiga a $R = 0,01$. Os painéis estruturais foram submetidos a cargas de fadiga e de fluência em flexão de quatro pontos, sendo o pico de tensão de fadiga igual à tensão de fluência constante. Foram utilizadas as tensões de fadiga de pico de 50, 60, 70 e 80% da resistência à flexão estática. Como resultado foi gerada uma curva de tensão x \log_{10} dos ciclos. Foram monitoradas continuamente a deformação de fluência subjacente, o módulo dinâmico e a energia dissipada por ciclo. As amostras de 70 e 80% experimentam uma diminuição gradual no módulo dinâmico e um aumento na área do loop de histerese durante os testes de fadiga. As amostras de 50 e 60% mostram um aumento inicial no módulo dinâmico antes que um declínio até a falha seja observado. As amostras de fluência nunca falharam antes das amostras de fadiga no mesmo nível de tensão de pico, mas até perto do ponto de falha, as deformações de fluência eram quase sempre maiores que as deformações de fadiga no tempo decorrido. Assim, os autores concluíram que o mecanismo de acúmulo de danos por fadiga difere do mecanismo de deformação por fluência.

Dinwoodie et al. (1995) publicaram a segunda parte do trabalho de fadiga e fluência em painéis aglomerados. Essa publicação tem como foco a influência da fadiga cíclica lenta no comportamento de fluência de aglomerado em uma variedade de níveis de tensão e teores de umidade. Os corpos de prova foram ensaiados com ciclos de 7 horas com carga aplicada e 17 horas descarregado e, também o contrário, sendo o ciclo composto por 17 horas

carregado e 7 horas descarregado ou carga constante, a fim de avaliar o efeito do carregamento cíclico na deformação por fluência. Os testes foram realizados em três níveis de umidade (30, 45 e 90) e em três níveis de estresse (30, 45 e 60%) da resistência de curto prazo. A taxa de fluência das amostras sob carga constante foi maior do que sob carga cíclica, com as amostras de 7 horas carregadas e 17 horas sem carga, resultando na menor taxa de fluência. A análise dos dados em uma base de tempo acumulado sob carga mostrou que a lei da sobreposição não se aplica às amostras carregadas de 7 horas e descarregadas de 17 horas nos níveis de estresse de 30% e 45%, com essas amostras apresentando deflexão menor do que para as outras condições de carregamento. O aumento do nível de tensão aplicado às amostras produziu um aumento quase linear na fluência relativa para todos os regimes de carregamento. As amostras de 7 horas carregadas e 17 horas descarregadas deram valores consistentemente mais baixos de fluência relativa em todos os níveis de estresse, mas particularmente nos níveis de estresse de 30 e 45%. O aumento da umidade relativa de 30% para 65% teve um efeito quase desprezível na fluência relativa de todas as amostras, mas o aumento da umidade para 90% causou um aumento acentuado na fluência relativa.

Thompson et al. (1996) publicaram o último estudo da sequência de três trabalhos. Esta última publicação teve o foco na frequência utilizada durante os ensaios de fadiga. Os painéis aglomerados estruturais usados como piso podem ser expostos a uma combinação de carga de fluência e carga de fadiga em uma ampla faixa de frequências. Cargas de fluência são produzidas por massas estáticas, como máquinas. Cargas de fadiga surgem de cargas intermitentes, como empilhadeiras em movimento, pessoas em movimento ou máquinas vibrando. Foram realizados testes de flexão de quatro pontos em fadiga e fluência, assim como nos dois últimos estudos. Os testes utilizaram três frequências classificadas como baixa, média e alta. O objetivo foi examinar o efeito da frequência no desempenho de fadiga de aglomerado, seguindo a taxa de desenvolvimento de micro tensão em cada caso no mesmo pico de tensão. A relação entre a tensão de fadiga mínima e máxima (a relação R) foi fixada em $R = 0,1$. O desempenho dos painéis em aplicações de piso é mostrado ser altamente dependente da frequência de carregamento. O aumento da frequência aumentou o número de ciclos até a falha, assim como a redução do nível de estresse. O acúmulo de danos durante os testes indica que há um limite de fadiga, em amplitude constante, em algum ponto logo abaixo de 20% de sua resistência à flexão estática.

Hacker e Ansell (2001) conduziram pesquisas em painéis de MDP (Medium Density Particleboard ou Painel de Partículas de Média densidade) e MDF (Medium Density

Fiberboard ou Painel de Fibras de Média Densidade). Foram ensaiados corpos de prova com diferentes tensões em relação à resistência última com o intuito de analisar o dano causado após o ciclo de fadiga dos painéis. Os corpos de prova foram ensaiados com amplitude constante em tensão $R = 0,1$, compressão $R = 10$ e carregamento reverso $R = -1$, para acompanhar as mudanças nas propriedades e o acúmulo de danos por fadiga. Loops de histerese foram capturados durante esses testes e as curvas de forma de tensão x número de ciclos até a falha (S-N) foram estabelecidas. O carregamento invertido é o modo mais prejudicial de aplicação de tensão cíclica. Em termos de resistência estática, o laminado de madeira é mais fraco na compressão do que na tração. No entanto, em baixos níveis de estresse, após muitos ciclos de fadiga, a vida em fadiga é maior em compressão-compressão do que em tensão-tensão. A forma dos loops de histerese capturados é fortemente influenciada pelo modo de carregamento. À medida que o dano subcrítico se desenvolve, a área do loop aumenta e o módulo dinâmico cai. As deformações de fadiga máxima e mínima, o módulo dinâmico e a área do loop foram plotados em função do número de ciclos de fadiga. A maioria dos danos ocorre no final da vida útil da amostra, mas as alterações nas propriedades podem ser detectadas em todos os testes de fadiga. A normalização dos dados de fadiga demonstra que o comportamento à fadiga dos painéis de madeira-epóxi é consistente.

Pritchard et al. (2001) publicaram sobre o efeito da umidade relativa no módulo de elasticidade, MOR (módulo de ruptura) e vida à fadiga de painéis MDF, OSB e aglomerados. Foram utilizados dois teores de umidade relativa do ambiente sendo, 65% e 85%. Como esperado, o ambiente com teor de umidade relativa de 85% foi mais prejudicial em relação ao ambiente com 65%, diminuindo significativamente os valores das propriedades estudadas. As resistências estáticas médias de MDF, OSB e aglomerado a 65% UR foram 47,9 MPa, 27,9 MPa e 21,0 MPa, respectivamente, em comparação com 34,59 MPa, 21,70 MPa e 10,61 MPa a 85% UR. Em um ambiente de 65% de UR, os valores do módulo dinâmico mostraram que, enquanto o MDF e o aglomerado exibem valores de rigidez semelhantes (4 GPa), o OSB é aproximadamente 50% mais rígido. No entanto, a 85% UR, o MDF foi o mais rígido dos três materiais, seguido por OSB e aglomerado. Esse fenômeno se deve às características na composição dos painéis, já que o MDF é mais homogêneo que o OSB e aglomerado. O desempenho da vida de fadiga de todos os três produtos de painel foi significativamente menor a 85% UR em comparação com 65% UR. No geral, o ambiente de alta UR teve um efeito visivelmente prejudicial no módulo de elasticidade, e vida à fadiga de OSB e aglomerado.

Thompson et al. (2002) estudaram a fadiga em painéis derivados de madeira em

duas partes. A primeira publicação recebeu o título de “Fadiga em painéis derivados de madeira Parte 1: A variabilidade de força e desempenho de fadiga de OSB, aglomerado e MDF”. Foram realizados ensaios de flexão de quatro pontos. As resistências à flexão médias diminuíram na seguinte ordem MDF > OSB > aglomerado. À medida que a tensão foi reduzida, a diferença entre os três materiais diminuiu. Em baixas tensões, o desempenho dos três materiais foi bastante semelhante. No entanto, a variação da resistência à flexão no OSB foi consideravelmente maior do que no aglomerado e no MDF. Em relação às resistências estáticas, o desempenho à fadiga do aglomerado foi superior ao do OSB e, o do MDF foi inferior a ambos os materiais.

Thompson et al. (2005) publicaram a segunda parte do trabalho. Esta segunda publicação teve como foco as mudanças de propriedade durante os ciclos de fadiga no OSB, aglomerado e MDF. Os painéis à base de madeira são viscoelásticos, portanto, quando uma carga (tensão) é aplicada a eles, há um lapso de tempo antes que uma deflexão (deformação) seja produzida, o que resulta em histerese (perda de energia). A captura de loops de histerese de tensão x deformação é um método não interruptivo de monitoramento do dano produzido durante o teste de fadiga. Os loops de histerese foram capturados durante o teste de fadiga de flexão de OSB, aglomerado e MDF em flexão de quatro pontos, permitindo o monitoramento do desenvolvimento de danos por fadiga. O MDF testado apresentou uma resistência média à flexão maior do que o OSB e o aglomerado. Quando as tensões foram aplicadas aos materiais como uma porcentagem de suas resistências à flexão, as tensões aplicadas às amostras de MDF foram maiores do que aquelas aplicadas às amostras de OSB e aglomerado. Como resultado, as micro tensões também foram maiores para MDF. O OSB era mais rígido do que o aglomerado e o MDF, que apresentavam rigidez similar. As informações obtidas dos loops de histerese indicam que os três tipos de painéis tinham limites de fadiga logo abaixo de 20% de suas resistências à flexão. O limite de fadiga para o MDF provavelmente será um pouco menor do que para os outros dois, isso graças a sua composição.

Bao e Eckelman (1995) estudou a fadiga em móveis de painéis compósitos de madeira. Corpos de prova de MDF, OSB e aglomerado foram testados para determinar a resistência com porcentagens específicas do MOR do material. A relação entre o nível de estresse e a vida em fadiga foi determinada como regular e, como previsto, a vida em fadiga diminuiu à medida que os níveis de estresse aumentaram. A vida em fadiga chegou a mais de 1.000.000 de ciclos com o nível de tensão de 30% do MOR e diminuiu para 405 ciclos para MDF e 10.887 ciclos para OSB a um nível de tensão de 70%.

No ano seguinte, os autores Bao e Eckelman publicaram junto com um terceiro autor, Gibson um estudo intitulado “resistência à fadiga e tensões de projeto permitidas para alguns compostos de madeira usados em móveis”. Bao, Eckelman e Gibson (1996) testaram corpos de prova de painéis aglomerados, MDF, OSB e compensados em flexão estática e fadiga. Cinco níveis de tensão aplicados expressos como porcentagens da resistência máxima dos materiais (MOR) foram usados nos testes de fadiga. Os resultados indicaram que todos os materiais testados foram capazes de sobreviver a uma vida de fadiga de mais de 1.000.000 de ciclos em níveis de tensão iguais a 30% da média MOR. Falhas por fadiga ocorreram em alguns materiais conforme os níveis de tensão aumentaram para 40% do MOR médio. Em geral, a vida útil da fadiga diminuiu à medida que o nível de estresse aumentou e vice-versa. Os valores de tensão de projeto que variam de 30% a 40% do MOR médio podem fornecer valores de base para determinar as tensões de projeto.

Sugimoto, Sasaki, Yamasaki e Oya publicaram nove trabalhos em 2003, 2006, 2007, 2008 e 2014 que abordam a fadiga em painéis e os danos acumulados, a previsão de vida de fadiga, o desempenho de dissipação de energia, o processo de fadiga e critério de falha com base na energia de deformação.

Sasaki et al. (2003) estudaram o comportamento à fadiga de painéis de madeira para uso estrutural sob cisalhamento por espessura. Foram realizados ensaios de fadiga até 106 ciclos em painéis compensados e OSB. Os resultados apontaram que existe uma relação linear entre o nível de tensão e o logaritmo do número de ciclos até a falha. A rigidez ao cisalhamento manteve seu valor inicial no início do carregamento cíclico e reduziu gradualmente seu valor para a vida de fadiga. Um aumento acentuado na tensão de cisalhamento máxima foi observado imediatamente antes da vida de fadiga. Este comportamento de fadiga mostrou diferenças entre os tipos de painéis devido a suas constituições elementares. A previsão da vida de fadiga foi feita com base na fluência cíclica da deformação máxima de cisalhamento.

Sugimoto e Sasaki (2006a) publicaram sobre o efeito da forma de onda de carga sobre a fadiga sob a carga de cisalhamento do painel. Foram utilizadas forma de onda quadrada ou triangular a níveis de estresse de 50-90% nos corpos de prova de compensado estrutural. A deterioração da rigidez ao cisalhamento foi mais rápida em forma de onda quadrada do que em forma de onda triangular. As análises de perda de energia indicam que a carga de corte cíclica do painel em uma forma de onda quadrada causa mais danos ao compensado estrutural durante um ciclo de carregamento do que em uma forma de onda triangular e que o dano de fadiga acumulado até a falha.

Sugimoto e Sasaki (2006b) estudaram o comportamento à fadiga sob carga de cisalhamento com duas frequências de carregamento diferentes foi examinado. Foram utilizados carga de cisalhamento com forma de onda triangular e frequência de carregamento de 0,5 e 5 Hz nos corpos de prova de compensado estrutural. Os resultados apontaram que a vida em fadiga é altamente dependente da frequência de carregamento em mais de 0,5 nível de tensão. Os autores concluíram que a deterioração da propriedade mecânica e o acúmulo de danos no corpo de prova de madeira compensada são mais lentos em frequência de carregamento superior a mais de 0,5 nível de tensão. Com base nos resultados, um novo modelo de falha por fadiga para espécime de madeira compensada foi qualitativamente desenvolvido combinando o modelo de elo mais fraco de Weibull e o modelo de feixe de fibra de Daniels.

Sugimoto, Yamasaki e Sasaki (2006) publicaram sobre o comportamento de fadiga de painéis sob carga de cisalhamento cíclico. Foram utilizados corpos de prova de compensado e OSB com dimensões de 350 mm de comprimento e 240 mm de largura. A carga de cisalhamento pulsante foi aplicada ao longo do comprimento dos corpos de prova a níveis de tensão correspondentes a 60% e 100% da resistência estática. Pelos dos resultados, os autores observaram que a perda de energia por ciclo em cada nível de tensão mostrou um valor quase constante durante a maior parte da vida de fadiga, isto é, de 5-10 ciclos de carregamento a pouco antes da falha de fadiga. A perda média de energia por ciclo diminuiu e pareceu aproximar-se gradualmente de um valor limiar à medida que a vida de fadiga aumentou. Os autores apresentaram a proposta de uma equação modelo para a relação entre a perda média de energia por ciclo e a vida de fadiga e adaptada aos dados obtidos. Os valores limiares de perda de energia média por ciclo para PW e OSB foram encontrados em 0,446 e 0,350 [kJ / m³ / ciclo], respectivamente. O limite de fadiga foi estimado em aproximadamente 40% da força estática para o compensado e o OSB, respectivamente, com base na relação não linear entre a perda média de energia por ciclo e o nível de tensão.

Sugimoto e Sasaki (2007) discorreram sobre a vida à fadiga de compensado estrutural sob carga de cisalhamento de painel. Duas condições experimentais foram determinadas para a fadiga de dois estágios do corpo de prova de madeira compensada: uma utilizou tensão aplicada variável e a outra utilizou tensão variável, forma de onda de carga e frequência de carga, porque a vida em fadiga do compósito de madeira sob carga constante dependia da forma de onda de carga e da frequência de carga como bem como o nível de estresse. Foi demonstrado pela primeira vez no estudo que a vida em fadiga do corpo de prova de madeira compensada alcançada no teste de fadiga em dois estágios não obedeceu à regra de

Palmgren-Miner. Por isso, os autores apresentaram um novo modelo de dano por fadiga cumulativo pela modificação da regra de Palmgren-Miner com base na suposição de que o dano por fadiga se acumula com o ciclo de carregamento em uma escala logarítmica. Este novo modelo proposto foi comparado com os dados obtidos experimentalmente e se mostrou de acordo com a vida à fadiga alcançada.

Sugimoto, Sasaki e Yamasaki (2007a) publicaram sobre o comportamento à fadiga sob cisalhamento com base na energia de deformação. Foram ensaiados corpos de prova de 9 mm de espessura de painéis de madeira compensada comercial para obter equações empíricas comuns para o processo de fadiga e o critério de falha sob várias condições de carregamento. Foram utilizadas forma de onda quadrada a uma frequência de carregamento de 0,5 Hz, uma forma de onda triangular a 0,5 Hz e uma forma de onda triangular a 5,0 Hz. A tensão de pico aplicada foi determinada como sendo 0,5, 0,7 e 0,9 de força estática, ou seja, níveis de tensão de 0,5, 0,7 e 0,9. As condições de carga aparentemente afetaram a relação entre o nível de estresse e a vida à fadiga. Por outro lado, a relação entre a energia média de deformação por ciclo e a vida em fadiga foi considerada independente das condições de carregamento. A energia de deformação média por ciclo obtida como limite de fadiga foi de 5,85 kJ / m³ por ciclo.

Sugimoto, Sasaki e Yamasaki (2007b) com base no estudo anterior os autores usaram os dados e tentaram prever com facilidade e precisão a vida de fadiga de um corpo de prova sob várias condições de carregamento pelo primeiro ciclo de carregamento teste. A relação entre o nível de tensão e a vida à fadiga prevista também foi semelhante àquela entre o nível de tensão e a vida à fadiga determinada experimentalmente. Os resultados demonstraram que o método de previsão da vida à fadiga proposto pode ser amplamente aplicável à previsão da vida à fadiga de madeira maciça e compósitos de madeira.

Sugimoto e Sasaki (2008) discutiram sobre o desempenho de dissipação de energia de corpos de prova de compensado sob cisalhamento cíclico. Foram utilizadas condições de carregamento: uma forma de onda quadrada a uma frequência de carregamento de 0,5 Hz, uma forma de onda triangular a 0,5 Hz e uma forma de onda triangular a 5,0 Hz. O nível de tensão foi determinado como 0,5, 0,7 e 0,9 da resistência estática ao cisalhamento. Os resultados indicaram uma taxa de dissipação de energia de corpo de prova de madeira compensada constante durante a maior parte do processo de fadiga para um determinado nível de tensão e condição de carregamento. O desempenho de dissipação de energia foi significativamente e tornou-se maior de acordo com a intensidade de dano da carga cíclica,

mesmo que a mesma energia de deformação fosse aplicada.

Sasaki, Oya e Yamasaki (2014) realizaram análises energéticas da fadiga por flexão da madeira sob múltiplas condições de carregamento. Os autores estabeleceram o limite de fadiga e a vida em fadiga. A energia de deformação obtida na tensão-deformação até que a madeira atinja sua vida em fadiga é um valor específico por espécies de madeira e resistência estática, independentemente das condições de carregamento. Este valor é cerca de 50% maior que a energia de deformação em testes estáticos. A relação entre a perda média de energia e o nível de estresse até o ponto de falha por fadiga é bi linear, e a perda de energia média está intimamente relacionada com a vida em fadiga. Além disso, o nível de estresse é estimado em cerca de 20-30% da resistência estática.

Macedo e Calil Junior (2007) estudaram a fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada. Foram estudadas a resistência e rigidez das emendas dentadas à fadiga na tração. Foram utilizadas duas espécies de madeira, *Pinus caribea var. hondurensis* e *Eucalyptus grandis*, e dois tipos de adesivos para as ligações, fenol-resorcinol e poliuretano à base de resina de mamona. Foram utilizados três níveis de frequência de ensaios cíclicos 1 Hz, 5 Hz e 9 Hz e três níveis de tensão 90%, 75% e 60% da resistência. A relação entre a tração mínima e máxima adotada foi $R = 0,1$. Os resultados experimentais possibilitaram estabelecer coeficientes de redução de resistência à fadiga das emendas dentadas em relação a madeira maciça, contribuindo para a caracterização destas ligações. Foi concluído pelos autores que, com os parâmetros adotados, não há variação significativa da rigidez em função do número de ciclos.

Miyazaki e Nakano (2008) publicaram sobre o comportamento à fratura por fadiga em madeira laminada colada. Foram estudadas MLC (Madeira Laminada Colada) que utilizam resina de poli-merisocianato à base de água e resina de resorcinol-formaldeído sob fadiga por impacto. O número de golpes cíclicos até a falha para MLC (Madeira Laminada Colada) foi menor do que para madeira sólida. Este número de ciclos apresentou uma diminuição significativa com o aumento da temperatura para o MLC, enquanto para a madeira sólida apresentou apenas uma ligeira diminuição. A vida em fadiga do MLC utilizando resina de poli-merisocianato à base de água foi menor do que a resina de resorcinol-formaldeído. Para madeira laminada ligada com a resina à base de água, a razão entre a altura de rebote a da primeira elevação, que foi avaliada a partir de uma onda de tensão de impacto, permaneceu constante e então diminuiu gradualmente antes da falha. Isso indica que a energia consumida pelo aquecimento aumentou antes da falha porque a resina curada tem viscosidade. Para a resina

resorcinol-formaldeído, esta razão permaneceu constante imediatamente antes da falha porque a resina curada é rígida. Em uma temperatura de teste mais baixa, a superfície de fratura compreendia quase inteiramente a madeira. Com o aumento da temperatura, o MLC fraturou predominantemente na camada adesiva. Isso pode ser atribuído a uma diminuição na rigidez das resinas. Logo, os autores concluíram que o comportamento à fadiga por impacto do MLC está relacionado às propriedades mecânicas dos adesivos.

Del Menezzi et al. (2011) realizaram uma pesquisa sobre a fadiga em painéis comerciais de MDF e MDP. Foram estudados os efeitos da fadiga utilizando três ciclos de carregamento, 20.000, 40.000 e 80.000 ciclos, nas propriedades de flexão estática dos painéis comerciais. Foi utilizada a frequência de 0,45 Hz e a carga aplicada foi correspondente a 25% do módulo de ruptura de cada painel. Os resultados experimentais apontaram que este número de ciclos, nas configurações adotadas, não causou efeito significativo nas propriedades de flexão para os painéis. Entretanto, foi apontada deformação residual nos painéis MDF.

Nagase, Kobayashi e Yasumura (2018) estudaram a fadiga aplicada em juntas de painéis compensados. O enfoque do estudo nas juntas destes painéis se dá ao fato de o desempenho de paredes de cisalhamento de madeira compensada ser determinado pelas juntas. Em juntas com fixadores do tipo cavilha, como pregos e parafusos, o fixador é fraturado sob carga cíclica reversa (por exemplo, força sísmica) com baixo número de ciclos, reduzindo a ductilidade da junta. Os autores buscaram definir o deslocamento final das juntas para com este dado poder avaliar a vida em fadiga dos painéis compensados de madeira. Foram utilizados pregos e parafusos de madeira do tipo CN50 com dimensões de $4,1 \times 38$ e $4,5 \times 50$ mm. Os ensaios de cisalhamento simples mostraram, conforme o esperado, que quanto menores os deslocamentos por ciclo, menores são os deslocamentos finais e as ductilidades das juntas. Além disso, os autores apontaram que a relação carga-deslocamento até a falha do fixador pode ser estimada aproximadamente combinando o modelo de escoamento e a vida útil da falha.

Li e Lam (2016) estudaram a fadiga de baixo ciclo e danos acumulados na resistência ao cisalhamento do CLT (Cross Laminated Timber ou Madeira Lamelada Colada Cruzada). Foram utilizados testes de carga em rampa de curto prazo e testes de carga de fadiga trapezoidal de baixo ciclo para estudar o comportamento da duração da carga no CLT (Cross Laminated Timber ou Madeira Lamelada Colada Cruzada). Os testes de rampa foram realizados para estabelecer as propriedades de resistência ao cisalhamento. Os testes de fadiga trapezoidal de baixo ciclo foram realizados para avaliar o processo de acumulação de danos para os corpos de prova combinados sob níveis controlados de tensão de cisalhamento. Um modelo de

acumulação de dano baseado em tensão foi ainda usado para investigar o efeito de cisalhamento com parâmetros de modelo tratados como variáveis aleatórias calibradas contra um conjunto de dados de teste. O modelo calibrado previu bem em comparação com o outro conjunto de dados de teste. Este modelo verificado fornece uma ferramenta robusta para quantificar o efeito da duração da carga na resistência ao cisalhamento de rolamento nas camadas do núcleo do CLT (Cross Laminated Timber ou Madeira Lamelada Colada Cruzada).

Li et al. (2016) apresentaram um estudo da fadiga na flexão em painéis estruturais de compósitos de fibras de madeira dos tipos: colmeia com encaixes (entre faces externas dos painéis e os componentes do interior do painel) e sem encaixes. Os resultados experimentais mostraram que os dois tipos de painéis tiveram propriedades de flexão semelhantes nos testes estáticos. No entanto, os painéis com encaixes tiveram resultados melhores na fadiga. Os modos de falha foram diferentes para as duas técnicas de fabricação. Os painéis sem encaixe tiveram seus núcleos descolados demonstrando problema na interface. Já os painéis com encaixes tiveram rachaduras que se propagaram dentro da nervura do núcleo. Isso demonstrou que os encaixes promoveram melhora na conexão entre as faces e o núcleo. Os encaixes diminuíram a taxa de crescimento de deflexão que atrasou a falha do painel. A relação resistência à fadiga e a vida útil ou degradação foi melhor para os painéis colmeia com encaixes do que para os painéis sem encaixes.

Ferraz et al. (2020) estudaram o efeito da fadiga no módulo de elasticidade na flexão de painéis comerciais de madeira compensada de eucalipto. Foram utilizados 36 corpos de prova com frequência de 1,0 Hz e sete de ciclos de fadiga (0 - referência, 3600, 7200, 22500, 45000, 67500, 90000) para os valores do módulo de elasticidade na flexão (E). Os resultados apontaram reduções significativas do módulo de elasticidade a partir de 22500 ciclos. Os ciclos 0, 3600 e 7200 forneceram resultados estatisticamente equivalentes. O modelo que melhor representou os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais foi o de regressão logarítmico com $R^2 = 64,28\%$.

Christoforo et al. (2020) publicaram sobre a fadiga na flexão da madeira de *Pinus caribea*. Foram utilizados 27 corpos de prova para cinco números de ciclos de fadiga (0 - referência, 450, 4500, 45000 e 90000) para frequências de oscilação de 0,5 e 1,0 Hz. Foram utilizados ensaios não destrutivos para obter as propriedades para todos os ciclos de fadiga e, também, para o módulo de elasticidade e tensão de referência, todos os corpos de prova passaram por cada um dos ensaios, totalizando em 350 horas de ensaios em cada corpo de prova. A frequência e o número de ciclos influenciaram significativamente o módulo de

elasticidade e tensão a partir de 45.000 ciclos. O aumento progressivo no número de ciclos de fadiga causou reduções mais marcantes nas propriedades mecânicas quando comparado ao aumento na frequência de oscilação.

3.3 Considerações finais sobre a revisão bibliográfica

A base de dados incompleta sobre as características da fadiga na madeira deve ser enfatizada. Mais informações sobre as propriedades de fadiga da madeira e de produtos de madeira são úteis para uma melhor compreensão do desempenho de peças e elementos estruturais a longo prazo, assim como, para o desenvolvimento de novos materiais de madeira.

Conforme já citado, os trabalhos publicados sobre o tema são de grande relevância e devem ser consultados e utilizados sempre que necessário. Porém, eles não sanam todos os assuntos a respeito do tema que apesar de estar sendo estudado a mais de 40 anos ainda não há conhecimento suficiente a respeito e isso reflete na abordagem ainda limitada da fadiga em documentos normativos que tratam sobre a madeira e os produtos derivados de madeiras.

Também já foi apresentado neste trabalho que, as normas brasileiras sobre madeira maciça e produtos derivados de madeira não consideram o efeito da fadiga nas propriedades do material, o que motiva o desenvolvimento de pesquisas nessa temática.

Assim, novas pesquisas sobre o tema se fazem essenciais para suprir a lacuna sobre a atuação desse fenômeno nas diversas madeiras utilizadas no Brasil.

4. METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) no campus de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP).

Os ensaios constituíram em determinar a força máxima, a tensão máxima e o módulo de elasticidade de corpos de prova após serem submetidos a ciclos de carregamentos. Foram elaborados modelos de regressão para estimativa do E. Também foi realizada a análise visual e microscópica dos corpos.

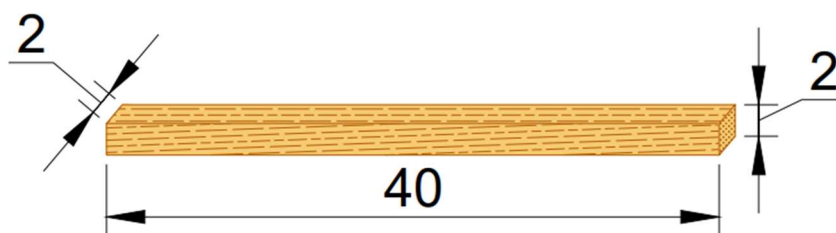
Para a confecção dos corpos de prova foram utilizadas as madeiras Pinus (*Pinus sp.*, *Pinaceae*), Caxeta (*Simarouba sp.*, *Simaroubaceae*), Piquiá (*Caryocar villosum (Aubl.) Pers.*, *Caryocaraceae*) e Roxinho (*Peltogyne sp.*, *Leguminosae*).

As espécies selecionadas para essa pesquisa possuem classe de resistência C20, C30, C40 e C60 de acordo com as normas ABNT NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997). Vale ressaltar que apesar da publicação deste trabalho ocorrer em 2023 foi utilizado a norma NBR 7190 do ano de 1997 pois no início da pesquisa, nos anos de 2019, 2020 e 2021 quando os ensaios foram realizados, as normas NBR 7190-1, NBR 7190-2, NBR 7190-3, NBR 7190-4, NBR 7190-5, NBR 7190-6, NBR 7190-6 ainda não estavam publicadas e vieram a substituir a norma de 1997 apenas a partir do ano de 2022 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022a, 2022b, 2022c, 2022d).

Entre as quatro madeiras escolhidas estão duas espécies comerciais, Pinus e Roxinho, e duas alternativas, Piquiá e Caxeta (ARAÚJO et al., 2021)

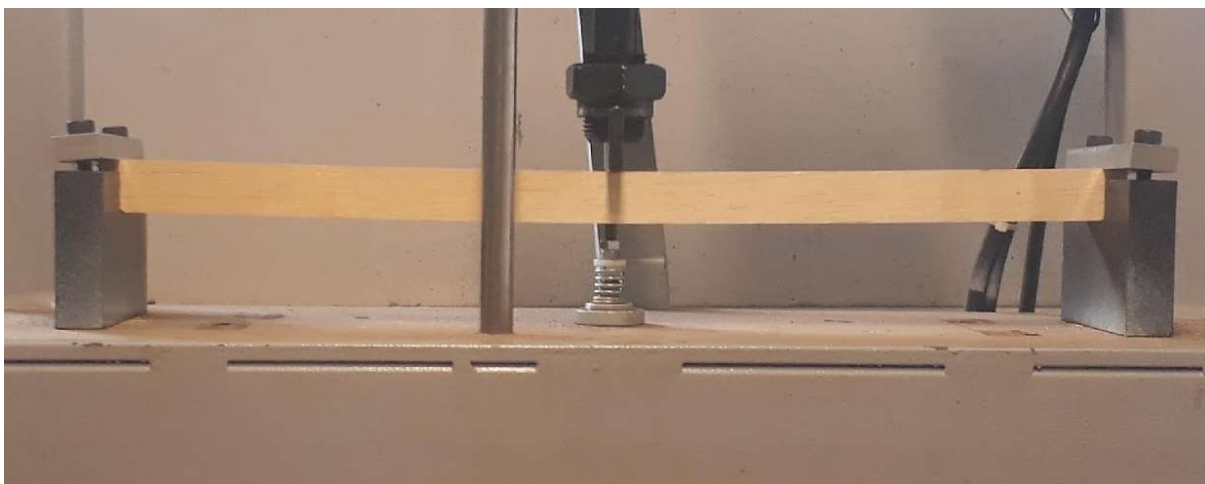
Os corpos de prova foram confeccionados com 2 cm de largura, 2 cm de altura e 30 cm de comprimento mostrados na figura abaixo.

Figura 5 – Corpo de prova



Fonte: Autor (2023).

Figura 6 – Corpo de prova posicionado na máquina de simulação de fadiga que aplica os esforços no centro do corpo de prova bi apoiado nas extremidades



Fonte: Autor (2022).

Depois de cortados os corpos de prova foram nomeados e medidos com a ajuda de um paquímetro digital. As medidas foram anotadas e planilhadas para serem usadas nos ensaios bem como na análise dos resultados.

Os corpos de prova foram ensaiados na frequência de 1 Hz e flecha de $L/200$ onde 1 Hz significa 1 ciclo (oscilação) por segundo e $L/200$ significa que a flecha adotada para o ensaio é igual ao comprimento do corpo de prova dividido pelo valor 200.

As condições de temperatura, pressão e umidade dos ensaios foram a ambiente, sem intervenção ou auxílio de equipamentos para modificar as mesmas. A temperatura média para a cidade de São Carlos – SP é 20°C e todas as madeiras foram ensaiadas apresentando teor de umidade próximo de 12%, conforme prescrito pela ABNT NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

Os corpos de prova simulam os elementos estruturais instalados em situação de uso que foram expostos ao longo do tempo a fadiga. Para simular os esforços causados por veículos, pessoas ou demais elementos que gerem carga sobre a estrutura, a máquina mostrada na figura abaixo, aplica a força necessária para deformar o corpo de prova até o valor da flecha estabelecido.

Figura 7 – Máquina de simulação de fadiga



Fonte: Autor (2022).

Os valores sugeridos pela norma como limites de deformações para construções correntes, associados ao valor da flecha máxima provocada pelas ações permanentes e ações acidentais é de $L/200$ de flecha máxima para o tipo de vão livre “vão normal”, sendo o L igual ao vão livre do elemento estrutural e, portanto, do corpo de prova. A flecha de $L/200$ está estabelecida para vigas simplesmente apoiadas pela norma ABNT NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) na verificação do estado limite de utilização, conforme a ligação. Vale ressaltar que o $L/200$ além de ser o valor indicado pela norma em construções em condições normais é o valor mais usual em situações de projeto, portanto é pertinente sua adoção para determinação da flecha aplicada.

Figura 8 – Apoio do corpo de prova na máquina de fadiga



Fonte: Autor (2022).

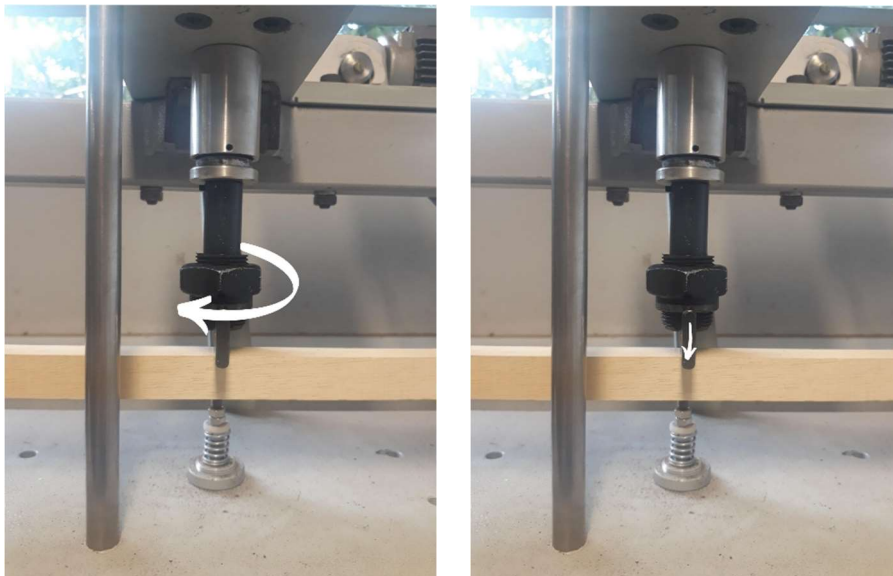
A força aplicada pela máquina para gerar a flecha pode ser regulada por meio do sistema de parafuso e porca. Conforme a porca é girada no sentido horário, ela desce ao longo do parafuso e gera maior deformação no corpo de prova quando a máquina aplica a força, assim o operador consegue controlar a deformação, ou seja, a flecha aplicada no corpo de prova. Veja o esquema na figura a seguir.

Figura 9 - Esquema com parafuso e porca para ajuste do deslocamento aplicado no corpo de prova



Fonte: Autor (2022).

Figura 10 – a) porca rotacionada em sentido horário pelo operador da máquina b) conforme a porca é rotacionada em sentido horário a peça que desloca o corpo de prova é empurrada para baixo, empurrando também o corpo de prova, resultando em maior flecha/deslocamento



Fonte: Autor (2023).

Para auxiliar no ajuste do sistema abaixo do corpo de prova é posicionado um relógio comparador. Quando o corpo de prova está posicionado na máquina sem nenhum aperto da porca o relógio comparador indica o valor de deformação zerado assim, o operador vai ajustando o aperto até obter a flecha desejada indicada no relógio comparador. O relógio comparador está exibido na figura 11.

Figura 11 – Relógio comparador instalado na parte inferior do equipamento



Fonte: Autor (2022).

Quando o corpo de prova já está posicionado e a flecha já está ajustada o ensaio inicia e o corpo de prova sofre um esforço por segundo. A cada 1 hora o corpo de prova sofre 3.600 esforços.

O número de ciclos estipulado para os ensaios preliminares foi 300.000 ciclos, sendo 0 ciclos (ensaio P1, para verificação do módulo de elasticidade da madeira sem ação de esforços de fadiga), 50.000 ciclos (ensaio P2), 100.000 ciclos (ensaio P3), 150.000 ciclos (ensaio P4), 200.000 ciclos (ensaio P5), 250.000 ciclos (ensaio P6) e 300.000 ciclos (ensaio P7). Os ensaios preliminares utilizaram a madeira Caxeta por ser da menor classe de resistência para madeiras nativas indicada pela ABNT NBR 7190, classe C20, e ter baixa densidade. A literatura existente indicava ser um número suficiente para começar a observação do decréscimo na propriedade de tal madeira e o fenômeno de fadiga do material (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

Posteriormente, todos os corpos de prova foram ensaiados até 700.000 ciclos, onde um dos corpos de prova rompe, sendo 0 ciclos (para verificação do módulo de elasticidade

da madeira sem ação de esforços de fadiga), 100.000 ciclos, 200.000 ciclos, 300.000 ciclos, 400.000 ciclos, 500.000 ciclos, 600.000 ciclos e 700.000 ciclos, conforme tabela 1 para Caxeta e tabela 2 para as demais espécies.

Tabela 1 – Ensaio e número de ciclos: Caxeta

Ensaio	Tipo de ensaio	Nº de ciclos
P1	preliminar	0
P2	preliminar	50.000
P3	preliminar	100.000
P4	preliminar	150.000
P5	preliminar	200.000
P6	preliminar	250.000
P7	preliminar	300.000
1	final	400.000
2	final	500.000
3	final	600.000
4	final	700.000

Fonte: Autor (2023).

Tabela 2 – Ensaio e número de ciclos: Pinus, Piquiá e Roxinho

Ensaio	Tipo de ensaio	Nº de ciclos
1	final	0
2	final	100.000
3	final	200.000
4	final	300.000
5	final	400.000
6	final	500.000
7	final	600.000
8	final	700.000

Fonte: Autor (2023).

Quando se trata do fenômeno da fadiga, alguns estudos trabalham com frequência entre 0,01 Hz e 1 Hz e outros com a frequência de 1 Hz a 10 Hz. No caso deste trabalho adotou-se a frequência de 1 Hz por ser intermediária e a carga não ser aplicada no material nem de modo muito acelerado (mais de uma vez por segundo) nem de modo muito lento (inviabilizando a realização dos experimentos laboratoriais por ter um tempo de realização longo). Com a frequência de 1 Hz o material sofre a ação da carga e se deforma uma vez a cada segundo, ou seja, o material sai de sua posição inicial, de repouso, atinge a flecha e volta para a posição de repouso a cada segundo.

Os ensaios preliminares, cada ensaio de 50.000 ciclos tem a duração de 13 horas e 54 minutos. Para os ensaios de 100.000 ciclos de a duração é de 27 horas e 47 minutos.

A cada ensaio o corpo de prova é retirado da máquina de simulação de fadiga e levado até a EMIC para ensaio do módulo de elasticidade. Abaixo é possível verificar na figura a EMIC e o computador ligado a ela que faz a leitura eletrônica dos dados.

Figura 12 – EMIC e computador instalado para a leitura dos dados ensaiados pela máquina



Fonte: Autor (2022).

Na figura a seguir é possível verificar o corpo de prova posicionado abaixo da célula de carga para ensaio do módulo de elasticidade.

Figura 13 – Corpo de prova posicionado para ensaio na EMIC

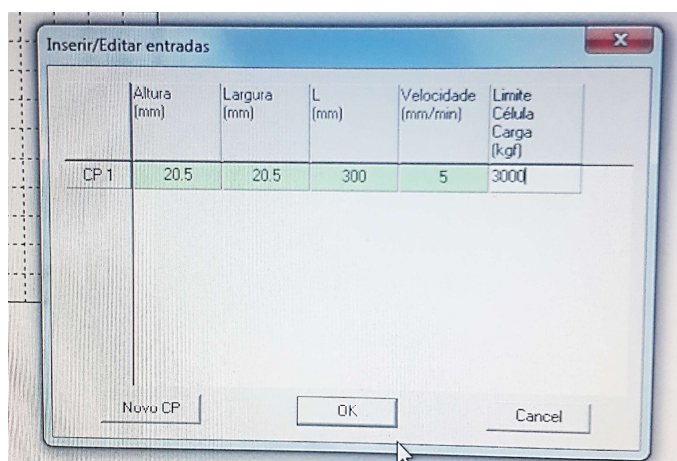


Fonte: Autor (2022).

A EMIC possui 3000 kgf de carga máxima e várias opções de ensaios. O ensaio utilizado para estes corpos de prova foi o de flexão patamares de acordo com a ABNT NBR 7190 e a velocidade do ensaio selecionada foi de 5 mm/min (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

A EMIC está conectada a um computador e para a leitura dos dados coletados pela máquina é utilizado o programa Tesc instalado neste computador. Para a realização dos ensaios é preciso inserir no programa Tesc as dimensões dos corpos de prova que são medidos antes dos ensaios com o auxílio de um paquímetro digital. Além disso, a velocidade definida para o ensaio e o limite da célula de carga são inseridos para a realização do ensaio, conforme mostrado na figura.

Figura 14 - Configurações inseridas no programa Tesc no computador conectado a EMIC



Fonte: Autor (2022).

Após as configurações serem salvas o ensaio é iniciado e o corpo de prova é deformado dentro do limite do regime de elasticidade.

Nas figuras 15 e 16 o corpo de prova está sofrendo a deformação aplicada durante o ensaio.

Figura 15 – Corpo de prova durante o ensaio



Fonte: Autor (2022).

Figura 16 – Corpo de prova durante o ensaio



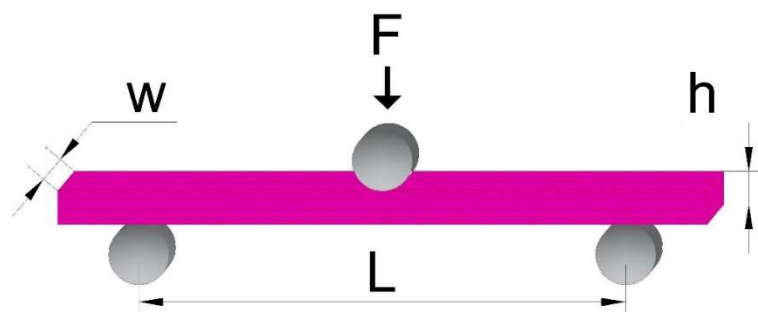
Fonte: Autor (2022).

Após a realização do ensaio de flexão estática de três pontos na EMIC os dados

são salvos e o corpo de prova é posicionado novamente na máquina de fadiga para a aplicação de mais 50./100.000 ciclos. O processo é repetido até o corpo de prova atingir o número máximo de ciclos desejados.

A figura abaixo mostra o corpo de prova, em situação de repouso no ensaio de flexão em três pontos, bi apoiado com a distância L entre os apoios e com a célula de carga posicionada acima do corpo de prova, no centro do vão L .

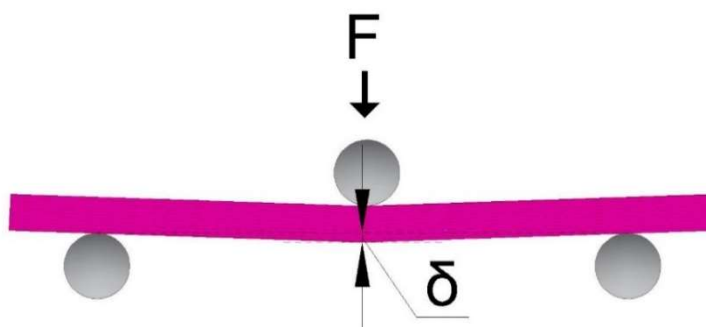
Figura 17 - Corpo de prova em ensaio de flexão de três pontos para determinação do módulo de elasticidade.



Fonte: Autor (2022).

Durante o ensaio de flexão de três pontos, a célula de carga é a parte da Máquina Universal de Ensaio que está em contato direto com o corpo de prova e se move para aplicar a força F de modo que o corpo de prova, de largura w e altura h , seja flexionado até atingir a deflexão desejada δ , observado na figura abaixo.

Figura 18 - Deflection δ generated in the specimen by the application of force F .



Fonte: Autor (2022).

Ao final de cada ensaio, a EMIC fornece a força máxima (N) aplicada ao corpo de prova durante o ensaio, a tensão máxima (MPa) aplicada ao corpo de prova durante o ensaio e calcula o módulo de elasticidade (MPa).

A fórmula utilizada para a o cálculo do módulo de elasticidade (MPa) está expressa na Eq. 1

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

onde E_M é o módulo de elasticidade na flexão (MPa), F é a força (N), L é a distância entre os apoios (mm), w é a largura da amostra (mm), h é a altura da amostra (mm) e δ é a deflexão (milímetros) máxima sofrida pelo CP durante o ensaio.

5. RESULTADOS

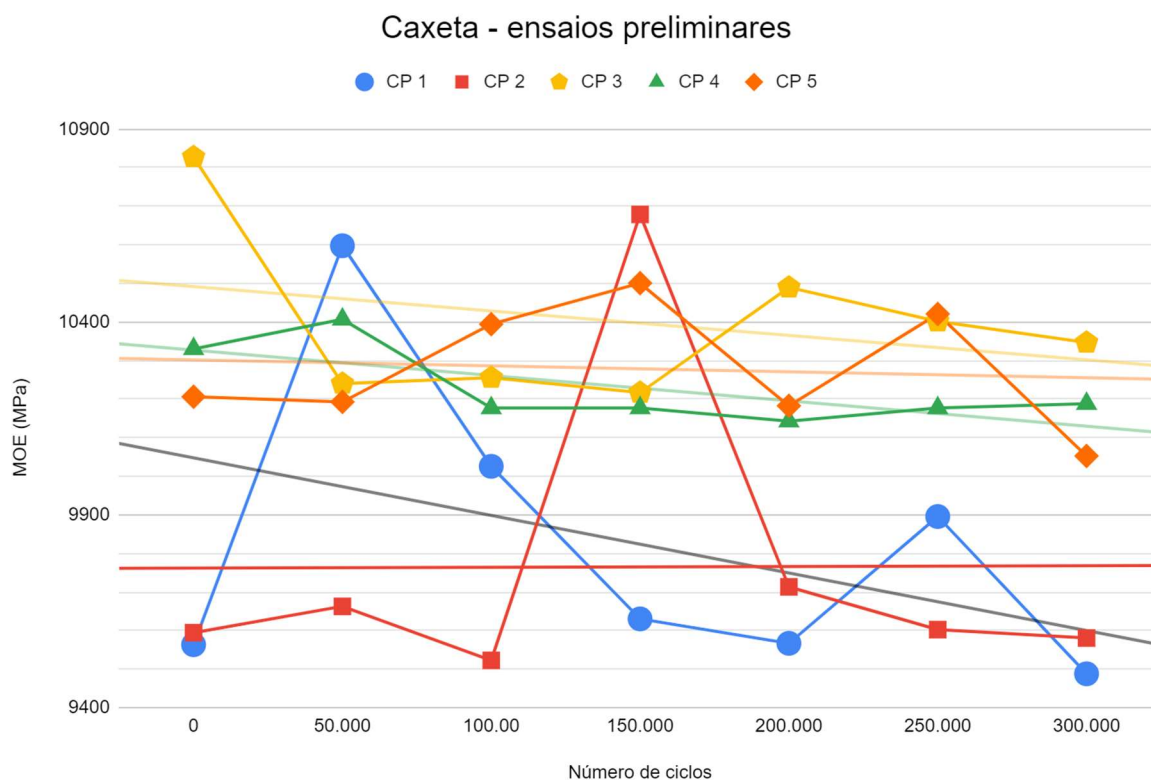
Este tópico apresenta os resultados preliminares e finais obtidos nos ensaios laboratoriais realizados. Os ensaios preliminares foram desenvolvidos e ao concluí-los optamos por parâmetros diferentes para a continuidade da pesquisa e por isso se fez necessário a divisão entre preliminares e finais.

5.1. Resultados Preliminares

Inicialmente os ensaios seriam realizados até 300.000 ciclos de solicitação na rigidez, porém, com a obtenção dos resultados até 300.000 ciclos notou-se a necessidade de expandir o número de ciclos a fim de ilustrar melhor o comportamento dos corpos de prova quando submetidos a fadiga na flexão.

No gráfico 01 abaixo é possível observar os resultados obtidos para os corpos de prova CP 1, CP 2, CP 3, CP 4 e CP 5.

Figura 19 - Gráfico com valores de módulo de elasticidade x número de ciclos até 300.000, para os corpos de prova da madeira Caxeta (*Simarouba spp.*, *Simaroubaceae*)



Fonte: Autor (2022).

Os corpos de prova apresentaram resultados iniciais de módulo de elasticidade (valor de referência, com 0 ciclos aplicados) entre 9.563 MPa e 10.828 MPa sendo, CP 1 = 9.563 MPa, CP 2 = 9.594, CP 3 = 10.828, CP 4 = 10.330 e CP 5 = 10.206 MPa. Ao atingir 50.000 ciclos, três dos corpos de prova (CP 1, CP 2 e CP 4) apresentaram aumento no valor do módulo de elasticidade, sendo CP 1 = 10.598, CP 2 = 9.663 e CP 4 = 10.407 MPa, enquanto os outros dois corpos de prova (CP 3 e CP 5) apresentaram diminuição do módulo de elasticidade com CP 3 = 10.240 e CP 5 = 10.193 MPa. Atingindo 100.000 ciclos observou-se a inversão do comportamento para todos os corpos de prova, os que apresentaram aumento de valor entre 0 e 50.000 passaram a apresentar diminuição de valor entre 50.000 e 100.000 ciclos e vice-versa, com os seguintes valores CP 1 = 10.026, CP 2 = 9.523, CP 3 = 10.256, CP 4 = 10.177 e CP 5 = 10.394 MPa. Com 150.000 ciclos completos o CP 2 demonstrou um salto de valor passando de 9.523 para 10.679 MPa, enquanto os outros CPs permaneceram mais estáveis. Aos 200.000 ciclos o CP 2 continuou se destacando no gráfico passando de 10.679 para 9.713 MPa, este comportamento se difere dos demais e deve indicar alguma reorganização na anatomia deste corpo de prova. Entre 200.000 e 250.000 ciclos os CP 1, CP 3, CP 4 e CP 5 demonstraram um acréscimo nos valores o que também pode indicar alguma reorganização na anatomia deste corpo. Ao atingir os 300.000 ciclos, fixado no início como valor limite de ciclos estudado neste trabalho, todos os corpos de prova demonstraram estabilidade ou decréscimo nos valores. Como a hipótese inicial indicava que aos 300.000 ciclos já seria possível observar decréscimo do valor do módulo de elasticidade para todos os corpos de prova, inclusive com resultados estatisticamente diferentes e este comportamento não foi observado, decidiu-se estender o número de ciclos na expectativa de estudar e entender melhor a resposta da madeira ao número de ciclos e ao fenômeno de fadiga.

5.2. Resultados Finais

Os ensaios foram realizados até 700.000 ciclos de solicitação na rigidez, com a mensuração da força, tensão e módulo de elasticidade a cada 100.000 ciclos. Os ensaios foram realizados até 700.000 ciclos onde um dos corpos de prova rompeu.

O corpo de prova 1 da madeira Roxinho começou a apresentar fissuras por volta dos 300.000 ciclos. A fissura foi observada sem o auxílio de instrumentos óticos na região central inferior do corpo de prova, onde temos o esforço de tração atuando sobre o corpo de prova. Com a aplicação do tempo e de mais tensões na peça, a fissura foi monitorada pois havia a expectativa de que ela poderia aumentar a ponto de gerar ruptura. Ao completar 700.000 ciclos

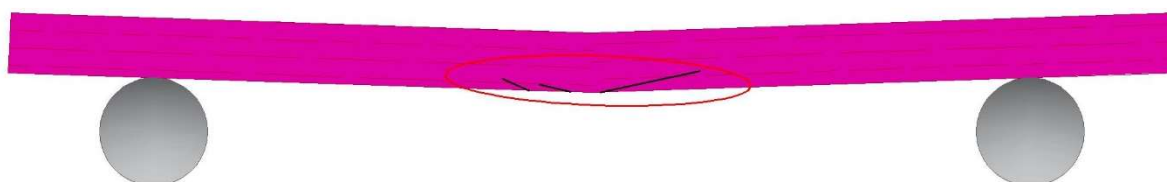
outras fissuras menores foram notadas na mesma região e o corpo de prova rompeu. A figura abaixo mostra o corpo de prova com a fissura mencionada.

Figura 20 – Corpo de prova de Roxinho com fissura



Fonte: Autor (2022).

Figura 21 – Corpo de prova indicando a fissura na região central inferior



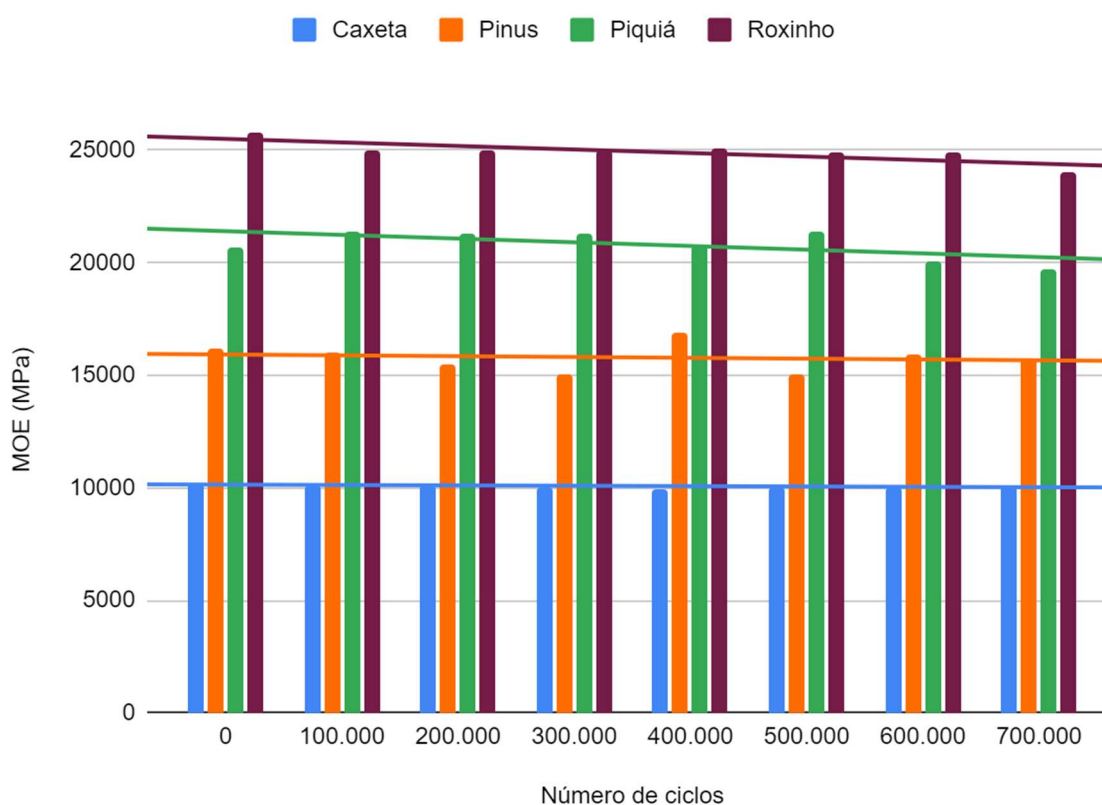
Fonte: Autor (2022).

O aparecimento das fissuras e o rompimento de um corpo de prova foi fator determinante para confirmar as suspeitas quanto ao enfraquecimento da madeira devido à fadiga do material. Por isso, todos os corpos de prova foram ensaiados até os 700.000 ciclos para

observar se todas as madeiras apresentariam mais alguma indicação visual de fragilidade. Os corpos de prova das madeiras Caxeta, Pinus e Piquiá não apresentaram fissuras.

Os resultados de todos os corpos de prova ensaiados estão ilustrados no gráfico abaixo.

Figura 22 – Gráfico com os resultados médios para todos os corpos de prova



Fonte: Autor (2022).

As linhas de tendências demonstradas no gráfico acima ilustram o decaimento do módulo de elasticidade para todas as madeiras ensaiadas, mesmo que decaimento quase que irrisório no caso da Caxeta. Porém, a análise de variância ANOVA realizada não demonstrou diferença significativa entre a média geral de todos os corpos de prova nem entre os corpos de prova agrupados por madeira, o p valor apresentado ficou próximo a 1, conforme verificado na imagem abaixo.

Figura 23 – Análise de variancia ANOVA para todos os corpos de prova agrupados

One-way ANOVA	Residuals	Tukey's pairwise	Kruskal-Wallis	Mann-Whitney pairwise	Dunn's post hoc
Test for equal means					
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	1,28208E07	7	1,83154E06	0,05042	0,9998
Within groups:	1,01712E10	280	3,63259E07		Permutation p (n=99999)
Total:	1,01841E10	287			0,9998
Components of variance (only for random effects):					
Var(group):	-958176	Var(error):	3,63259E07	ICC:	-0,0270918
omega²:	0				
Levene's test for homogeneity of variance, from means				p (same):	0,9385
Levene's test, from medians				p (same):	0,9441
Welch F test in the case of unequal variances: F=0,04876, df=120, p=0,9998					

Fonte: Autor (2022).

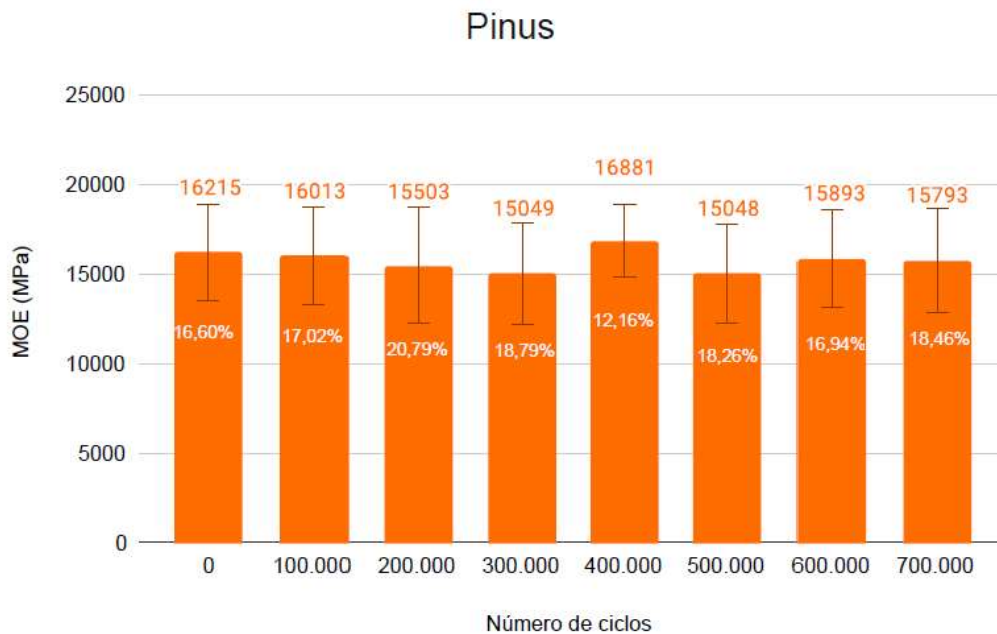
Esse fator impossibilitou o desenvolvimento de um teste de Tukey, por exemplo, e gerar uma equação com nível de significância. Vale ressaltar que com a análise minuciosa dos resultados obtidos, não foi desejável gerar esta equação que leva em consideração os todos os dados reunidos pois ela poderia mascarar resultados de decaimentos maiores do módulo de elasticidade, tendo assim nível menor de segurança.

Tendo em vista as informações apresentadas, para uma melhor interpretação dos dados, os resultados serão analisados e expostos também por espécie separadamente.

5.2.1. Pinus

Os resultados dos corpos de prova de Pinus estão expressos no gráfico abaixo. Nele é possível verificar sobre as barras principais o valor médio do módulo de elasticidade para cada número de ciclos fixado e abaixo das barras de desvio padrão é possível notar a porcentagem do desvio padrão.

Figura 24 - Gráfico com os resultados médios e desvio padrão dos corpos de prova de Pinus

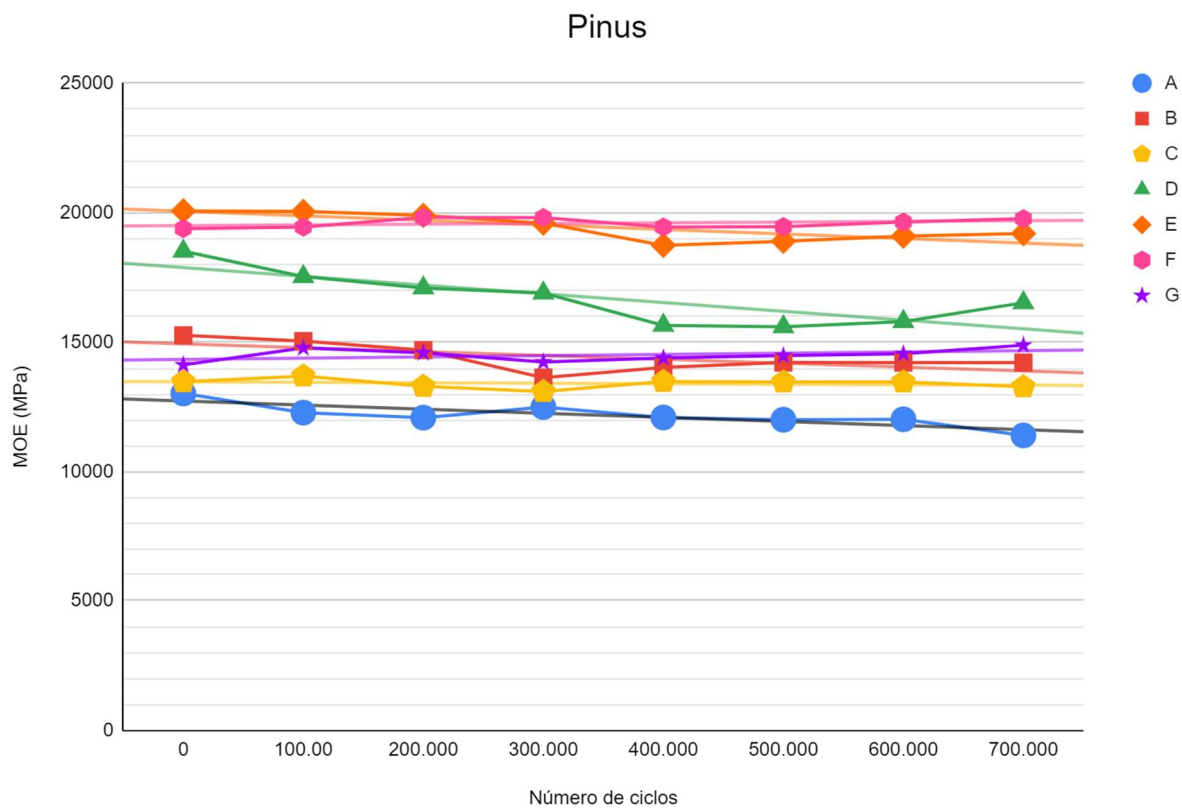


Fonte: Autor (2022).

Com a análise global de todos os corpos de prova desta espécie de madeira não foi possível obter uma equação com nível de significância, a grande porcentagem de desvio padrão observada no gráfico acima é fator determinante para isto.

No gráfico abaixo apresentamos os dados e linha de tendência dos corpos de prova para análise individualmente.

Figura 25 - Gráfico com os resultados individuais dos corpos de prova de Pinus



Fonte: Autor (2022).

O gráfico acima demonstra a oscilação de comportamento entre os corpos de prova, para determinar se há significância foi realizada a análise de variância ANOVA apresentada a seguir.

Figura 26 – Análise de variancia ANOVA para os corpos de prova de Pinus agrupados

One-way ANOVA	Residuals	Tukey's pairwise	Kruskal-Wallis	Mann-Whitney pairwise	Dunn's post hoc
Test for equal means					
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	1,35571E06	7	193673	0,01815	1
Within groups:	6,82807E08	64	1,06689E07		Permutation p (n=99999)
Total:	6,84163E08	71			1
Components of variance (only for random effects):					
Var(group):	-1,16391E06	Var(error):	1,06689E07	ICC:	-0,122453
omega²:	0				
Levene's test for homogeneity of variance, from means				p (same):	0,9745
Levene's test, from medians				p (same):	0,9956
Welch F test in the case of unequal variances: F=0,01931, df=27,41, p=1					

Fonte: Autor (2022).

A análise de variância confirmou a influencia negativamente da associação dos dados. Por este motivo foi realizada a análise individual dos corpos de prova e com isso, gerar equações com níveis de significância para todos os casos. Abaixo está expressa a curva polinomial quártica para o corpo de prova nomeado “G” da espécie Pinus pois ele expressou o maior R² e menor p.

A fórmula para a o cálculo do módulo de elasticidade (MPa) para Pinus está expressa na Eq. 2

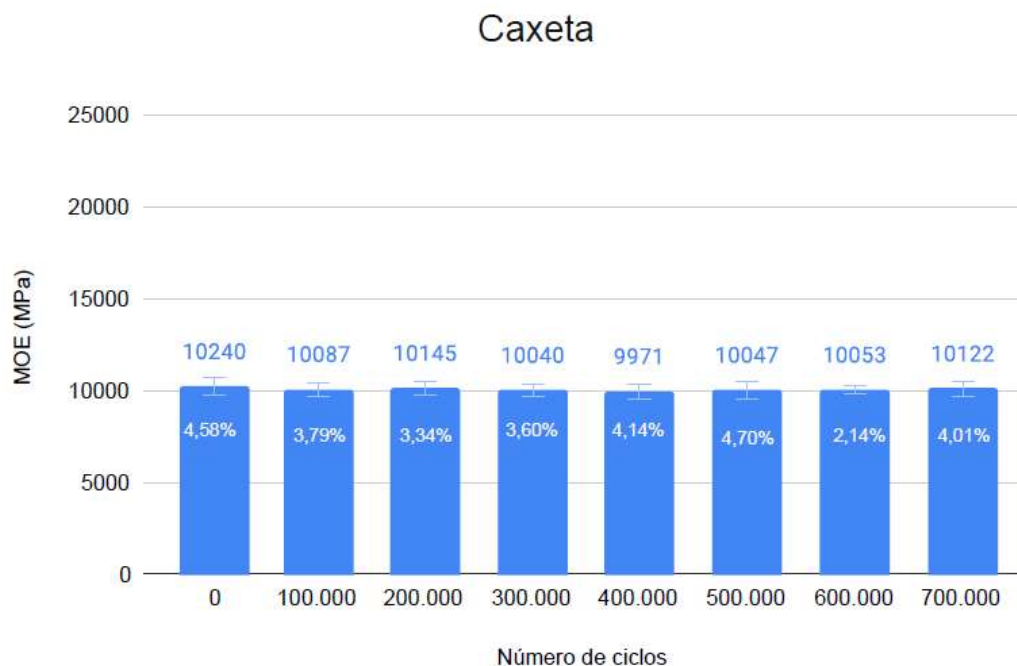
$$E_M = 3,512E - 10x^5 - 6,883E - 07x^4 + 0,0004954x^3 - 0,1538x^2 - 17,93x + 1,412E04 \quad (2)$$

$$[R^2 = 79,77\%, p = 1,0363e-05]$$

5.2.2. Caxeta

Os resultados dos corpos de prova de Caxeta estão expressos no gráfico abaixo. Nele é possível verificar sobre as barras principais o valor médio do módulo de elasticidade para cada número de ciclos fixado e abaixo das barras de desvio padrão é possível notar a porcentagem do desvio padrão.

Figura 27 - Gráfico com os resultados médios e desvio padrão dos corpos de prova de Caxeta



Fonte: Autor (2022).

Com a análise global de todos os corpos de prova desta espécie de madeira não foi possível obter uma equação com nível de significância, apesar da porcentagem de desvio padrão ser baixa. Isso se deve ao fato de o valor do módulo de elasticidade para esta espécie de madeira não ter se mantido, no gráfico acima é possível observar que a média para o módulo de elasticidade a 0 ciclos é de 10240 e a média a 700.000 ciclos é de 10122, valores muito próximo e que não apresentam diferença significativa estatisticamente, conforme é possível observar na análise de variância ANOVA apresentada a seguir.

Figura 28 – Análise de variancia ANOVA para os corpos de prova de Caxeta agrupados

One-way ANOVA	Residuals	Tukey's pairwise	Kruskal-Wallis	Mann-Whitney pairwise	Dunn's post hoc
Test for equal means					
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	558363	7	79766,1	0,4808	0,8462
Within groups:	1,46007E07	88	165917		Permutation p (n=99999)
Total:	1,5159E07	95			0,8458
Components of variance (only for random effects):					
Var(group):	-7179,2	Var(error):	165917	ICC:	-0,0452269
omega²:	0				
Levene's test for homogeneity of variance, from means				p (same):	0,5985
Levene's test, from medians				p (same):	0,6732
Welch F test in the case of unequal variances: F=0,3795, df=37,41, p=0,9085					

Fonte: Autor (2022).

A análise de variância confirmou a influencia negativamente da associação dos dados. Por este motivo foi realizada a análise individual dos corpos de prova e com isso, gerar equações com níveis de significância para todos os casos. Abaixo está expressa a curva quadrática para o corpo de prova nomeado “5” da espécie Caxeta pois ele expressou o maior nível de significância.

A fórmula para a o cálculo do módulo de elasticidade (MPa) para Caxeta está expressa na Eq. 3

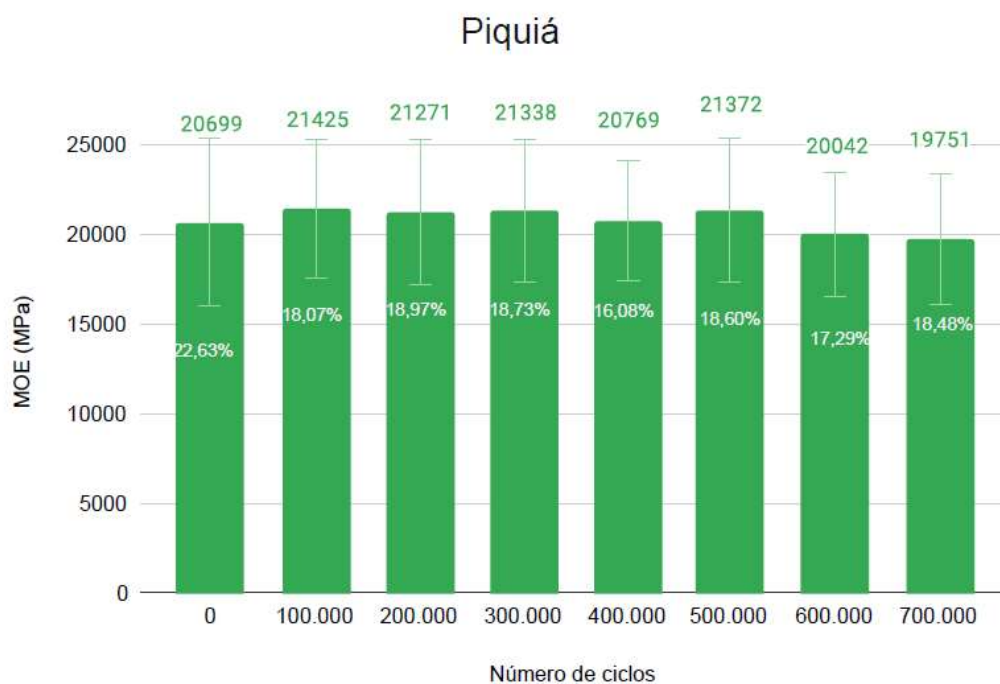
$$E_M = 0,002112x^2 - 2,069x + 1,071E04 \quad (3)$$

$$[R^2 = 26,061\%, p = 0,04199]$$

5.2.3. Piquiá

Os resultados dos corpos de prova de Piquiá estão expressos no gráfico abaixo. Nele é possível verificar sobre as barras principais o valor médio do módulo de elasticidade para cada número de ciclos fixado e abaixo das barras de desvio padrão é possível notar a porcentagem do desvio padrão.

Figura 29 - Gráfico com os resultados médios e desvio padrão dos corpos de prova de Piquiá



Fonte: Autor (2022).

Com a análise global de todos os corpos de prova desta espécie de madeira não foi possível obter uma equação com nível de significância, a grande porcentagem de desvio padrão observada no gráfico acima é fator determinante para isto. Para a madeira a 0 ciclos os corpos de prova chegaram a apresentar mais de 20% de variação do valor do módulo de elasticidade. A análise de variância foi realizada para verificar por meio estatístico as conclusões que estavam sendo admitidas por meio da leitura dos gráficos.

Figura 30 – Análise de variancia ANOVA para os corpos de prova de Piquiá agrupados

One-way ANOVA					
	Residuals	Tukey's pairwise	Kruskal-Wallis	Mann-Whitney pairwise	Dunn's post hoc
Test for equal means					
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	3,55982E07	7	5,08545E06	0,6484	0,7134
Within groups:	3,13744E08	40	7,8436E06		Permutation p (n=99999)
Total:	3,49342E08	47			0,7076
Components of variance (only for random effects):					
Var(group):	-459691	Var(error):	7,8436E06	ICC:	-0,0622558
omega²:	0				
Levene's test for homogeneity of variance, from means				p (same):	0,0002907
Levene's test, from medians				p (same):	0,004412
Welch F test in the case of unequal variances: F=0,6373, df=17,13, p=0,7195					

Fonte: Autor (2022).

A análise de variância confirmou a influencia negativamente da associação dos dados. Por este motivo foi realizada a análise individual dos corpos de prova e com isso, gerar equações com níveis de significância para todos os casos. Abaixo está expressa a curva polinomial quártica para o corpo de prova nomeado “3” da espécie Piquiá pois ele expressou o maior nível de significância.

A fórmula para a o cálculo do módulo de elasticidade (MPa) para Caxeta está expressa na Eq. 4

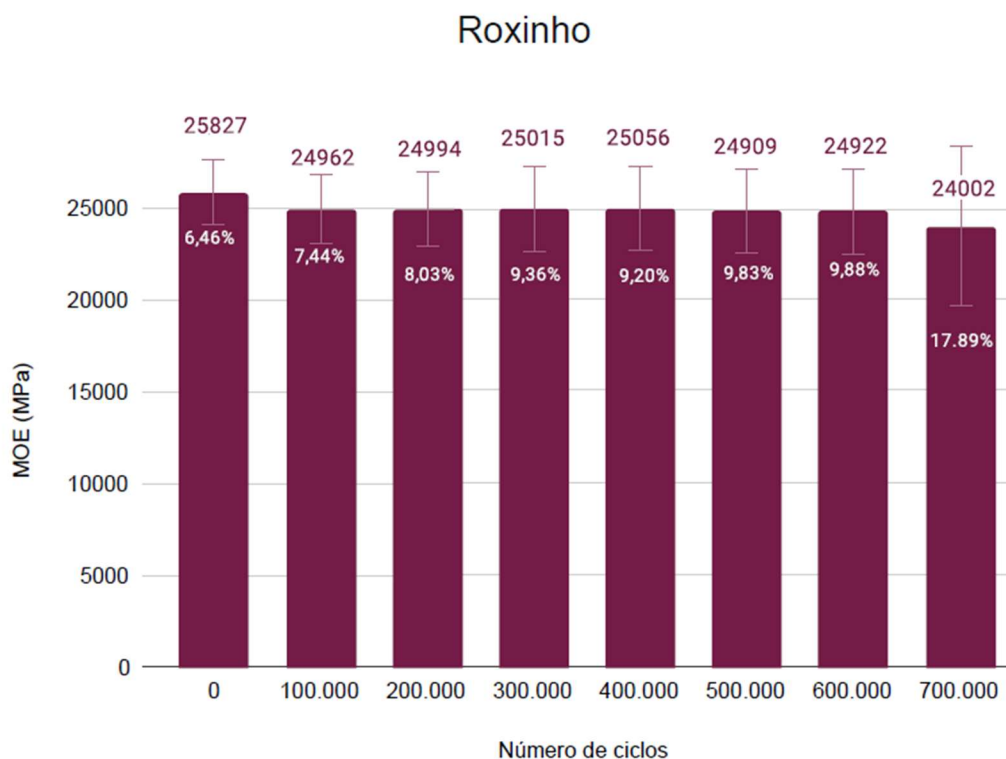
$$E_M = -6,985E - 08x^4 + 4,527E - 05x^3 - 0,008397x^2 - 8,039x + 2,688E04 \quad (4)$$

[R² = 85,83%, p = 7,9385e-08]

5.2.4. Roxinho

Os resultados dos corpos de prova de Roxinho estão expressos no gráfico abaixo. Nele é possível verificar sobre as barras principais o valor médio do módulo de elasticidade para cada número de ciclos fixado e abaixo das barras de desvio padrão é possível notar a porcentagem do desvio padrão.

Figura 31 - Gráfico com os resultados médios e desvio padrão dos corpos de prova de Roxinho



Fonte: Autor (2022).

Para a madeira a 700.000 ciclos o desvio padrão apresentou porcentagem bem maior por conta de estar incluído neste gráfico o corpo de prova que rompeu e estava fragilizado nos últimos ensaios. Com a análise global de todos os corpos de prova desta espécie de madeira não foi possível obter uma equação com nível de significância, a análise de variância abaixo apresenta esta informação.

Figura 30 – Análise de variancia ANOVA para os corpos de prova de Roxinho agrupados

One-way ANOVA	Residuals	Tukey's pairwise	Kruskal-Wallis	Mann-Whitney pairwise	Dunn's post hoc
Test for equal means					
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	3,53864E07	7	5,0552E06	0,7114	0,6624
Within groups:	4,54755E08	64	7,10555E06		Permutation p (n=99999)
Total:	4,90142E08	71			0,6689
Components of variance (only for random effects):					
Var(group):	-227817	Var(error):	7,10555E06	ICC:	-0,0331238
omega²:	0				
Levene's test for homogeneity of variance, from means				p (same):	0,01954
Levene's test, from medians				p (same):	0,9215
Welch F test in the case of unequal variances: F=0,8983, df=27,28, p=0,5218					

Fonte: Autor (2022).

Novamente a análise de variância confirmou a influencia negativamente da associação dos dados e por isso foi realizada a análise individual dos corpos de prova. Abaixo está expressa a curva cúbica para o corpo de prova nomeado “1” da espécie Piquiá pois ele expressou o maior nível de significância.

A fórmula para a o cálculo do módulo de elasticidade (MPa) para Roxinho está expressa na Eq. 5

$$E_M = -6,08E - 05x^3 + 0,06021x^2 - 19,46x + 2,401E04 \quad (5)$$

$$[R^2 = 45,16\%, p = 0,0064459]$$

6. CONCLUSÃO

Conclui-se que a gama de resultados obtidos neste experimento é justificada pela complexa constituição do material e estrutura microscópica muito diferente entre as madeiras selecionadas para este estudo. Um dos objetivos estabelecidos para este trabalho foi investigar se há diferenças no comportamento das madeiras Pinus (*Pinus sp.*, *Pinaceae*), Caxeta (*Simarouba sp.*, *Simaroubaceae*), Piquiá (*Caryocar villosum (Aubl.) Pers.*, *Caryocaraceae*) e Roxinho (*Peltogyne sp.*, *Leguminosae*) quando submetidas ao mesmo ensaio de fadiga, ou seja, se madeiras de diferentes famílias taxonômicas e classes de resistência apresentam comportamentos diferentes entre si, e esta afirmação é válida observando-se os resultados obtidos.

Outros dois objetivos deste trabalho foram determinar a relação entre o fenômeno da fadiga e o possível decréscimo das propriedades mecânicas da madeira, e determinar valores confiáveis para o módulo de elasticidade de madeiras de diferentes classes de resistência quando submetidas ao efeito da fadiga mecânica em aplicações de longo prazo. Para isto, as equações foram apresentadas para cada uma das madeiras junto ao p valor e R².

A análise visual dos corpos de prova durante os ensaios se mostrou de grande importância uma vez que apresentaram fissuras. Com a aplicação do tempo e mais tensões na peça, as fissuras aumentaram a ponto de gerar ruptura do corpo de prova, por isso as fissuras foram fator determinante para confirmar as suspeitas quanto ao enfraquecimento da madeira por fadiga da peça, do material.

Observando que um corpo de prova da espécie Roxinho, sendo esta espécie a de maior rigidez estudada nesta tese, rompeu a 700.000 ciclos e este comportamento de fissuras e/ou rupturas não ocorreu nas demais madeiras. O rompimento deste corpo de prova indicou a redução significativa em sua resistência, este comportamento é justamente o que pretendesse evitar na aplicação da madeira em projetos.

O estudo da fadiga por classe de resistência deve ser considerado pela comissão normalizadora, uma vez que a análise por classe dá importância a anatomia da amostra estudada e a influência das células de parênquima em sua resposta mecânica.

Outro ponto a ser considerado é o posicionamento das camadas de crescimento da madeira no corpo de prova, caso sejam posicionadas perpendicularmente à força aplicada, aumenta a probabilidade de deslizamento entre as camadas, o que ocasiona maior perda de rigidez nos corpos de prova. É importante ressaltar esse fator, pois em aplicações em estruturas

de pontes, por exemplo, nem sempre é possível posicionar as camadas de crescimento da forma mais favorável e, portanto, no cálculo e projeto, é necessário considerar todas as situações de posicionamento e as perdas de rigidez que podem gerar.

Para estudos futuros indicasse a tentativa de análise em uma amostragem grande, com mais do que 10 corpos de prova, para que possa ser verificada a possibilidade de gerar médias grupais significantes e, portanto, equações englobando todos os corpos de prova. Caso a quantidade de amostras maior ainda não permita neste agrupamento dos dados, recomenda-se que as equações continuem sendo indicadas conforme o corpo de prova que apresente maior decaimento e maior significância, trazendo assim a maior segurança e confiabilidade aos cálculos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO LRFD Bridge Design Specifications**. Washington. D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008.

ANDO, K.; YAMASAKI, M.; WATANABE, J.; SASAKI, Y. Torsional fatigue properties of wood. **Mokuzai Gakkaishi**, v. 51, n. 2, p. 98-103, 2005.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. Editora Cengage Learning, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D9-20**: Standard Terminology Relating to Wood and Wood-Based Products. West Conshohocken, PA, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1165-18**: Standard Nomenclature of Commercial Hardwoods and Softwoods. West Conshohocken, PA, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2719-19**: Standard Test Methods for Wood Structural Panels in Shear Through-the-Thickness. West Conshohocken, PA, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3043-17**: Standard Test Methods for Structural Panels in Flexure. West Conshohocken, PA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3500-20**: Standard Test Methods for Wood Structural Panels in Tension. West Conshohocken, PA, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6815-09**: Standard Specification for Evaluation of Duration of Load and Creep Effects of Wood and Wood-Based Products. West Conshohocken, PA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6874-20**: Standard Test Methods for Nondestructive Evaluation of the Stiffness of Wood and Wood-Based Materials Using Transverse Vibration or Stress Wave Propagation. West Conshohocken, PA, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E606/E606M-19e1**, Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing. West Conshohocken, PA, 2019.

ARAUJO, V.; VASCONCELOS, J.; GAVA, M.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. What does Brazil know about the origin and uses of tree species employed in the housing sector? Perspectives on available species, origin and current challenges. **International Forestry Review**, v. 23, n. 3, p. 392-404, 2021. DOI:10.1505/146554821833992794

ARAUJO, V. Timber construction as a multiple valuable sustainable alternative: main characteristics, challenge remarks and affirmative actions. **International Journal of Construction Management**, v. 23, n.8, p. 1334-1343, 2021. DOI:10.1080/15623599.2021.1969742

ARAUJO, V. Timber forest products: a way to intensify global bioeconomy from bio-materials. **Acta Facultatis Xylogologiae**, v. 64, n. 1, p. 99-111, 2022. DOI:10.17423/afx.2022.64.1.09

ARTEIRO, A. J. C. e CASTRO, P. M. S. T. **Mecânica da Fratura e Fadiga: Exemplos de cálculo e aplicação**. FEUP edições, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: “Projeto de estruturas de madeira”. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-1**: “Projeto de estruturas de madeira Parte 1: Critérios de dimensionamento”. Rio de Janeiro, 2022a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-2**: “Projeto de estruturas de madeira Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira”. Rio de Janeiro, 2022b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-3**: “Projeto de estruturas de madeira Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas”. Rio de Janeiro, 2022c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-4**: “Projeto de estruturas de madeira Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização peças estruturais”. Rio de Janeiro, 2022d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-5**: “Projeto de estruturas de madeira Parte 5: Métodos de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos”. Rio de Janeiro, 2022e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-6**: “Projeto de estruturas de madeira Parte 6: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural”. Rio de Janeiro, 2022f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-7**: “Projeto de estruturas de madeira Parte 7: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada cruzada estrutural”. Rio de Janeiro, 2022g.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9487**: “Classificação de madeira serrada de folhosas”. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9533**: “Compensado - Determinação da resistência à flexão estática”. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14810-2**: “Painéis de partículas de média densidade – Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio”. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15316-2**: “Painéis de fibras de média densidade – Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio”. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15799**: “Pisos de madeira com e sem acabamento – Padronização e classificação”. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 1096**: “Madeira compensada - Classificação”. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIATION TECHNIQUE INTERNATIONALE DES BOIS TROPICAUX. **Nomenclature Générale des Bois Tropicaux**. Nogent-sur-Marne, 1982. 216 p.

BAO, Z.; ECKELMAN, C. Fatigue life and design stresses for wood composites

used in furniture. **Forest Products Journal**, v. 45, n. 7/8, p. 59-63, 1995.

BAO, Z.; ECKELMAN, C.; GIBSON, H. Fatigue strength and allowable design stresses for some wood composites used in furniture. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 54, p. 377-382, 1996.

BARROS JÚNIOR, O.; ROCCO LAHR, F. A.; NOGUEIRA, M. C. J. A.. **Principais propriedades físico-mecânicas de seis espécies de madeira indicações para seu uso e aplicações na construção de estruturas**. Montagem (Ribeirão Preto), Ribeirão Preto - SP, v. 1, p. 53-59, 1993.

BERNI, C. A.; BOLZA, E.; CHRISTENSEN, F.J. **South American Timbers - The Characteristics, Properties and Uses of 190 Species**. CSIRO, 1979.

BONFIELD, P. W.; HACKER, C. L.; ANSELL, M. P.; DINWOODIE J. M. Fatigue and creep of chipboard - Part 1. Fatigue at R = 0.01. **Wood Science and Technology**, v. 28, n. 1, p. 423-435, 1994.

BORDONNE, P. A.; OKUYAMA, T.; MARSOEM, S. N. Mechanical responses of wood to repeated loading. III. Effect of waveform on dissipated energy. **Mokuzai Gakkaishi Journal**, v. 33, n. 8, p. 623-629, 1987.

BRANCO, C. A. G. M.; FERNANDES, A. A.; CASTRO, P. M. S. T. **Fadiga de estruturas soldadas** 2ª ed, Fundação Calouste Gulbenkian., Manuais Universitários. Lisboa, p. 902, 1999.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION **BS 5666-3:1991**: Methods of Analysis of Wood Preservatives and Treated Timber. Quantitative Analysis of Preservatives and Treated Timber Containing Copper/Chromium/Arsenic Formulations. London, 1991.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. Utah, 1999.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

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

CARVALHO, A. **Madeiras Portuguesas - Estrutura anatómica**. Propriedades. Utilizações. Volume 1. Lisboa: Instituto Florestal, 1996. ISBN 972-8097-23-9.

CARVALHO, A. **Madeiras Portuguesas - Estrutura anatómica**. Propriedades. Utilizações. Volume 2. Lisboa: Instituto Florestal, 1997. ISBN 972-8097-26-3.

CARVALHO, J. S.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. **Fatigue in Wood Members for Structural Purpose**. 1. ed. Saarbrücken-Deutschland/Germany: Lambert Academic Publishing, v. 1, 2018. 61p.

CARVALHO, J. S.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; AQUINO, V. B. DE M. Effect of fatigue on tropical wood species. Porto Alegre: **Ambiente Construído**, v. 22, n. 2, p. 187-198, 2022. DOI: 10.1590/s1678-86212022000200600

CHRISTOFORO, A. L.; BARBOSA, T. Q.; ALMEIDA, D. H. DE; PANZERA, T. H.; LAHR, F. A. R. Influence of fatigue on bending of pinus caribea wood. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 40, n. 2, p. 238-242, Apr. 2020. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-

69162020000200238&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 30 Mar. 2021. DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n2p238-242/2020.

CHRISTOFORO, A. L.; ZANGIACOMO, A. L.; PANZERA, T. H.; SILVEIRA, M. E.; LAHR, F. A. R. Emprego de ferramentas numéricas na avaliação do módulo de elasticidade em vigas roliças de madeira. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 5, p. 971-980, 2012.

CLORIUS, C. O.; PEDERSON, M. U.; HOFFMEYER, P.; DAMKILDE, L. Compressive fatigue in wood. **Wood Science and Technology**, v. 34, p. 21-37, 2000.

CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A. **A Estrutura Anatômica da Madeira e Princípios para a sua Identificação**. Brasília: LPF, 2002. 28 p.

DAGHER, H.; WEST, B.; CACCESE, V.; WOLFE, R.; RITTER, M. Fatigue Design Criteria of MPC Wood Truss Bridge Applications. **Transportation Research Record**, p.58-64, 1996.

DAGHER, H.; WEST, B. **Fatigue tests of full-scale MPC trusses**. Final report to the USDA Forest Service and the FHWA. Orono, ME: University of Maine, Department of Civil Engineering, 1998. 2p.

DEL MENEZZI, C.H.S.; SANTOS, C.M.T.; FERRAZ, J.M.; MARTINS, S. A.; MELO, R. R.; SIQUEIRA, M. L.; PAZETTO, V. M. F. Efeito do carregamento cíclico sobre as propriedades de flexão de painéis comerciais de MDF e MDP. **Cerne**, v. 17, n. 3, p. 403-409, 2011.

DINWOODIE, J. M.; PAXTON, B. H.; BONFIELD, P. W.; MUNDY, J. S. Fatigue and creep in chipboard Part 2. The influence of slow cyclic fatigue on the creep behaviour of chipboard at a range of stress levels and moisture contents. **Wood Science and Technology**, v. 29, n. 1, p. 64-76, 1995.

DOWLING, N. **Comportamento Mecânico dos Materiais: Análise de Engenharia Aplicada a Deformação, Fratura e Fadiga**. 992p. Editora GEN LTC, 2017.

ESPINOSA, L.; BRANCHERIAU, L.; PRIETO, F.; LASAYGUES, P. Sensitivity of Ultrasonic Wave Velocity Estimation Using the Christoffel Equation for Wood Non-Destructive Characterization. **BioResources**, v. 13, n. 1, p. 918-928, 2017. Disponível em: <<https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/12768>>.

EVANS, J. W.; SENFT, J. F.; GREEN, D. W. Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. **Forest Productions Journal**, v. 50, n. 7-8, p. 75-87, 2000.

FERNÁNDEZ, F. R.; ECHENIQUE, R. **Estructuras de Madera**. Ed. Limusa: Mexico, 1983.

FOREST PRODUCTS LABORATORY, FOREST SERVICE, USDA. **Wood: Its Structure and Properties**. Ed. Wangaard: USA, 1981.

FERRAZ, A. L. N.; BALANCO, G. G.; AQUINO, V. B. M.; ALMEIDA, J. P. B.; CHRISTOFORO, 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, 2020.

FERREIRA, S.; LIMA, J.T.; TRUGILHO, P.F.; SILVA, J.R.M.; LEITE, F.P.; ALTOÉ, T.F. Comparação entre lenho de tração e lenho oposto em Eucalyptus cultivados em diferentes topografias. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM, 10., 2006, São Pedro, São Paulo. **Anais [...]** São Pedro: IBRAMEM, 2006. CD-ROM.

GARDETE, D.C. **Comparação de Ensaio Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente**. 2006. Master's Thesis, University of Coimbra, Coimbra, Portugal, 2006.

GONG, M. and SMITH, I. Effect of waveform and loading sequence on low-cycle compressive fatigue life of spruce. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 15, p. 93-99, 2003.

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.

HAYASHI, T.; SASAKI, H. Time dependence on fatigue strength of timber butt-joints with metal plate connectors. **Journal of Materials Science Japan**, v. 30, n. 334, p.697-702, 1981).

HAYASHI, T.; SASAKI, H. Fatigue of wood butt-joints with metal plate connectors. **Journal of the Society of Materials Science Japan**, v. 30, n. 1, p.23-31, 1984.

HAYASHI, T.; SASAKI, H.; FUYUKI, T. Effect of butt-joint gap on fatigue properties of laminated veneer lumber (LVL) with metal plate connectors. **Journal of Materials Science Japan**, v. 29, n. 10, p.663-669, 1983.

HELLMEISTER, J. C.; ROCCO LAHR, F. A.; DIAS, A. A.. Construção de pontes utilizando postes de eucalipto. In: International Seminar on Agricultural Buildings, 1991, Campinas - SP. **Anais**. Campinas - SP, 1991. v. 1. p. 45.

INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL. **Madeiras da Amazônia: características e utilização** - Floresta Nacional do Tapajós. Brasília: CNPq, 1981. v. 1. 113p.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Madeiras da Amazônia: características e utilização** - Amazônia Oriental. Brasília: CNPq, 1997b. vol. 3. 141p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Fichas de Características das Madeiras Brasileiras**. 2ª ed. São Paulo: IPT, 1989a. 418p. (publicação IPT No 1791).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de Identificação das Principais Madeiras Comerciais Brasileiras**. São Paulo: IPT, 1983. 241p. (publicação IPT No 1226).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Sistema de Informações de Madeiras Brasileiras**. São Paulo: IPT, 1989b. 291p. (Relatório No 27 078).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Consultas online: Informações sobre Madeiras: Marupá**. São Paulo: IPT, 2023a. Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=7

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Consultas online: Informações sobre Madeiras: Pau-roxo**. São Paulo: IPT, 2023b.

Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/49-roxinho.htm

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Consultas online: Informações sobre Madeiras: Piquiá.** São Paulo: IPT, 2023c. Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/72.htm

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Consultas online: Informações sobre Madeiras: Pinus-eliote.** São Paulo: IPT, 2023d. Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/43-caixeta.htm

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA. **Catálogo de Madeiras da Amazônia: características e utilização - Área da Hidrelétrica de Balbina.** Manaus: INPA, 1991. 163p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA. **Essências Madeireiras da Amazônia.** Manaus: INPA, 1997. vol. 3. 114p.

JANKOWSKY, I. P. (Coord.) **Madeiras Brasileiras.** Caxias do Sul: **Spectrum**, 1990. vol. 1. 172p.

KYANKA, G. H. Fatigue properties of wood and wood composites. **International Journal of Fracture**. v. 16, n. 6, p. 609-616, 1980.

KOHARA, M.; OKUYAMA, T. Mechanical responses of wood to repeated loading V Effect of duration time and number of repetitions on the time of failure in bending. **Mokuzai Gakkaishi**, v. 38, n. 8, p. 753-758, 1992.

KOHARA, M.; OKUYAMA, T. Mechanical responses of wood to repeated loading VI – energy-loss partitioning scheme to predict tensile fatigue lifetime. **Mokuzai Gakkaishi**, v. 39, p. 1226–1230, 1993.

KOHARA, M.; OKUYAMA, T. Mechanical responses of wood to repeated loading VII – dependence of energy loss on stress amplitude and effect of wave forms on fatigue lifetime. **Mokuzai Gakkaishi**, v. 40, p. 491–496, 1994.

KOHARA, M.; OKUYAMA, T. Mechanical responses of wood to repeated loading VIII – variation of energy loss behaviors with species. **Mokuzai Gakkaishi**, v. 40, p. 801–809, 1994.

LARSON, P. R.; KRETSCHMANN, D. E.; CLARK, A.; ISEBRANDS, J. G. Formation and properties of juvenil wood in southern pines. **Forest service**; 2001. 46 p.

LAHR, F. A. R., DIAS, A. A. Determinação das propriedades das madeiras para projetos estruturais. **Revista Madeira** v. 1, p. 13-18, 2000.

LEE, A. W. C.; STEPHENS, C. B. Comparative shear strength of seven types of wood composite panels at high and medium relative humidity conditions. **Forest Product Journal**, v. 38, p. 49–52, 1988.

LEONELLO, E.C.; BALLARIN, A.W.; OHTO, J.M.; PALMA, H.A.L.; ESCOBAR, J.F. Classificação estrutural e qualidade da madeira do Clone GT 1 de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 2, p. 229-235, 2012.

LI, J.; HUNT, J. F.; GONG, S.; CAI, Z. Improved fatigue performance for wood-based structural panels using slot and tab construction. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 82, p. 235-242, 2016.

LI, Y., LAM, F. “Low cycle fatigue tests and damage accumulation models on the rolling shear strength of cross-laminated timber”. **Journal of Wood Science**, v. 62, n. 3, p.

251-262, 2016.

MACEDO, A. N. **Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

MACEDO, A. N., CALIL JUNIOR, C. “Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada”. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 9, n. 37, p. 95-126, 2007.

MACEDO, L. B., BALANCO, G. G., SANTOS, N. A., MARINI, L. J., ARROYO, F. N., CHRISTOFORO, A. L., AND LAHR, F. A. R. Structural Pieces Rehabilitation with Self-Tapping Screws. **International Journal of Materials Engineering** v. 7, n. 5, p. 83-87, 2017.

MARSOEM, S. N.; BORDONNÉ, P. A.; OKUYAMA, T. Mechanical responses of wood to repeated loading II – effect of wave form on tensile fatigue. **Mokuzai Gakkaishi**, v. 33, p. 354–360, 1987.

MIYAZAKI, J., NAKANO, T. “Fracture behavior of laminated wood bonded with water-based polymer-isocyanate resin and resorcinol-formaldehyde resin under impact fatigue”. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 109, p. 276-281, 2008.

MYSLICKI, S., VALLÉ, T., WALTHER, F. “Short-time procedure for fatigue assessment of beech wood and adhesively bonded beech wood joints”. **Materials and Structures**, v. 49, n. 6, p. 2161-2170, 2016.

NAGASE, K., KOBAYASHI, K., YASUMURA, M. “Estimation of failure lifetime in plywood-to-timber joints with nails and screws under cyclic loading”. **Journal of Wood Science**, v. 0, n. 0, p. 1-13, 2018.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas - Uma Abordagem Integrada**. Bookman: Massachusetts, 2004.

OKUYAMA, T.; ITOH, A.; MARSOEM, S. N. Mechanical responses of wood to repeated loading I – tensile and compressive fatigue fractures. **Mokuzai Gakkaishi**, v. 30, p. 791–798, 1984.

OKUYAMA, T., AND MARSOEM, S. N. Mechanical responses of wood to repeated loading IV. **Mokuzai Gakkaishi**, v. 33, p. 844-850, 1987.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 224p.

PINHEIRO, R. V.; ROCCO LAHR, F. A.. **Emprego da madeira do gênero Pinus na construção de estruturas de cobertura**. CADERNOS DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS (ONLINE), São Carlos, v. 10, p. 1-27, 1999.

PRITCHARD, J., ANSELL, M.P., THOMPSON, R.J.H., BONFIELD, P.W. Effect of two relative humidities on the MOE, MOR and fatigue life of MDF, OSB and chipboard. **Wood Science and Technology**, v. 35, p. 395-424, 2001.

ROCCO LAHR, F. A.. **Considerações a respeito da variabilidade de propriedades de resistência e de elasticidade da madeira**. São Carlos: EESC, 1990 (Tese de Livre Docência).

ROCCO LAHR, F. A.; CALIL Jr, C. ; DIAS, A. A. ; STAMATO, G. C. ; PIGOZZO, J. C. **Projeto e construção de pontes de madeira**. São Carlos - SP: Escola de

Engenharia de São Carlos, 2002 (Texto didático).

SALMI, A., MONTONEN, R., SALMINEN, L.I., SUURONEN, J.P., SERIMAA, R., HÆGGSTRÖM, E. Cyclic impulsive compression loading along the radial and tangential wood directions causes localized fatigue. **Journal of Applied Physics**, v. 112, n. 12, 2012.

SASAKI, Y.; ANDO, K.; YAMASAH, M.; ITO, T.; SUZUKI, S. Fatigue Behavior of Wood-Based Panels for Structural Use under Shear-Loading through Thickness. **Journal of the Society of Materials Science**, v. 52, n. 7, p. 827-832, July 2003.

SASAKI, Y., OYA, A., YAMASAKI, M. “Energetic investigation of the fatigue of wood”. **Holzforschung**, v. 68, n. 7, p. 843-848, 2014.

SHACKELFORD, James F. **Ciências dos Materiais**. 6ª Edição, Editora Pearson, 2008.

SHRESTHA D. Shear properties tests of oriented strandboard panels. **Forest Product Journal**, v. 49, n. 10, p. 41–46, 1999.

SIEGLOCH, A, M.; MARCHIORI, J. N. C. Anatomia da madeira de treze espécies de coníferas. **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 3, p. 149-165, 2015. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v6n3p149-165.

STOLF, D. O.; BERTOLINI, M. S.; FERRO, F.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R Influência do teor de umidade na propriedade de tenacidade de espécies florestais. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 501-508, 2014.

SZOSTAK, B.; TROCHONOWICZ, M. e KOWALCZYK, M. (2020). Determination of the Strength Parameters of Pinewood Based on the Non-Destructive Sclerometric Test with a Wood Hammer. **Civil and Environmental Engineering Reports**, v. 30, n. 1, p. 43-52. DOI: 10.2478/ceer-2020-0004

SUGIMOTO, T.; YAMASAKI, M.; SASAKI, Y. Fatigue and hysteresis effects in wood-based panels under cyclic shear load through thickness. **Wood and Fiber Science**, v. 38, n. 2, p. 215-228, April 2006.

SUGIMOTO, T.; SASAKI, Y. Effect of loading frequency on fatigue life and dissipated energy of structural plywood under panel shear load. **Wood Science and Technology**, v. 40, p. 501–515, 2006.

SUGIMOTO, T.; SASAKI, Y. 2006. Effect of loading waveform on the fatigue of structural plywood in shear through thickness. 9th World Conference on Timber Engineering 2006. **Proceedings** [...]. Portland, WCTE 2006, v. 3, p. 1818-1824, 2006.

SUGIMOTO, T.; SASAKI, Y.; YAMASAKI, M. Fatigue of structural plywood under cyclic shear through thickness I: fatigue process and failure criterion based on strain energy. **Journal of Wood Science**, v. 53, p. 296-302, 2007.

SUGIMOTO, T.; SASAKI, Y.; YAMASAKI, M. Fatigue of structural plywood under cyclic shear through thickness II: a new method for fatigue life prediction. **Journal of Wood Science**, v. 53, p. 303-308, 2007.

SUGIMOTO, T.; SASAKI, Y. Fatigue life of structural plywood under two-stage panel shear load: a new cumulative fatigue damage theory. **Journal of Wood Science**, v. 53, p. 211-217, 2007.

SUGIMOTO, T.; SASAKI, Y. Fatigue of structural plywood under cyclic shear through thickness III: energy dissipation performance. **Journal of Wood Science**, v. 54, p. 169-

173, 2008.

THOMPSON, R. J. H.; BONFIELD, P. W.; DINWOODIE, J.M.; ANSELL M. P. Fatigue and creep in chipboard. Part 3. The effect of frequency. **Wood Science and Technology**, v. 30, n. 1, p. 293–305, 1996.

THOMPSON, R.J.H., ANSELL, M.P., BONFIELD, P.W., DINWOODIE, J. M. Fatigue in wood-based panels. Part 1: The strength variability and fatigue performance of OSB, chipboard and MDF. **Wood Science and Technology**, v. 36, p. 255-268, 2002.

THOMPSON, R.J.H., ANSELL, M.P., BONFIELD, P.W., DINWOODIE, J.M. “Fatigue in wood-based panels. Part 2: property changes during fatigue cycling of OSB, chipboard and MDF”. **Wood Science and Technology**, v. 39, p. 311-325, 2005.