



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

FADIGA EM PEÇAS DE MADEIRA PARA USO ESTRUTURAL

Johnny Soares de Carvalho

São Carlos

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO
CIVIL

FADIGA EM PEÇAS DE MADEIRA PARA USO ESTRUTURAL

Johnny Soares de Carvalho

Tese apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Estruturas e Construção
Civil como requisito parcial à obtenção do
título de DOUTOR EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

Orientador: Prof. Dr. André Luis Christoforo

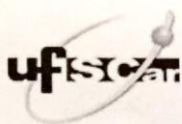
São Carlos
2017

Carvalho, Johnny Soares de.

Fadiga em peças de madeira para uso estrutural. São
Carlos,
PPGECiv, 2017
82p.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos,
Departamento de Engenharia Civil
Orientador: Prof. Dr. André Luis Christoforo.

1 – Madeira; 2 – Fadiga; 3 – Resistência; 4 – Rigidez
I – Título



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Tese de Doutorado do candidato Johnny Soares de Carvalho, realizada em 18/12/2017:

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo
UFSCar

Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr
USP

Prof. Dr. Antonio Carlos Henriques Marques
UNIP

Profa. Dra. Maria Fátima do Nascimento
EESC/USP

Prof. Dr. Décio Gonçalves
UNICEP

DADOS CURRICULARES*JOHNNY SOARES DE CARVALHO*

- NASCIMENTO:** 15 de Julho de 1976, São Carlos, São Paulo, Brasil
- FILIAÇÃO:** Edson Placeres de Carvalho
Maria Cristina Soares de Carvalho
- 1995 - 1999:** Curso de Graduação em Engenharia Civil
Escola de Engenharia de São Carlos -
Universidade de São Paulo - USP
- 2000 - 2002:** Mestrado em Engenharia de Estruturas
Escola de Engenharia de São Carlos -
Universidade de São Paulo - SET/EESC/USP
- 2015 - 2017:** Doutorado em Estruturas e Construção Civil
Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

Dedico este trabalho

*A **Deus**, pelo amor incondicional e imerecido, pelo dom da vida, pela força, inspiração, alegria e porque as suas misericórdias para conosco se renovam a cada manhã.*

Agradecimentos

Primeiramente a **Deus** por sua presença constante em minha vida, me abençoando, fortalecendo e capacitando.

Aos meus pais **Edson e Cristina** pelo exemplo de vida, de amor e cumplicidade de vocês, por cada noite mal dormida, pelo amor a mim dedicado, sempre me apoiando e incentivando na concretização dos meus sonhos e objetivos, mas sobretudo, pelas orações incessantes.

Aos meus filhos **Leonardo e Lucas**, que a cada beijo, a cada abraço recebido, renovavam minhas forças e me davam a certeza de que, por eles, tudo isso valeu a pena. Eu os amo muito!

À **Carolina Cisoto**, que me incentivou e me impulsionou a ingressar no Doutorado e a encarar essa jornada, obrigado mesmo, de coração.

À **Emma**, que a cada chegada às madrugadas estava de plantão, pronta para receber e dar um carinho - cachorrinha mais do que especial, parte da família.

Ao meu orientador e amigo **Professor Dr. André Luis Christoforo** pela competência, determinação, dedicação, apoio e sobretudo, muita paciência comigo, impagável, muitíssimo obrigado.

Ao meu orientador de Iniciação Científica, Mestrado, amigo e parceiro musical, **Professor Dr. Francisco Antônio Rocco Lahr**, através de quem toda essa jornada pelo universo das estruturas de madeira começou, muito obrigado por tudo, jamais poderei retribuir.

À **Universidade Federal de São Carlos** que através dos tempos tem se destacado na formação de excelentes profissionais e que ano após ano desponta como uma das melhores Universidades de nosso país, o meu muito obrigado.

Ao Departamento de Engenharia Civil na pessoa do seu atual chefe, **Professor Dr. Alex Sander Clemente de Souza** e da vice chefe, **Professora Dra. Katia Sakihama Ventura**.

Ao Coordenador do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, **Professor Dr.**

Guilherme Aris Parsekian e ao vice coordenador, **Professor Dr. Fernando Henrique Martins Portelinha**.

À secretária do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da UFSCar, **Solange Damha**, que ao longo dessa jornada se tornou uma grande amiga – obrigado por tudo.

Ao **Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira** do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo pelo apoio e parceria ao longo dessa jornada.

A todos os companheiros e amigos da **Prefeitura Universitária**, sem exceção, que desde o início me apoiaram durante toda essa jornada, em especial aos amigos: Rogério, Cláudio, Alex, Pablo e Ivete, que estiveram mais próximos nesse período. Obrigado pela amizade e paciência, sobretudo em momentos de mau humor!

Ao Engenheiro **Antônio Carlos** pelo companheirismo e conhecimentos compartilhados durante toda jornada.

Ao Engenheiro **Tiago Hendrigo de Almeida**, por todo apoio e suporte, você é um profissional e um ser humano sensacional. Muito obrigado!

À aluna de iniciação científica **Thaina Barbosa Queiroga** que também me apoiou nessa jornada, muito obrigado.

À Engenheira **Giovana Gobato**, ex-aluna, hoje companheira de profissão e também pesquisadora da área. Obrigado pelo apoio!

Aos **alunos e colegas do Programa de Pós-graduação** em Estruturas e Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da UFSCar, valeu o companheirismo durante toda a jornada, sobretudo durante o período em que cursamos as disciplinas. Valeu!

Aos Professores **Erich e Takeda** do Departamento de Engenharia Civil da UFSCar, obrigado pelo apoio e incentivo.

À **Professora Dra. Maria Cristina Zampieri**, diretora da Universidade Paulista em Araraquara pelas palavras de incentivo a ingressar nessa jornada.

Aos **Professores membro da banca** examinadora que se dispuseram para participar desse momento muito importante em minha vida acadêmica.

À **Natália Kalatzis** só posso dizer: não seria possível chegar até aqui sem você. Deus a colocou em minha vida num momento muito difícil, momento de desesperança, tristeza, e você me reergueu! Não há palavras suficientes para agradecer! Obrigado por tudo – LOMLF, é isso, simples assim!

*Porque melhor é a sabedoria do que
jóias, e de tudo que se deseja nada se
podê comparar a ela.*

Provérbios 8.11

RESUMO

O objetivo foi criar um modelo teórico que permitisse com segurança e confiabilidade se obter, valores de resistência e rigidez reais a que o elemento estrutural estará submetido ao longo de sua vida útil. O efeito foi estudado para propriedades de resistência e rigidez, sendo avaliados módulo de elasticidade (E_M) e tensão de serviço (f_M) variando de acordo com o número crescente de ciclos do ensaio de fadiga para as cinco classes de folhosas preconizadas pela NBR 7190/1997. Tais resultados permitiram construir uma curva de fadiga, relacionando as duas variáveis em função do número de ciclos (N_{ciclos}) – construção das curvas $E \times N_{\text{ciclos}}$ e $\sigma \times N_{\text{ciclos}}$. O efeito fadiga mostrou-se presente e pronunciado em todas as classes de resistência. Verificou-se uma redução nas propriedades de resistência e de rigidez com o aumento do N_{ciclos} de carregamento aplicado em todas as frequências. A partir dos modelos de regressão multivariáveis e dos respectivos coeficientes de determinação, obteve-se um modelo genérico para o conjunto envolvendo as cinco espécies de madeira, ressaltando a inserção da densidade aparente ($\rho_{12\%}$) como variável independente, o que permitiu maior generalização do uso dos ajustes na estimativa das propriedades E_M e f_M , apresentando coeficientes de determinação significativos.

Palavras-chave: madeira, fadiga, resistência e rigidez

ABSTRACT

The purpose of present study was to create a theoretical model that allowed with security and reliability to obtain, values of strength and stiffness to which the structural element will be submitted throughout its useful life. The effect was studied for strength and stiffness properties, and the modulus of elasticity (E_M) and bending strength (f_M) were evaluated according to the increasing number of cycles of the fatigue test for the five classes of hardwoods, recommended by NBR 7190/1997. These results allowed to construct a fatigue curve, relating the two variables as a function of the number of cycles (N_c) - construction of the curves $E \times N_c$ and $\sigma \times N_c$. The fatigue effect was present and pronounced in all resistance classes. A reduction in strength and stiffness properties was observed with increasing loading N_c applied at all frequencies. From the multivariate regression models and the respective determination coefficients, a generic model was obtained for the set involving the five wood species, emphasizing the insertion of the apparent density as an independent variable, which allowed a greater generalization of the use of the adjustments in the estimation of the E_M and f_M properties, presenting significant determination coefficients.

Keywords: wood, fatigue, strength e stiffness

SUMÁRIO

RESUMO.....	xi
ABSTRACT	xii
SUMÁRIO.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	10
3. JUSTIFICATIVA.....	11
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
4.1. Características das espécies de madeira avaliadas nessa pesquisa	12
4.1.1. Caixeta (<i>Tabebuia cassinoides</i>).....	13
4.1.2. Cedroarana (<i>Cedrelinga catenaeformis</i>)	15
4.1.3. Cambará (<i>Erisma uncinatum</i>)	18
4.1.4. Tatajuba (<i>Bagassa guianensis</i>).....	20
4.1.5. Roxinho (<i>Peltogyne</i> spp.)	23
4.2. Fadiga	25
4.3. Documentos Normativos Internacionais	27
4.4. ABNT NBR 7190/1997 – Projeto de Estruturas de Madeira	28
4.5. Pesquisas associadas a fadiga na madeira	29
5. MATERIAIS E MÉTODOS	34
6. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	39
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
7.1. Madeira de Caixeta	42

7.2. Madeira de Cedroarana.....	44
7.3. Madeira de Cambará.....	47
7.4. Madeira de Tatajuba.....	49
7.5. Madeira de Roxinho	51
7.6. Todas as Espécies de Madeira	54
8. CONCLUSÕES.....	56
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1: Classes de Resistência para DICOTILEDÔNEAS	9
Tabela 6.1: Valores característicos da resistência na compressão paralela às fibras.	39
Tabela 6.2: Tratamentos experimentais delineados	40
Tabela 7.1: Resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas da madeira de Caixeta.	43
Tabela 7.2: Resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas da madeira de Cedroarana.	45
Tabela 7.3: Resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas da madeira de Cambará.....	48
Tabela 7.4: Resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas da madeira de Tatajuba.	50
Tabela 7.5: Resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas da madeira de Roxinho.	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Figuras mostrando A) Cobertura; B) Passarela; C) Silos; D) Linha de transmissão utilizando madeira	1
Figura 1.2: A) Ponte Kapellbrücke na cidade de Lucerna, Suíça; B) Ponte Keystone Wye, localizada no estado de Dakota do Sul, Estados Unidos	5
Figura 1.3: Detalhe de uma ligação executada com pinos metálicos.....	6
Figura 1.4: Exemplo de uma passarela estaiada executada em estrutura de madeira no Brasil	8
Figura 1.5: Ponte rodoviária em Québec, Canadá	8
Figura 4.1: Corpos-de-prova confeccionados com as madeiras mencionadas. A) Cambará; B) Tatajuba; C) Caixeta; D) Cedroarana; E) Roxinho.	13
Figura 4.2: Diversos tipos de corpos-de-prova confeccionados com Caixeta .	14
Figura 4.3: Corpos-de-prova de Caixeta utilizados nos experimentos	14
Figura 4.4: A) Prancha de Cedroarana; B) Tora de Cedroarana.....	16
Figura 4.5: Corpos-de-prova de Cedroarana utilizados nos experimentos	16
Figura 4.6: Tora de Cambará	18
Figura 4.7: Corpos-de-prova de Cambará utilizados nos experimentos.....	19
Figura 4.8: A) Prancha de Tatajuba; B) Tora de Tatajuba.....	21
Figura 4.9: Corpos-de-prova de Tatajuba utilizados nos experimentos	21
Figura 4.10: A) Prancha de Roxinho; B) Tora de Roxinho	23
Figura 4.11: Corpos-de-prova de Roxinho utilizados nos experimentos	24

Figura 5.1: Máquina de Ensaio Universal AMSLER.	34
Figura 5.2: Máquina de Ensaio de Fadiga.	35
Figura 5.3: Esquema da retirada dos corpos-de-prova das espécies estudadas.	37
Figura 7.1: Variação das propriedades mecânicas da madeira de Caixeta em função do número de ciclos [Nci] (A) e da frequência [Fr] (B) de excitação na fadiga.	42
Figura 7.2: Variação das propriedades mecânicas da madeira de Cedroarana em função do número de ciclos [Nci] (A) e da frequência [Fr] (B) de excitação na fadiga.....	45
Figura 7.3: Variação das propriedades mecânicas da madeira de Cambará em função do número de ciclos [Nci] (a) e da frequência [Fr] (b) de excitação na fadiga.	47
Figura 7.4: Variação das propriedades mecânicas da madeira de Tatajuba em função do número de ciclos [Nci] (A) e da frequência [Fr] (B) de excitação na fadiga.	50
Figura 7.5: Variação das propriedades mecânicas da madeira de Roxinho em função do número de ciclos [Nci] (A) e da frequência [Fr] (B) de excitação na fadiga.	52
Figura 7.6: Variação nos valores das densidades das espécies de madeira investigadas.	54

SÍMBOLOS E ABREVIATÓES

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AD - Teste de Anderson-Darling

ANOVA - Análise de variância

AREMA - Manual de Engenharia de Estradas de Ferro

ASTM - American Society for Testing and Materials

b - Base da seção transversal

Bt - Teste de Bartlett

CCA – Preservativo à base de Cromo, Cobre e Arsênio

CV - Coeficiente de variação

E - Módulo de Elasticidade

$E_{c0,m}$ - Módulo de elasticidade médio na compressão paralela às fibras

E_M - Módulo de Elasticidade Médio

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EUROCODE - Comité Européen De Normalization

Exp - Exponencial

f - Frequência

F - Valor da força obtida no ensaio de flexão

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

f_{c0} - Resistência na compressão paralela às fibras

$f_{c0,k}$ - Resistência característica na compressão paralela as fibras

F_M - Módulo de ruptura

f_M - Tensão de serviço

Fr - Frequência de excitação

$f_{v,k}$ - Resistência característica ao cisalhamento

f_{wk} – Resistência característica à flexão

Geo - Geométrica

h - Altura da seção transversal

H₀ - Hipótese nula

H₁ - Hipótese alternativa

Ha - Hectare

Hz - Hertz

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Kg/m³ - Kilograma por metro cúbico

L- Comprimento útil da amostra

LaMEM - Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira

Lin - Polinomial Linear

Log - Logarítmica

MLC - Madeira Laminada Colada

mm - Milímetros

mm² - Milímetro quadrado

MPa - Mega Pascal

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

Nc - Número de ciclos

Nci - Número de ciclos na fadiga

PP - Polipropileno

R² – Coeficiente de Determinação

STRmax - variação da rigidez e a deformação máxima

USP - Universidade de São Paulo

X - Variável dependente

Y - Variável independente

μm - Micrômetro

ρ_{aparente} - Densidade aparente

$\rho_{\text{bas,m}}$ - Densidade básica média

σ - Curva de tensão pelo número de ciclos

σm - Tensão de serviço

1. INTRODUÇÃO

Quando utilizada em estruturas adequadamente projetadas, associada a manutenções preventivas periódicas, a madeira apresenta-se como um material estrutural, que possui qualidades que concorrem diretamente com a maioria de outros materiais convencionais utilizados para resolução de problemas de engenharia nas diversas áreas da construção civil, como transportes e edificações, entre outros CHRISTOFORO *et al.* (2012) e STOLF *et al.* (2014).

Citam-se como exemplos (Figura 1.1), a madeira utilizada na solução de problemas relacionados a coberturas (sejam elas residenciais, comerciais, industriais, construções rurais), em cimbramentos (para estruturas de concreto armado e protendido), para transposição de obstáculos (construção de pontes, viadutos, passarelas para pedestres), na área de armazenamentos (silos verticais e horizontais), em linhas de transmissão (energia elétrica, telefonia), dentre outros.

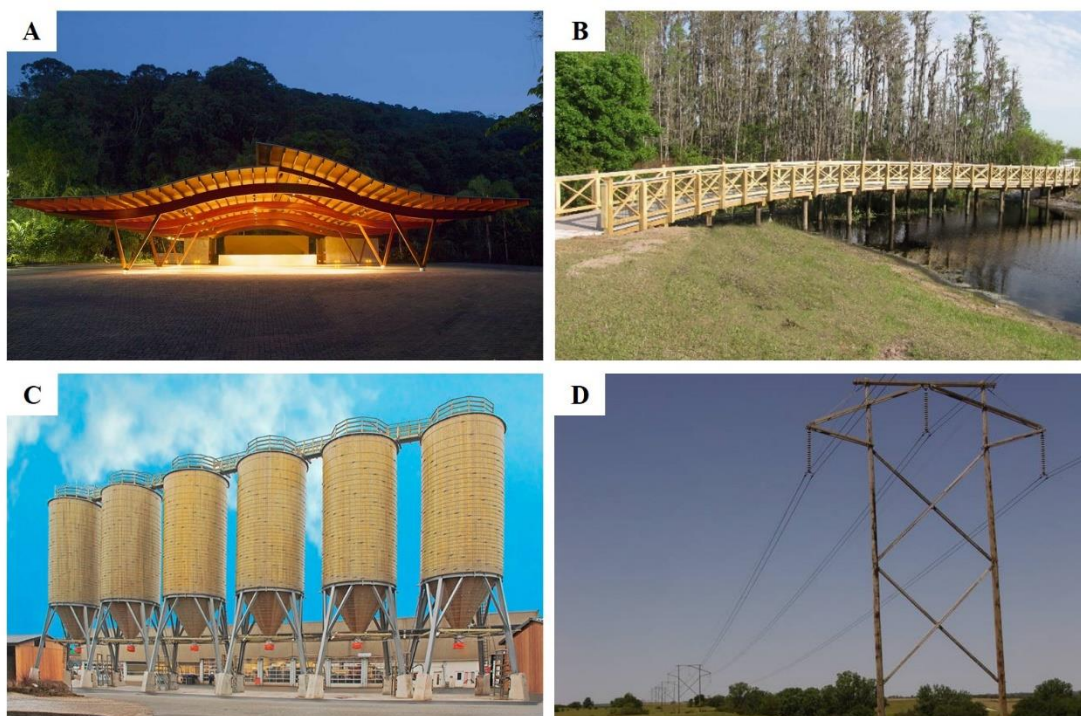


Figura 1.1: Figuras mostrando A) Cobertura; B) Passarela; C) Silos; D) Linha de transmissão utilizando madeira [Fontes:A)<http://www.portelawoods.com.br/wp->

<content/uploads/2016/02/fotos-de-coberturas.jpg>;

B) http://www.naturebridges.com/features/_img/oakstead_pedestrian_bridge.jpg;

C) http://img.directindustry.com/pt/images_di/photo-g/90461-6094189.jpg;

D) https://thumbs.imagekind.com/4488344_650/Hughes-Brothers-Magnificent-kV-KFrame_art.jpg?v=1492700067

Além disso, cabe ainda citar que a madeira é muito empregada na fabricação de diversos componentes para as edificações como lambris, forros, pisos, painéis de divisórias, portas e caixilhos.

Especificamente no Brasil, país que apresenta grande variabilidade e disponibilidade madeireira, provenientes de grandes reservas de florestas tropicais (madeiras certificadas) ou ainda de imensas áreas de reflorestamento, o uso da madeira para fins estruturais tem se dado em níveis muito inferiores ao desejado, apesar do enorme potencial, conforme relatado por MACÊDO & CALIL (2007), que afirmam existir, somente no estado de São Paulo, áreas de reflorestamento superiores a 950.000 hectares.

Diversos trabalhos como os de CARVALHO (2000), SERPA *et al.* (2003), FONSECA *et al.* (2012), apontam madeiras de reflorestamento com grande potencial para usos diversos, incluindo seu uso na construção civil como elemento estrutural. Afirmam ainda que em diversos aspectos da silvicultura e tecnologia de cultivo, tais espécies sempre apresentaram panoramas muito otimistas quanto à propagação do seu uso (hoje já consagradas no cenário nacional).

Muitas espécies com potencial comercial já comprovado precisam ainda ser amplamente estudadas para que seu uso seja viabilizado em todos os setores da economia nacional. FIORELLI & DIAS (2011) afirmam que o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas da madeira possibilita seu melhor aproveitamento.

ZANGIÁCOMO *et al.* (2016) apontam que no Brasil, o dimensionamento das estruturas de madeira é feito com o uso da norma Brasileira ABNT NBR 7190/1997, que estabelece as premissas e os métodos

de cálculo para o projeto estrutural. Além das definições de projeto, esta norma apresenta ainda metodologia para a determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira, e também, propriedades de algumas poucas espécies de madeira são divulgadas.

Nesse cenário, mesmo apresentando dados potencialmente instigadores, a madeira no Brasil para fins estruturais ainda é muito pouco utilizada, sobretudo se comparada com alguns países Europeus e da América do Norte. Tal fato se deve, dentre outros, a alguns fatores como a falta de tradição na aplicação de tal material, a alguns preconceitos e tabus em relação à madeira (os quais começam a ser quebrados com a incorporação de alta tecnologia na sua aplicação) e, sobretudo, pelo desconhecimento de algumas características de comportamento do material.

Nos países destas regiões supracitadas, a madeira vem sendo muito estudada e seus conceitos amplamente difundidos atualmente, sendo grande o volume de estudos específicos de casos. Já no Brasil, a mesma começou a ganhar força na década de 80 com os esforços levados adiante por alguns laboratórios, como os da Escola de Engenharia de São Carlos e da Escola Politécnica de São Paulo, ambos da USP.

Com a publicação da Norma Brasileira NBR 7190 – Projetos Estruturais de Madeira, em 1997, muitos dos conhecimentos, então disponíveis na época, foram incorporados ao documento normativo, redigido tendo como base os conceitos do Método dos Estados Limites. A NBR 7190 é um documento que pode ser comparado aos mais reconhecidos internacionalmente na área.

Com o passar do tempo, esse potencial da madeira começa então, aos poucos, a ser reconhecido e seu uso, e o conhecimento de suas propriedades, mais intensamente difundidos; mas ainda assim, a madeira vem sendo subutilizada para fins estruturais quando comparada com alguns países Europeus, da América do Norte e mesmo da América do Sul, como já citado.

Um ponto positivo e relevante a ser mencionado para o interesse despertado no presente estudo aqui proposto, é o reconhecimento, por parte da FAPESP da importância de pesquisas a respeito das estruturas de madeira, com a aprovação, dentre outras solicitações, do Projeto Temático “Programa Emergencial das Pontes de Madeira para o Estado de São Paulo” que tinha como produto final do projeto, a definição das melhores alternativas de projetos de pontes de madeira para estradas municipais e vicinais, pelas quais se dá o escoamento da produção agropecuária dos municípios do Estado. O déficit de pontes alcançava o número aproximado de 15.000 (quinze mil) num levantamento preliminar efetuado no âmbito do Projeto Temático.

Mais recentemente, em fevereiro de 2015, o Governo do Estado do Mato Grosso anunciou um investimento de R\$ 60 Milhões para reparar estradas no estado, incluindo a recuperação e construção de diversas pontes de madeira.

Pontes são construções destinadas a estabelecer a continuidade de vias de quaisquer naturezas, sendo estas em geral rodovias e ferrovias, segundo EL DEBS & TAKEYA (1999). Em alguns países, desde há muito, a madeira tem sido empregada como material para confecção dos elementos estruturais principais, inicialmente com arranjos estruturais simples e, mais adiante, com arranjos mais elaborados.

Podemos citar como exemplo a ponte Kapellbrücke (Figura 1.2 A), que é uma ponte de madeira na cidade de Lucerna, Suíça, construída no ano de 1333, ainda em plena atividade mesmo após um incêndio que atingiu 2/3 de sua estrutura no ano de 1993, sendo restaurada e reaberta no ano de 1994. Outro exemplo é a ponte Keystone Wye (Figura 1.2 B), localizada no estado de Dakota do Sul, Estados Unidos, construída no ano de 1966, mostrando um arranjo estrutural mais elaborado, bem como a sua tecnologia construtiva em madeira laminada colada.



Figura 1.2: A) Ponte Kapellbrücke na cidade de Lucerna, Suíça; B) Ponte Keystone Wye, localizada no estado de Dakota do Sul, Estados Unidos. [Fontes: A)<http://www.lexpose.ch/wp2/wp-content/gallery/luzerner-fest-2012/luzerner-fest-2012-11.jpg>; B)https://terryfic3d.files.wordpress.com/2011/09/mtrush_mg_8661.jpg]

Com este material, associado ao concreto armado e aos elementos metálicos de ligação e solidarização, foram construídas pontes e passarelas para pedestres com vãos consideráveis, de acordo com registros de estruturas marcantes, contidos em trabalho apresentado por HELLMEISTER (1983), já na década de mil novecentos e oitenta.

Devido ao caráter peculiar das ações que ocorrem durante a vida útil de uma ponte, deve-se considerar o efeito dinâmico das ações que sobre ela

atuam, decorrentes da passagem de veículos ou composições ferroviárias. Além disso, é importante salientar que, em uma ponte, deve-se visar o atendimento das condições de utilização com um mínimo de manutenção, buscando-se evitar transtornos de interrupção de tráfego e outros aspectos indesejáveis.

Diante desse cenário amplamente promissor, cabe mencionar que há ainda alguns aspectos do comportamento específico referente à madeira que não foram objeto de pesquisas conclusivas (mas que são vitais para o melhor aproveitamento estrutural da madeira) – esse é o caso da fadiga. A NBR 7190/1997 não faz menção a alterações das propriedades mecânicas em função do fenômeno fadiga, lembrando ser o efeito da fadiga de fundamental importância em diversos aspectos nos projetos de estruturas como por exemplo nas ligações que sejam solicitadas por forças dinâmicas, sejam elas cíclicas ou que variem ao longo do tempo (Figura 1.3).

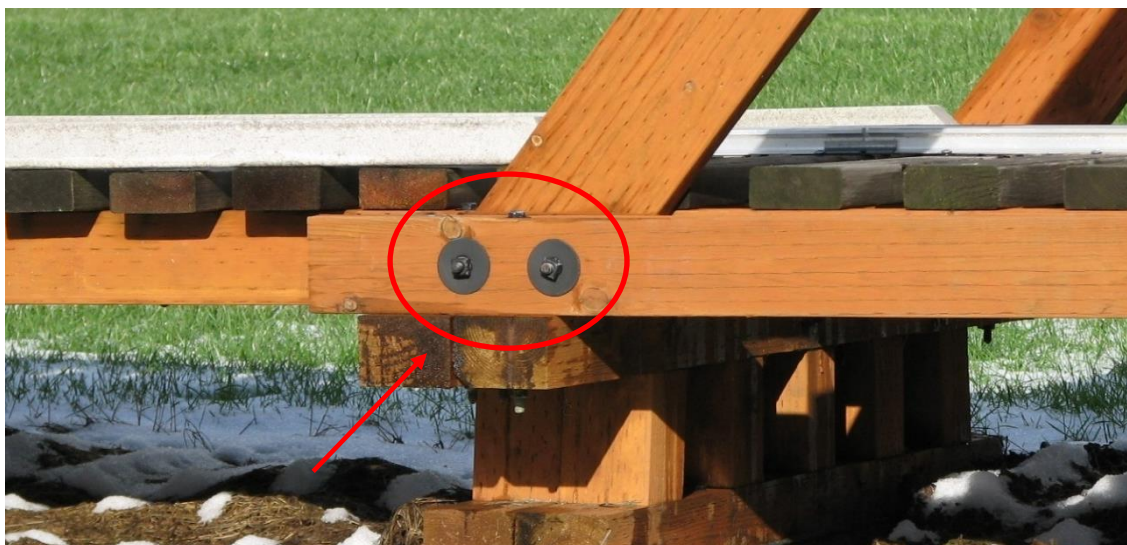


Figura 1.3: Detalhe de uma ligação executada com pinos metálicos [Fonte: https://www.discoverlivesteam.com/magazineold/IMG_1932.JPG.]

A fadiga de um material pode ser entendida como a mudança de suas propriedades, resultantes da aplicação de cargas cíclicas. De acordo com SURESH (1991), as primeiras pesquisas a respeito da deformação e fratura dos materiais causados pela fadiga, datam do século XIX. Sempre houve uma grande preocupação em conseguir determinar quanto tempo depois do início

das fissurações ou fraturas, o material com que se construiu a peça ainda permanecerá com capacidade portante suficiente para prosseguir resistindo às solicitações atuantes.

Juntamente com o desenvolvimento das “Ciências dos Materiais” e da “Mecânica das Fraturas” em décadas mais recentes, a “Fadiga dos Materiais” tem emergido como uma área de pesquisa e aplicação científica que abrange as diversas áreas da ciência dos materiais (metais, cerâmicas, polímeros, compósitos), envolvendo a engenharia civil (Figura 1.4), a engenharia mecânica e a engenharia aeronáutica, entre outras.

A palavra fadiga originou-se do Latim *fatigare*, que significa cansar, esgotar. Também associada a condições físicas e/ou mentais em seres humanos, a palavra fadiga tem sido amplamente aceita no vocabulário técnico da engenharia e da ciência dos materiais para designar a falha ou o “esgotamento” da capacidade portante de um material submetido a carregamentos cíclicos.

As forças dinâmicas possuem um papel fundamental no estudo da fadiga em elementos estruturais. De acordo com SEGUNDINHO (2010), o simples caminhar de pedestres produz forças dinâmicas variantes no tempo com componentes em diversas direções, com múltiplas frequências geradas pela aceleração e desaceleração da massa dos corpos, que podem variar de 0,7Hz a 2,4Hz. O autor afirma ainda que passarelas são elementos estruturais que possuem grande potencial de sofrer vibrações excessivas devido ao efeito dinâmico dos carregamentos produzidos pela ação de pedestres. Além de causar desconforto aos usuários (Estado Limite de Utilização), ao longo do tempo são responsáveis por provocar a fadiga dos elementos estruturais, causando alteração nas propriedades físicas e mecânicas destes.



Figura 1.4: Exemplo de uma passarela estaiada executada em estrutura de madeira no Brasil [Fonte: SEGUNDINHO (2010)]

Esse efeito do carregamento dinâmico, também pode ser observado em pontes rodoviárias ou ferroviárias, gerado pelo tráfego de veículos leves ou pesados no primeiro caso (Figura 1.5) e pelas diferentes composições ferroviárias no segundo caso. Ao longo do tempo, essas repetidas ações em diferentes frequências e número de ciclos geram o efeito da fadiga, objeto principal de estudo no presente trabalho.



Figura 1.5: Ponte rodoviária em Québec, Canadá
[Fonte: <http://nordic.ca/en/projects/structures/temiscamie-river-bridge>]

Foram utilizadas no presente estudo diversas espécies abrangendo todas as classes de resistência preconizadas pela NBR 7190/1997, conforme mostrado na Tabela 1.1 a seguir. Foi dada preferência às espécies potencialmente comerciais para uso em estruturas, na construção civil e que possuem muito poucos, ou quase nenhum, estudos realizados até o presente momento.

Tabela 1.1: Classes de Resistência para DICOTILEDÔNEAS

DICOTILEDÔNEAS (para teor de umidade padrão de 12%)					
CLASSES	$f_{c0,k}$ MPa	$f_{v,k}$ MPa	$E_{c0,m}$ MPa	$\rho_{bas,m}$ kg/m ³	$\rho_{aparente}$ kg/m ³
C 20	20	4	9.500	500	650
C 30	30	5	14.500	650	800
C 40	40	6	19.500	750	950
C 50*	50	7	22.000	770	970
C 60	60	8	24.500	800	1.000

* Nova Classe de Resistência proposta para a revisão da NBR 7190

*Fonte: NBR 7190/1997

2. OBJETIVOS

Constitui-se objetivo deste trabalho, a partir da definição de critérios para a quantificação do efeito fadiga em peças estruturais de madeira serrada em geral, a criação de um modelo teórico que permita com segurança e confiabilidade se fornecer, no momento do projeto, valores de resistência e rigidez muito próximos dos valores reais com que o elemento estrutural irá trabalhar ao longo de sua vida útil.

O mencionado efeito foi estudado não somente para propriedades de resistência, mas também para as propriedades de rigidez, sendo avaliados o módulo de elasticidade e a tensão de serviço variando de acordo com o número crescente de ciclos do ensaio de fadiga para as cinco classes de folhosas preconizadas pela NBR 7190/1997. Tais resultados permitirão construir uma curva de fadiga, relacionando as duas variáveis citadas em função do número de ciclos – construção das curvas $E \times N_{\text{ciclos}}$ e $\sigma \times N_{\text{ciclos}}$.

A partir dessas curvas-base, criou-se um modelo único abrangendo todas as espécies em função de suas densidades aparentes ($\rho_{12\%}$), para a obtenção do valor do módulo de elasticidade e da tensão máxima de flexão sob o efeito da fadiga.

3. JUSTIFICATIVA

Como o Brasil é um país que apresenta grande potencial madeireiro, seja com madeiras provenientes de grandes reservas tropicais, ou de enormes áreas de reflorestamento, em função do alto déficit de pontes que o país enfrenta, e ainda, dada a importância que o fenômeno fadiga representa na durabilidade e vida útil dos elementos estruturais, justifica-se a necessidade do presente estudo através do equacionamento e quantificação da influência das variáveis já mencionadas anteriormente no comportamento da madeira aplicada estruturalmente em pontes, passarelas e em estruturas de madeira de maneira geral. Dessa forma será possível incrementar o nível dos projetos, dando-se origem a estruturas com maior durabilidade e, sobretudo, confiabilidade.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para uma adequada compreensão do assunto a abordar, é interessante um registro de definições e conceitos a respeito da madeira e da fadiga nos materiais.

4.1. Características das espécies de madeira avaliadas nessa pesquisa

Para o desenvolvimento do presente estudo, foram utilizadas 5 espécies de madeira tropicais do grupo das folhosas (Figura 4.1) conforme as classes de resistência preconizadas pela NBR 7190/1997, sendo elas:

- Caixeta (C20) (*Tabebuia cassinoides*);
- Cedroarana (C30) (*Cedrelinga catenaeformis*);
- Cambará (C40) (*Erisma uncinatum*);
- Tatajuba (C50) (*Bagassa guianensis*);
- Roxinho (C60) (*Peltogyne spp.*).



Figura 4.1: Corpos-de-prova confeccionados com as madeiras mencionadas. A) Cambará; B) Tatajuba; C) Caixeta; D) Cedroarana; E) Roxinho. [Fonte: De autoria própria]

As madeiras foram adquiridas em estabelecimentos comerciais do país e devidamente estocadas e processadas nas dependências do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (EET) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP).

O enquadramento das mesmas dentro das respectivas classes de resistência foi realizado conforme preconiza a Norma NBR 7190/1997 – Anexo B – Determinação das propriedades das madeiras para projeto de estruturas.

A seguir estão apresentadas algumas características das madeiras utilizadas na pesquisa.

4.1.1. Caixeta (*Tabebuia cassinoides*)

Também conhecida como Caxeta, Pau-caixeta, Pau-paraíba, Pau-de-tamanco, Tabebuia, Tabebuia-do-brejo, Tamancão, Tamanqueira e Pau-de-viola, é uma árvore paludícola americana, do litoral, da família das bignoniáceas. A espécie está ameaçada de extinção no Brasil. As zonas de maior ocorrência são no Estado do Espírito Santo, São Paulo (litoral sul, município de Itanhaém) até Santa Catarina.

Possui como características gerais ser uma madeira muito leve, macia ao corte, possui cerne branco palha a amarelado, indistinto do alburno, com textura média, grã direita e com brilho moderado; é lisa ao tato, apresentando odor e gosto imperceptíveis, IPT (2017) (Figura 4.2; Figura 4.3).



Figura 4.2: Diversos tipos de corpos-de-prova confeccionados com Caixeta.
[Fonte: http://nauticurso.com.br/shop/index.php?route=product/category&path=105_86]



Figura 4.3: Corpos-de-prova de Caixeta utilizados nos experimentos. [Fonte: De autoria própria].

Descrição macroscópica: Camadas de crescimento distintas somente sob lente de 10x, demarcadas pelo achatamento das fibras e pelos canais axiais em disposição tangencial.

Parênquima axial visível a olho nu, paratraqueal aliforme linear, confluyente em trechos finos e longos. Raios visíveis a olho nu; finos e numerosos; regularmente espaçados; estratificação presente. Vasos visíveis a olho nu; solitários e múltiplos; arranjo difuso; pequenos; pouco abundantes; eventualmente obstruídos por substância branca; placa de perfuração simples.

Descrição microscópica: Vasos solitários em maioria e múltiplos de até 5; com distribuição difusa; pouco abundantes (3-5mm²); médios (132-315µm de

diâmetro); eventualmente obstruídos por substância branca; pontoações intervasculares médias, alternas, não guarnecidas; ovaladas; contorno poligonal; placa de perfuração simples; pontoações raiovasculares semelhantes às intervasculares em tamanho e formato. Fibras libriformes, de parede delgada, lume médio e pontoações simples. Parênquima axial paratraqueal aliforme de extensão linear, confluindo em trechos longos e finos ligando os vasos, eventualmente interrompidos; não estratificado. Raios homocelulares, formado exclusivamente por células procumbentes; raros unisseriados, bisseriados e trisseriados predominantes; pouco numerosos (4-8 por mm linear); baixos a médios (142-305µm de altura); estratificação presente e irregular. Canais intercelulares axiais presentes em disposição tangencial, formando uma série contínua de canais. Cristais ausentes. Tilos ausentes.

Principais utilizações: a madeira de caixeta amarela, por ser leve e de baixa resistência mecânica, é utilizada na caixotaria, saltos para calçados, brinquedos, palitos de fósforos, compensados e alguns instrumentos musicais de corda.

Por ser uma madeira ainda pouco explorada com relação à utilização para fins estruturais, não foi possível relatar informações detalhadas quanto às suas propriedades físicas e mecânicas.

4.1.2. Cedroarana (*Cedrelinga catenaeformis*)

O Cedroarana, também conhecido por Cedro-batata, Cedro-amargo, Cedro-amargoso, Cedro-branco, Cedro-cheiroso, Cedro-manso, Cedro-do-amazonas, Cedro-verdadeiro, Cedro-rosa e Cedro-vermelho, é encontrado no Brasil nos seguintes estados: Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Mato Grosso, Minas Gerais, Pará, Rondônia, Santa Catarina e São Paulo.

Apesar de seu ótimo potencial para uso estrutural, essa madeira é muito utilizada em portas, venezianas, caixilhos, painéis, molduras, guarnições e forros.

Apresenta-se com cerne e albarno distintos pela cor; o cerne é bege rosado, e a mesma possui superfície lustrosa, cheiro perceptível agradável e característico, possui gosto ligeiramente amargo, densidade baixa, grã direita e textura média a grossa, IPT (2017) (Figura 4.4; Figura 4.5).

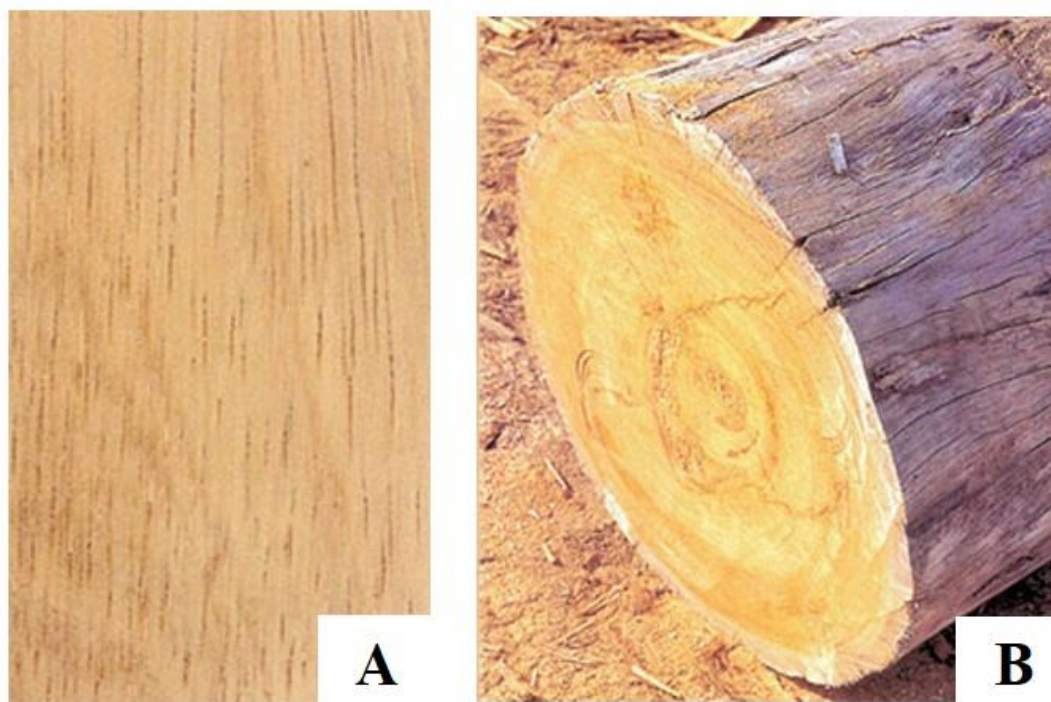


Figura 4.4: A) Prancha de Cedroarana; B) Tora de Cedroarana [Fonte: <http://www.aerasmadeiras.com.br/site/en/content/cedroarana>]



Figura 4.5: Corpos-de-prova de Cedroarana utilizados nos experimentos. [Fonte: De autoria própria]

Com relação ao ataque de organismos xilófagos (fungos e insetos), a madeira de cedro apresenta durabilidade moderada. IPT (1989a). Existe variação quanto a durabilidade do cerne, sendo um pouco resistentes ao ataque de cupins subterrâneos e cupins-de-madeira-seca. Apresenta baixa resistência ao ataque de xilófagos marinhos CHUDNOFF (1979); BERNI *et al.* (1979).

Estudos realizados por (SUDAM/IPT,1981), verificou que a durabilidade dessa madeira é inferior a 12 anos de serviço em contato com o solo. O cerne apresenta ainda baixa permeabilidade às soluções preservativas BERNI *et al.* (1979); CHUDNOFF (1979); IPT (1989a) apud IPT (2017).

Entretanto, a madeira de cedro é fácil de aplainar, serrar, lixar, furar, pregar, colar e toronar. Apresenta ainda bom acabamento, e em alguns casos, pode ocorrer exsudação de resina BERNI *et al.* (1979); CHUDNOFF (1979); JANKOWSKY,1990; IPT (1989b) apud IPT (2017).

Com relação a secagem ao ar, é rápida e com pouca ocorrência de defeitos. A secagem em estufa é fácil, não ocorrendo empenamentos e rachaduras, JANKOWSKY (1990) apud IPT (2017).

O cedro apresenta uma densidade aparente a 15% de umidade de 530 kg/m³ IPT (1989a) e uma densidade básica de 440 kg/m³ JANKOWSKY (1990) apud IPT (2017).

A resistência convencional na flexão, em madeira verde, gira em torno de 62,8 MPa e na Madeira a 15% de umidade, 81,2 MPa. O Módulo de elasticidade em Madeira verde é em média, 8336 MPa,

A resistência na compressão paralela às fibras, é em média, na Madeira verde, em torno de 28,0 MPa, e na Madeira a 15% de umidade, em torno de 39,1 MPa. O modulo de elasticidade na madeira verde é de 9630 MPa, de acordo com a NBR 6230/1985.

4.1.3. Cambará (*Erisma uncinatum*)

Os nomes mais comuns pelos quais o Cambará é conhecido são: Cambará, Cambará-rosa, Bruteiro, Jaboti, Jaboti-da-terra-firme, Cachimbo-de-Jabuti, Verga-de-jabuti, Quaruba-vermelha, Quarubarana, Quarubatinga. Esse tipo de madeira, por apresentar alta resistência a água, tem sido muito utilizada na confecção de telhados e coberturas de casas e prédios.

É encontrado principalmente nos seguintes estados brasileiros: Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia.

As principais características gerais são: cerne e albarno distintos pela cor, cerne castanho avermelhado, sem brilho, cheiro e gosto imperceptíveis, densidade baixa, grã direita a reversa e textura média a grossa, IPT (2017) (Figura 4.6; Figura 4.7).

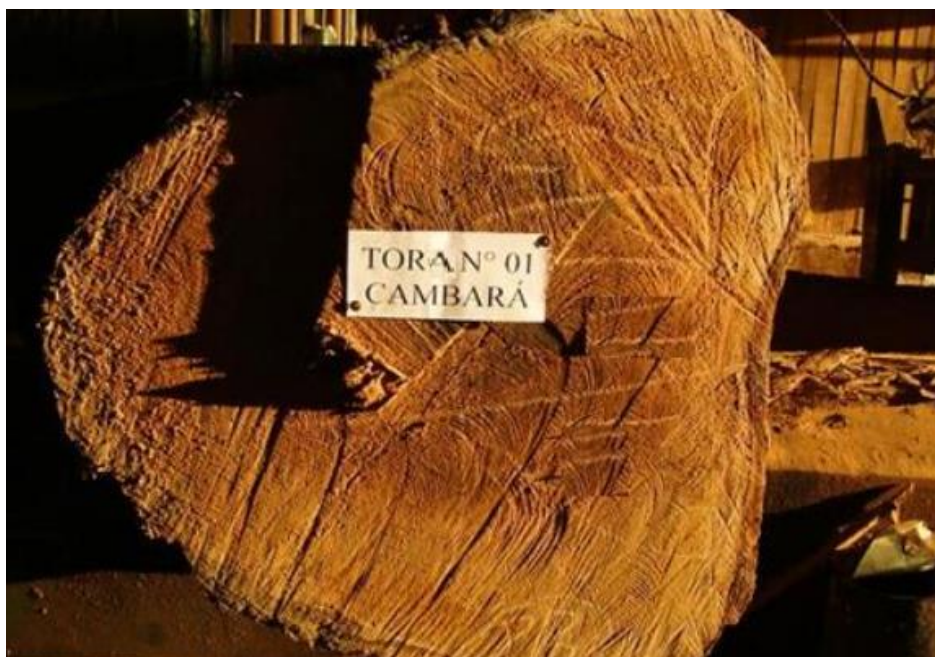


Figura 4.6: Tora de Cambará [Fonte: GARCIA, 2013]

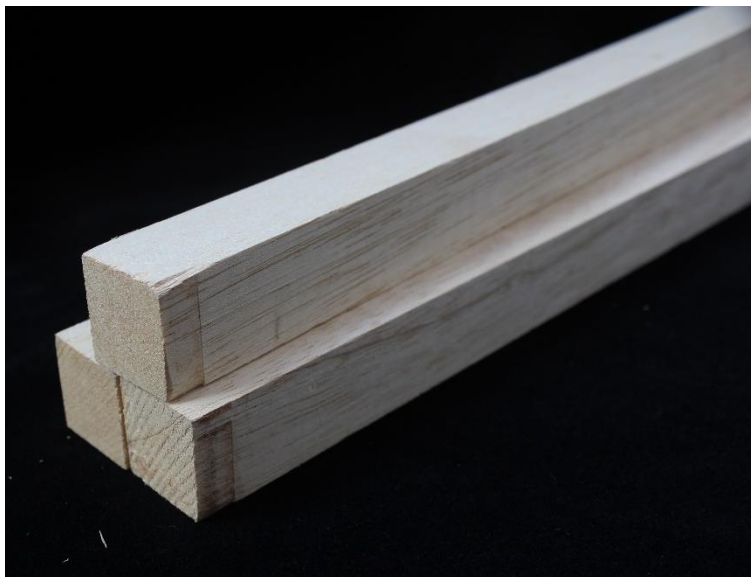


Figura 4.7: Corpos-de-prova de Cambará utilizados nos experimentos. [Fonte: De autoria própria]

Possui ainda parênquima axial visível a olho nu, em faixas largas e longas, tangenciando os vasos, e também em trechos curtos, raios visíveis apenas sob lente no topo e na face tangencial, finos e poucos; vasos visíveis a olho nu, médios a grandes e camadas de crescimento indistintas.

Com relação à durabilidade, apresenta uma baixa durabilidade ao ataque de organismos xilófagos. IPT (1989a). Em compensação, o cerne e o albarno são moderadamente fáceis de preservar (tratamento em processos sob pressão) de acordo com (IBDF,1981). Já a secagem ao ar é fácil e sem a ocorrência significativa de defeitos. A secagem em estufa também é rápida, mas em condições muito drásticas, podem ocorrer empenamentos, rachaduras e endurecimento superficial, JANKOWSKY (1990) apud IPT (2017).

Apresenta densidade aparente elevada de 590 kg/m^3 IPT (1989a). A densidade da madeira verde é 1110 kg/m^3 IBAMA (1997a) e básica é 480 kg/m^3 IBAMA (1997a).

Possui resistência convencional na flexão com madeira verde de $72,5 \text{ MPa}$ IPT (1989a). Para a madeira na umidade de 15%, $80,2 \text{ MPa}$ IPT (1989a).

Para o módulo de elasticidade, temos na madeira verde valores da ordem de 9365 MPa IPT (1989a), e para Madeira a 15%, 10395 MPa IBAMA (1997a), resultados obtidos de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 6230/85.

Os valores de resistência na compressão paralela para a madeira verde são da ordem de 33,7 MPa e para madeira a 15% de umidade, 42,2 MPa. Possui módulo de elasticidade, para madeira verde, em média, no valor de 12101 MPa, resultados obtidos de acordo com a Norma ABNT NBR 6230/1985.

4.1.4. Tatajuba (*Bagassa guianensis*)

Os nomes mais comuns pelos quais a Tatajuba é conhecida são: Amaparirana, Amarelão, Amarelo, Bagaceira, Cachaceiro e Garrote.

É encontrada principalmente nos seguintes estados brasileiros: Acre, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia.

As principais características gerais são: possuir cerne e alborno distintos pela cor, cerne amarelo-dourado, escurecendo para castanho-amarelado, brilho moderado, cheiro e gosto imperceptíveis, densidade média, moderadamente dura ao corte, grã reversa e textura média, IPT (2017). (Figura 4.8; Figura 4.9)

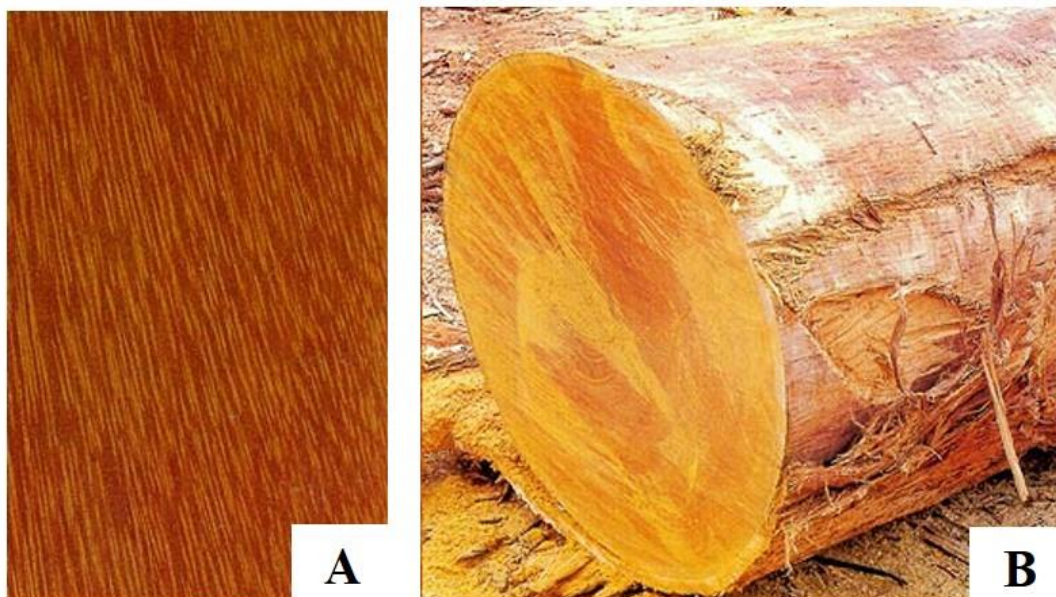


Figura 4.8: A) Prancha de Tatajuba; B) Tora de Tatajuba. [Fonte: <http://www.promapmadeiras.com.br/tatajuba.htm>]



Figura 4.9: Corpos-de-prova de Tatajuba utilizados nos experimentos. [Fonte: De autoria própria]

Possui ainda parênquima axial invisível mesmo sob lente, raios visíveis a olho nu no topo, sendo na face tangencial visível apenas sob lente. Vasos visíveis a olho nu, médios a grandes, muito poucos; porosidade difusa. As camadas de crescimento são ligeiramente distintas e individualizadas por zonas fibrosas tangenciais mais escuras, IPT (1983); IPT (1989a).

Apresenta o cerne resistente ao ataque de fungos de podridão-branca e parda. IBAMA (1997a) apud IPT (2017). A madeira de Tatajuba, em ensaios de campo realizados pela EMBRAPA, na Amazônia, demonstrou ter durabilidade natural superior a sete anos, IPT (2017). Considerada moderadamente resistente ao ataque de perfuradores marinhos e, em contato com o solo, pode apresentar vida útil superior a 25 anos.

Quanto à tratabilidade, a madeira de Tatajuba é difícil de ser tratada com soluções preservantes, mesmo em processo sob pressão. IBAMA (1997a) Apresenta baixa permeabilidade às soluções preservantes de creosoto (oleossolúvel), mesmo em processo sob pressão, IPT (2017).

Em relação à trabalhabilidade, a Madeira de tatajuba é fácil de ser trabalhada, com ferramentas manuais ou mecânicas, produzindo ótimo acabamento. Um ponto a ser observado é que não aceita pregos com facilidade, segundo JANKOWSKY (1990) apud IPT (2017). Recomenda-se a furação prévia à colocação de pregos.

A secagem ao ar é lenta e sem a ocorrência de defeitos. Na secagem em estufa apresenta leve tendência ao empenamento, torcimento e encanoamento. Recomenda-se controle cuidadoso do processo para evitar defeitos, JANKOWSKY (1990) apud IPT (2017).

A Densidade Aparente a 15% de umidade é 820 kg/m^3 e a Densidade Básica 683 kg/m^3 .

Possui resistência convencional na flexão para madeira verde da ordem de $100,0 \text{ MPa}$ e para a madeira a 15% de umidade, $138,2 \text{ MPa}$. O Módulo de elasticidade para a madeira verde é em média 15857 MPa , resultados obtidos de acordo com a Norma ABNT NBR 6230/85.

A resistência à compressão paralela às fibras para a madeira verde e da ordem de $54,4 \text{ MPa}$ e para a madeira a 15% de umidade, $79,7 \text{ MPa}$. O

Módulo de elasticidade para a Madeira verde é em média 17304 MPa, IPT (2017).

4.1.5. Roxinho (*Peltogyne spp.*)

Os nomes mais comuns pelos quais o Roxinho é conhecido são: Amarante, Coataquiçaua, Pau-roxo-da-terra-firme, Pau-roxo-da-várzea, Roxinho, Roxinho-pororoca, Violeta.

É encontrada principalmente nos seguintes estados e regiões brasileiras: Mata Atlântica, Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Maranhão, Mato Grosso, Minas Gerais, Pará, Rondônia.

As principais características gerais são: cerne e alburno distintos pela cor, cerne roxo podendo escurecer com o tempo, alburno bege claro, brilho moderado a acentuado, cheiro e gosto imperceptíveis, densidade alta, dura ao corte, grã direita a irregular e textura fina a média, IPT (2017) (Figura 4.10; Figura 4.11).

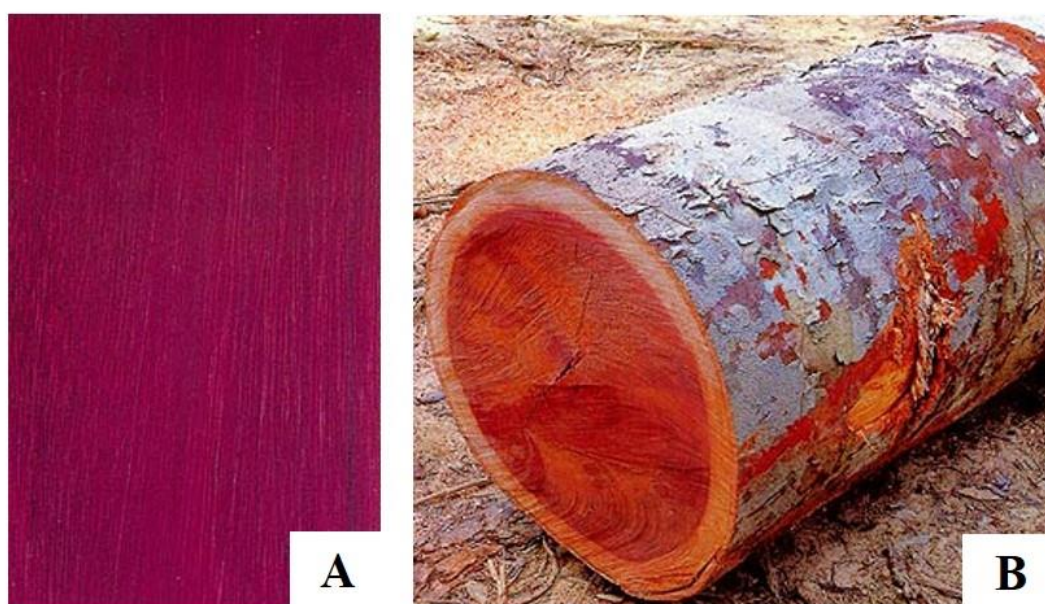


Figura 4.10: A) Prancha de Roxinho; B) Tora de Roxinho [Fonte: <http://www.promapmadeiras.com.br/pauroxo.htm>]



Figura 4.11: Corpos-de-prova de Roxinho utilizados nos experimentos. [Fonte: De autoria própria]

Possui ainda parênquima axial visível a olho nu, eventualmente visível apenas sob lente, paratraqueal aliforme de extensão linear, confluyente, unindo alguns vasos e podendo formar faixas tangenciais curtas, parênquima marginal associado. Os raios são visíveis apenas sob lente no topo e na face tangencial, finos, muito poucos a poucos. Possui vasos visíveis a olho nu e eventualmente visíveis apenas sob lente, pequenos a médios, poucos a numerosos, porosidade difusa, solitários, geminados e raros, em múltiplos de três, vazios ou obstruídos por óleo-resina e em algumas espécies com substância branca. As camadas de crescimento são distintas, individualizadas por zonas fibrosas tangenciais mais escuras e por parênquima marginal, IPT (2017).

Quanto à durabilidade, a madeira de Pau-roxo é considerada de alta resistência ao ataque de organismos xilófagos (fungos apodrecedores e cupins-de-Madeira-seca). Apresenta, porém, baixa resistência a organismos xilófagos marinhos BERNI *et al.* (1979); IBAMA (1997a); IPT (1989a); JESUS *et al.* (1998) apud IPT (2017).

Quanto à tratabilidade, a madeira Roxinho apresenta baixa permeabilidade a soluções preservantes IPT (1989a); BERNI *et al.* (1979) apud

IPT (2017), sendo o cerne impermeável ao tratamento com creosoto e CCA, mesmo em processo sob pressão, IPT (2017).

Em relação à trabalhabilidade, a madeira Roxinho é moderadamente difícil de ser trabalhada manualmente ou com máquinas, devido à dureza e exsudação de resina quando aquecida pelas ferramentas. É fácil de colar e apresenta bom acabamento, de acordo com JANKOWSKY (1990), apud IPT (2017). A trabalhabilidade é regular na plaina e excelente na lixa, torno e broca e apresenta um polimento lustroso. Recomenda-se a perfuração prévia à colocação de pregos.

A secagem ao ar livre é de fácil a moderada, com pequena incidência de rachaduras e empenamentos. A secagem em estufa é rápida e com poucos defeitos, JANKOWSKY (1990) apud IPT (2017).

A Densidade Aparente a 15% de umidade é 890 kg/m^3 e a Densidade Básica 740 kg/m^3 .

Possui módulo de resistência à flexão para madeira verde da ordem de $144,8 \text{ MPa}$ e para a madeira a 15% de umidade, $184,5 \text{ MPa}$. O Módulo de elasticidade para a Madeira verde é em média 17721 MPa , resultados obtidos de acordo com a Norma ABNT NBR 6230/85.

A resistência à compressão paralela às fibras para a madeira verde e da ordem de $64,0 \text{ MPa}$ e para a madeira a 15% de umidade, $84,0 \text{ MPa}$. O módulo de elasticidade para a madeira verde é em média 20565 MPa , IPT (2017).

4.2. Fadiga

De acordo com SURESH (1991), uma definição para fadiga pode ser encontrada no documento *General Principles for Fatigue Testing of Materials* (Princípios Gerais para Verificação da Fadiga dos Materiais) publicado, em

1964, em Genebra. Nele, a fadiga é admitida como “um termo que designa as mudanças das propriedades que podem ocorrer em um ‘material metálico’ devido às repetidas aplicações de cargas ou deformações, apesar de usualmente tal termo aplicar-se especialmente àquelas mudanças que levam às fraturas ou ruptura”. Certamente tal definição aplica-se também à fadiga de materiais não-metálicos.

Outra definição para o fenômeno fadiga pode ser encontrada na ASTM E1823 (2007), ASTM E1150 (1987) e ASTM D143-52 (1981), que o descreve como sendo o processo de mudança estrutural permanente, localizado e progressivo que ocorre em um material sujeito a variações de tensões e deformações no mesmo ponto ou pontos e que pode culminar em fissuras ou rupturas completas após um número suficiente de variações de tensões.

Alguns trabalhos científicos na área citam que além disso, este fenômeno é a causa de 90% de falhas mecânicas e por conta disso seu estudo é de grande importância GUIMARÃES *et al.* (2012).

A fadiga ainda pode ser definida como sendo o conjunto de fenômenos de ocorrência possível em um determinado material quando exposto a carregamentos repetidos. De acordo com CLORIUS & PEDERSEN (1996) e CLORIUS (2002), em um contexto mais próximo de ruptura do material, o termo fadiga pode ser entendido como a ruptura que ocorre como um resultado de ações de carga repetida em nível inferior à resistência alcançada por solicitação estática do material.

Semelhante definição foi dada por RODRIGUES Jr (1997) *apud* MACÊDO (1999), em que a fadiga é descrita como sendo o processo progressivo de dano que evolui até a ruptura, produzido por carregamentos repetidos que induzem tensões de intensidades variáveis ao longo do tempo, onde a tensão máxima tem valor menor que a resistência do componente estrutural em questão.

4.3. Documentos Normativos Internacionais

Alguns documentos normativos internacionais de grande relevância podem ser citados no que diz respeito ao tratamento dado para a avaliação do fenômeno fadiga associado a elementos estruturais de madeira, tais como:

- ASTM D143 (ASTM, 2000): apresenta informações referentes aos ensaios de flexão, fornecendo subsídios a respeito do tamanho dos corpos-de-prova (25mm x 25mm x 410mm), do controle de densidade (em torno de 12%) e ainda da temperatura em que as amostras devem estar ($20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$). A partir do referido documento normativo, determinou-se como seriam realizados os ensaios base do presente trabalho.
- ASTM E1823 (ASTM, 2007): a fadiga é definida como o processo de mudança estrutural permanente, localizada e progressiva que ocorre em um material sujeito a variações de tensões e deformações flutuantes no mesmo ponto; ou pontos e que podem culminar em fissuras ou rupturas completas após um número suficiente de variações de tensões e deformações cíclicas, conforme citado anteriormente.
- EUROCODE 5 (2013): trata-se de um documento normativo de altíssimo nível que apenas faz menção a avaliações empíricas a respeito da fadiga, não apresentando abordagem conclusiva alguma sobre o respectivo tema.

Como a fadiga e suas decorrências no cálculo estrutural não são muito tratadas em termos de pesquisas, até mesmo os documentos normativos mais relevantes para se fundamentar os projetos e a construção das estruturas de madeira, acabam sendo omissos no assunto. Cite-se, por exemplo, o EUROCODE 5 (1993), conforme descrito anteriormente, documento normativo de altíssimo nível que não apresenta ainda abordagem alguma sobre o respectivo tema.

4.4. ABNT NBR 7190/1997 – Projeto de Estruturas de Madeira

Semelhante circunstância, como a citada acima, se verifica com outras normas sobre o assunto, e dentre elas cabe aqui destacar a NBR 7190/1997, da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Conforme já mencionado, a NBR 7190/1997 apresenta informações relacionadas às propriedades físicas e mecânicas de algumas espécies de madeira, assim como contém informações sobre ensaios laboratoriais, contudo, não traz informações a respeito da caracterização da madeira na fadiga.

Dessa forma, nota-se que a madeira na construção civil apresenta grande importância, contudo como já mostrado acima há poucos estudos no Brasil relacionados a caracterização da madeira em fadiga. Isso é evidenciado pela pouca produção de literatura brasileira em comparação com outros países neste assunto. Além disso, necessita-se de uma norma mais completa que englobe maiores informações a respeito de como as propriedades da madeira variam quando sujeita a carregamentos cíclicos, como já é mostrado, por exemplo, na norma americana ASTM.

4.5. Pesquisas associadas à fadiga na madeira

Diversos pesquisadores vêm desenvolvendo estudos na área de fadiga, tanto no âmbito nacional, quanto no âmbito internacional. Porém, tais estudos têm sido realizados na área de elementos constituídos de madeira; as pesquisas têm focado a área de compósitos à base de madeira, ou ainda a área de ligações em estruturas de madeira.

Internacionalmente, podem ser citados pesquisadores como LEWIS & ASCE (1960), que apresentaram um dos primeiros trabalhos sobre fadiga aplicado ao material madeira. Neste trabalho, é apresentada curva para relacionar a tensão atuante *versus* o número de ciclos (curva σ -N) para quantificar o fenômeno.

Outro trabalho a citar sobre o tema é o de HANSEN (1991), *apud* ESPINOSA (2001), no qual é avaliada a fadiga em peças de madeira laminada colada. Ficou muito claro, neste trabalho, que é essencial levar em consideração a frequência nos estudos de fadiga na madeira e em seus produtos derivados. O autor afirma, entretanto, que ensaios para avaliação da fadiga em madeira, realizados empregando-se frequências muito elevadas ($f > 10\text{Hz}$, por exemplo), devem ser evitados, pois o aumento na temperatura do material, nestas circunstâncias, conduziria a um decréscimo no teor de umidade, o poderia elevar os valores de resistência quando o material estivesse sendo solicitado a carregamentos cíclicos.

SMITH *et al.* (2003) analisaram a fadiga da madeira em alguns painéis derivados da madeira com base em teorias da fratura de materiais. Além disso, destacaram o que admitiram ser os parâmetros físicos mais relevantes a influenciar o fenômeno e descreveram mecanismos de fadiga passíveis de ocorrer na madeira maciça sob diferentes solicitações. Nessa obra, não se constitui foco dos autores a quantificação da influência da fadiga no dimensionamento de elementos estruturais.

Dentre os trabalhos a respeito da fadiga em madeira e produtos derivados, desenvolvidos no Brasil, são aqui destacados os de MACÊDO (2000) e ESPINOSA (2001).

MACÊDO (2000) estudou a fadiga em emendas dentadas em peças de Madeira Laminada Colada (MLC), observando tratar-se de um estado limite último de expressivo significado no dimensionamento de elementos estruturais de MLC. ESPINOSA (2001) desenvolveu um interessante modelo estatístico para ser aplicado na avaliação da fadiga em emendas dentadas de madeira, tendo também como foco principal os elementos estruturais de MLC. As principais conclusões destes autores dizem respeito à necessidade de serem consideradas, concomitantemente, pelo menos duas variáveis na avaliação do fenômeno: a intensidade máxima das tensões atuantes e a frequência com que as mesmas atuam para se determinar o número de ciclos que leva à ocorrência da ruptura, certamente em tensões inferiores à resistência obtida em ensaios estáticos.

Dadas as dificuldades que cercam a experimentação para se determinarem parâmetros associados à fadiga, ESPINOSA *et al.* (2006) sugeriram o emprego de técnicas de simulação numérica com o intuito de avaliar a adequação de alguns modelos matemáticos para descrever o fenômeno da fadiga em madeira. Todavia, na ausência de outras informações na literatura técnica brasileira, partiram de resultados obtidos por MACEDO (2000) para a madeira laminada colada, conforme já apontado nesta revisão.

Mesmo com a constatação, nos registros bibliográficos, da necessidade de se associar a frequência das ações com o nível de tensão relativamente à resistência esperada em ensaios estáticos, não foram encontrados, para a madeira, trabalhos que tratassem o assunto com base na citada abordagem, deixando uma grande lacuna no assunto.

Existem também trabalhos internacionais desenvolvidos na área de elementos estruturais executados com madeira serrada, porém muito restritos

e específicos para madeiras de baixa densidade, mais especificamente *Pinus* sp, madeiras essas encontradas em maior abundância em países de climas mais frios, como por exemplo o trabalho de CLORIUS (2002). Desenvolvido junto à Technical University of Denmark, o autor propõe a criação de um modelo matemático para avaliar os efeitos da fadiga em elementos estruturais de madeira submetidos à compressão paralela às fibras da madeira. Foi experimentada somente uma espécie de *Pinus*, mais especificamente a *Picea abies*, conhecido popularmente pelo nome de *Pinus* da Noruega ou *Espruce* da Noruega.

YANG *et al.* (2010) observaram o comportamento da fadiga na flexão das amostras de chapas de partículas de madeira com polipropileno (PP). A investigação foi feita sob uma abordagem probabilística para avaliar a confiabilidade na fadiga. Uma análise não-dimensional foi adotada para estabelecer uma equação de predição para a vida dos compósitos em fadiga. Uma função de distribuição de Weibull de dois parâmetros foi usada para analisar estatisticamente os resultados do teste de durabilidade na fadiga.

Mostra-se que o modelo de fadiga não-dimensional e o modelo de distribuição de probabilidade de dois parâmetros podem ser usados com sucesso para avaliação de confiabilidade e estimativa de vida de compósitos plásticos de madeira.

OGAWA *et al.* (2017) observaram o comportamento da fadiga do Cipreste Japonês (*Chamaecyparis obtura*) sob repetidos testes de carga de compressão perpendicular às fibras de crescimento. Os autores realizaram estes testes em pequenos corpos-de-prova de madeira sob a forma de uma onda triangular trifásica de frequência de 1,0Hz e realizaram 864000 ciclos de carregamento repetidos. A variação da rigidez e a deformação máxima (STRmax) com carregamentos cíclicos foram investigadas com base na relação tensão-deformação. Houve uma redução no valor da rigidez com o aumento do valor da carga em níveis de tensão de aproximadamente 90% do valor máximo. A rigidez teve mudanças significativas mesmo sob condições de

baixos níveis de tensão em carga cíclica. O STRmax (deformação máxima) variou exponencialmente à medida que o número de ciclos de carregamento aumentou. Além disso, o limite de fadiga foi previsto através da análise da mudança de STRmax com carregamento cíclico. De acordo com a análise dos autores, o limite de fadiga foi atingido em aproximadamente 60% do valor estimado em testes padronizados sob o efeito de carregamento estático.

BHKARI *et al.* (2016) estudaram o comportamento pós-fadiga de dormentes de madeira e dormentes de madeira de substituição utilizando-se madeira laminada colada. Realizaram testes de fadiga na flexão para identificar a resistência à fadiga das peças de madeira, investigaram seu comportamento e determinaram a resistência residual dessas travessas de madeira depois da aplicação da carga cíclica. Uma série de testes foram realizados para determinar o desempenho da fadiga de acordo com o Manual de Engenharia de Estradas de Ferro (AREMA). Os autores mostraram que os dormentes em MLC cumprem o requisito estabelecido pelo Manual AREMA e o desempenho e o comportamento do efeito fadiga são comparáveis aos dormentes de madeira sólida.

Outro trabalho a citar sobre o tema é o de Li *et al.* (2016) que também observaram o comportamento na flexão estática sob fadiga de painéis compostos (ESCP). As curvas σ versus número de ciclos (σ -N) foram registradas sob os diferentes níveis de tensão. O modo de falha primária nos testes de fadiga foi observado na zona de cisalhamento (desprendimento de epóxi), que foi diferente da falha de topo na zona de flexão pura para o teste de flexão estática. Para o teste de flexão residual (RB), ocorreu uma falha de desmoldagem epóxi entre a zona de flexão pura e a zona de cisalhamento.

A propagação de fissuras ou danos nos painéis submetidos ao teste de fadiga podem ser descritos como um processo de danos de três estágios de primeira porção não linear, seguido de acumulação de dano linear e, por último, de dano acelerado não linear. A redução da rigidez na flexão no nível de carga mais elevado teve uma degradação mais rápida sob fadiga.

MOILANEN *et al.* (2017) avaliaram a variação da taxa de deformação de elementos de madeira frente a variação de temperatura incluindo o efeito fadiga no comportamento à compressão radial na espécie Norway Spruce.

O trabalho mais relevante na área encontrado no Brasil é o de GUIMARÃES *et al.* (2012), o qual consistiu em avaliar o efeito do carregamento cíclico sobre as propriedades mecânicas na flexão estática e na constante elásticas em madeiras de 4 espécies florestais: *Dipteryx odorata*, *Pouteria guianensis*, *Cedrelinga catenaeformis* e *Tectona grandis*, comparando com a avaliação dessas obtidas pelo uso de ultrassom devido à ausência de uma normalização brasileira na área, os ensaios realizados tiveram como base as orientações obtidas junto à norma D143-94 (ASTM, 2000) tendo-se mostrado adequados para avaliação do problema proposto.

Para o desenvolvimento dos estudos sob o efeito do carregamento cíclico, foram utilizadas as seguintes condições: aplicação de carregamentos de 40.000 ciclos e 100.000 ciclos, a uma frequência de 0,4Hz e carga em flexão a 40% do módulo de ruptura (F_M).

Observou-se que não houve redução das propriedades de resistência em flexão estática, devido ao baixo valor adotado de frequência, número de ciclos e carga aplicada e, dessa maneira, também não foi possível conseguir observar-se um efeito pronunciado efetivo de fadiga nas espécies estudadas.

Assim, observa-se que a lacuna referente à fadiga continua aberta, acabando-se por refletir, conforme já mencionado, nos documentos normativos, fazendo com que não seja possível se levar em consideração, de modo adequado, a influência da repetição dos carregamentos nas propriedades físicas e mecânicas dos elementos estruturais de madeira, o que, ao longo da sua vida útil, tem efeito significativo no seu desempenho e durabilidade, em particular no caso de pontes e passarelas de madeira.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados ensaios de fadiga e de flexão estática, executados nas dependências do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A seguir estão apresentadas a Máquina de Ensaio Universal AMSLER e a Máquina de Ensaio de Fadiga, utilizadas na realização dos experimentos (Figura 5.1; Figura 5.2)



Figura 5.1: Máquina de Ensaio Universal AMSLER. [Fonte: Macêdo 2016]



Figura 5.2: Máquina de Ensaios de Fadiga. [Fonte: De autoria própria]

A construção das curvas dos valores do módulo de elasticidade na flexão (E_m) [Equação 5.1 – adaptada da ABNT NBR 7190/1997] e da tensão de flexão (σ_m) [Equação 5.2 - adaptada da ABNT NBR 7190/1997] foram obtidas para dois níveis de deslocamentos estipulados, sendo $L/200$ e $L/100$. Cabe aqui destacar que a medida $L/200$ é estabelecida pela norma Brasileira ABNT NBR 7190/1997 na verificação do estado limite de utilização, e que foi também adotada a medida de deslocamento $L/100$:

$$E_m = \frac{F \cdot L^3}{4 \cdot \delta \cdot b \cdot h^3} \quad (5.1)$$

$$\sigma_m = \frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (5.2)$$

Legenda:

- b** – Largura do corpo de prova
- h** – Altura do corpo de prova
- L** – Comprimento do corpo de prova
- F** – Força na flexão
- δ** - Deslocamento

Das Equações 5.1 e 5.2, \underline{F} denota o valor da força obtida no ensaio de flexão para os níveis de deslocamento $L/200$ e $L/100$, $\underline{\delta}$ é o deslocamento ($L/200$ ou $L/100$), \underline{L} é comprimento útil do corpo-de-prova (distância entre os apoios) e \underline{b} e \underline{h} são a base e a altura da seção transversal, respectivamente.

A construção das curvas do módulo de elasticidade pelo número de ciclos [$E \times N_c$] e da tensão de serviço pelo número de ciclos [$\sigma_m \times N_c$] foi realizada a partir dos seguintes números de ciclos: de 450, 4500, e 45000;

Os deslocamentos na máquina de fadiga foram limitados, conforme dito anteriormente, em duas medidas: $L/200$ e $L/100$, e foram utilizadas duas frequências distintas: 0,5 e 1,0Hz;

A escolha do número de ciclos e das frequências que foram utilizados nesta tese se deu em função do único trabalho realizado nessa área no Brasil por GUIMARÃES *et al.* (2012) no qual os autores sugerem que diversos ciclos sejam utilizados e também frequências superiores a 0,4Hz, sendo este um trabalho da área florestal no qual o objeto de estudo foi a avaliação de um método não destrutivo de análise de propriedades de madeiras, no caso o ultrassom, não tendo como objetivo principal o estudo da fadiga em si nas madeiras visando o uso para fins estruturais.

Cabe aqui destacar que o efeito de drapejamento não foi um fator relevante de observação, uma vez que as normas sugerem que o mesmo só ocorre em elementos de madeira para frequências superiores a 2,0Hz.

Passado o primeiro dos seis níveis do ciclo de fadiga para um determinado valor de deslocamento ($L/200$ ou $L/100$), o corpo-de-prova foi levado para a máquina de ensaios universal para o teste de flexão estática a fim de se fazer a estimativa de E_M e σ_m , e em seguida o mesmo foi levado novamente para a máquina de fadiga para exposição ao próximo nível de ciclos de fadiga.

Cabe aqui ressaltar que os corpos-de-prova (Figura 5.1) foram testados na flexão estática antes de iniciarem os ciclos de fadiga, o que possibilitou acompanhar a evolução das propriedades em função do número de ciclos.

Os corpos-de-prova utilizados para cada tipo de ensaio foram confeccionados de acordo com as recomendações da NBR 7190/1997 e ajustados para cada teste: resistência na compressão paralela às fibras - 50mm x 50mm x 150mm; fadiga - 20mm x 20mm x 280mm; densidade aparente - 20mm x 30mm x 50mm.

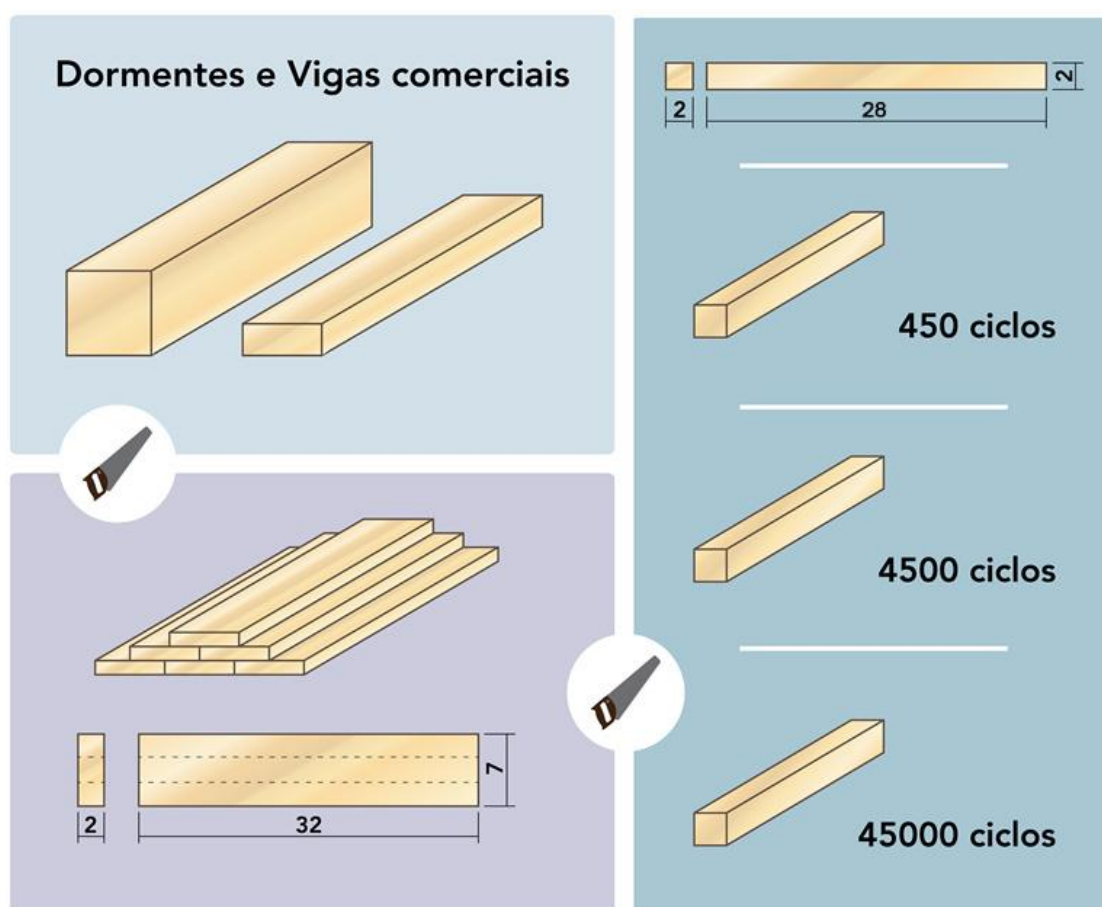


Figura 5.3: Esquema da retirada dos corpos-de-prova das espécies estudadas.

Além dos ensaios de fadiga, foram realizados também ensaios de compressão paralela (em seis corpos-de-prova) para a determinação da resistência na compressão paralela às fibras (f_{c0}), o que permitiu, com o uso da Equação 5.3, enquadrar a espécie de madeira do grupo das Folhosas na sua respectiva Classe de Resistência.

$$f_{w,k} = \left(2 \cdot \frac{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{(n/2)-1}}{(n/2) - 1} - f_{n/2} \right) \cdot 1,1 \quad (5.3)$$

Da Equação 5.3, os resultados foram colocados em ordem crescente ($f_1 \leq f_2 \leq f_3 \dots \leq f_n$), desprezando-se o maior valor da resistência se o número de corpos-de-prova fosse ímpar, não se tomando para f_{wk} valor de resistência inferior a f_1 e nem inferior a 0,70 do valor médio da resistência, conforme preconizado pela NBR 7190/1997.

6. ANÁLISE ESTATÍSTICA

As espécies foram escolhidas com base nas classes de resistência (C20, C30, C40, C50, C60) para o grupo das folhosas (dicotiledôneas), em que a categorização da madeira é feita em função do valor característico da resistência na compressão paralela às fibras (Equação 6.1), assim como define a norma Brasileira ABNT NBR 7190/1997.

$$f_{c0,k} = \left(2 \cdot \frac{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{(n/2)-1}}{(n/2) - 1} - f_{n/2} \right) \cdot 1,1 \quad (6.1)$$

Da Equação 6.1, os resultados devem ser colocados em ordem crescente ($f_1 \leq f_2 \leq f_3 \dots \leq f_n$), sendo desprezado o maior valor da resistência se o número de corpos-de-prova é ímpar e não se tomando para $f_{c0,k}$ valor de resistência inferior a f_1 e nem inferior a 0,70 do valor médio da resistência. Por cada espécie de madeira foram fabricados 18 corpos-de-prova (dimensões 50mm x 50mm x 150mm) para a determinação da resistência na compressão paralela às fibras. A Tabela 6.1 apresenta os resultados dos valores característicos encontrados para cada espécie de madeira e o respectivo enquadramento nas classes de resistência.

Tabela 6.1: Valores característicos da resistência na compressão paralela às fibras.

Espécie	$f_{c0,k}$ (MPa)	Classe de Resistência - C
Caixeta	22,96	C-20
Cedroarana	34,21	C-30
Cambará	48,63	C-40
Tatajuba	56,38	C-50
Roxinho	63,74	C-60

Como comentado anteriormente, os fatores investigados na determinação dos valores do módulo de elasticidade (E_M) e da tensão de serviço (f_M) na flexão estática para cada espécie de madeira foram o número de ciclos na fadiga [N_{ci}] (0, 450, 4500, 45000) e a frequência de excitação [Fr]

(0,5, 1,0Hz). As combinações dos níveis dos dois fatores resultaram em um planejamento com seis tratamentos distintos, expressos na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Tratamentos experimentais delineados

Tratamento	Nci	Fr
0 (Referência)	0	0
1	450	0,5
2	4500	0,5
3	45000	0,5
4	450	1,0
5	4500	1,0
6	45000	1,0

Foram preparados três corpos-de-prova (dimensões 20mm × 20mm × 280mm) para os testes de fadiga e posterior determinação do E_M e da f_M na flexão estática para cada tratamento e para espécie de madeira. Cada seis corpos-de-prova foram retirados de uma mesma região de viga de madeira, e cada um foi destinado a um dos seis tratamentos experimentais delineados, permitindo reduzir os efeitos da variabilidade natural da madeira na determinação das propriedades mecânicas. A densidade aparente a 12% de umidade ($\rho_{12\%}$) também foi obtida para cada espécie de madeira, sendo fabricados dezoito corpos-de-prova (dimensões 20mm × 30mm × 50mm - ABNT NBR 7190/1997) por tipo de madeira, o que resultou em 270 determinações experimentais.

Para investigar a influência dos fatores Nci e Fr nos valores do E_M e da f_M por espécie de madeira foi-se utilizado o teste de comparações múltiplas de Tukey, ao nível de 5% de significância. No teste de Tukey, “A” denota o grupo de maior valor médio, “B” é o grupo de maior valor médio, e assim sucessivamente, e letras iguais para grupos diferentes implica em médias estatisticamente diferentes.

Entendido o efeito dos dois fatores nas duas propriedades avaliadas para cada espécie de madeira, modelos de regressão multivariáveis (Equação

6.2) foram utilizados na estimativa de tais propriedades em função das variáveis livres Nci e Fr.

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot Nci + \alpha_2 \cdot Fr + \alpha_3 \cdot Nci \cdot Fr + \alpha_4 \cdot Nci^2 + \alpha_5 \cdot Fr^2 + \varepsilon \quad (6.2)$$

Na Equação 6.2, Y denota a propriedade estimada (E_M ou f_M), α_i são os coeficientes ajustados pelo método dos mínimos quadrados e ε consiste no erro aleatório obtido do ajuste, sendo a qualidade dos modelos julgada por meio do coeficiente de determinação R^2 .

Depois de avaliados os modelos considerando cada espécie de madeira isoladamente, na sequência foram gerados modelos de regressão na estimativa dos valores do E_M e da f_M em função do Nci, da Fr e também da densidade aparente (Equação 6.3), permitindo assim maior generalização dos resultados obtidos.

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot Nci + \alpha_2 \cdot Fr + \alpha_3 \cdot \rho_{12\%} + \alpha_4 \cdot Nci \cdot Fr + \alpha_5 \cdot Nci \cdot \rho_{12\%} + \alpha_6 \cdot Fr \cdot \rho_{12\%} + \alpha_7 \cdot Nci \cdot Fr \cdot \rho_{12\%} + \alpha_8 \cdot Nci^2 + \alpha_9 \cdot Fr^2 + \alpha_{10} \cdot \rho_{12\%}^2 + \varepsilon \quad (6.3)$$

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1. Madeira de Caixeta

A Figura 7.1 ilustra a variação dos valores médios, intervalos dos valores dos coeficientes de variação (CV - %) e os intervalos de confiança (ao nível de 95% de confiança - estimativa da variação da média na população) do módulo de elasticidade (E_M) e da tensão na flexão (f_M) para a madeira de Caixeta em função do número de ciclos e da frequência na fadiga.

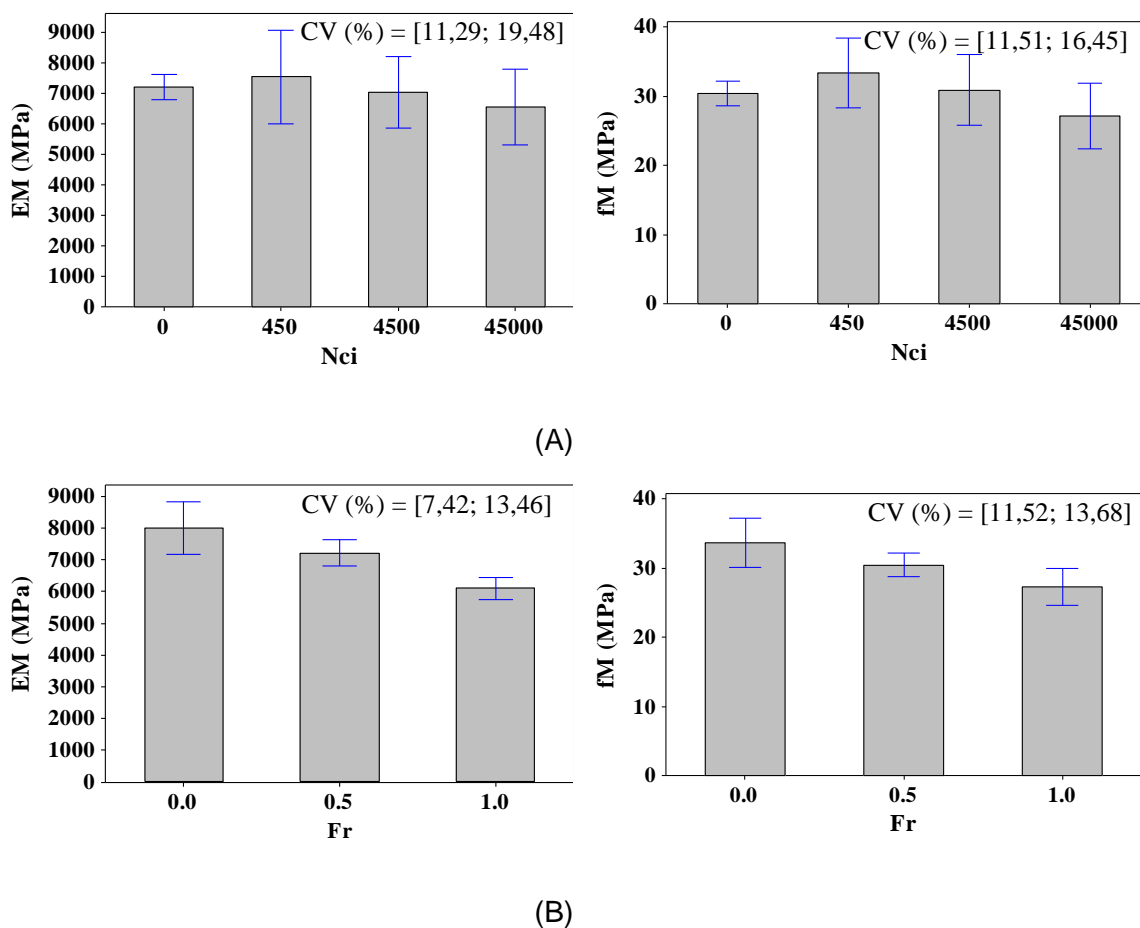


Figura 7.1: Variação das propriedades mecânicas da madeira de Caixeta em função do número de ciclos [N_{ci}] (A) e da frequência [Fr] (B) de excitação na fadiga.

A Tabela 7.1 apresenta os resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas em função dos dois fatores avaliados (Nci, Fr) para a madeira de Caixeta.

O teste de Tukey evidencia que conforme o número de ciclos é aumentado, os valores de E_M e f_M passam a ter variações significativas em relação àqueles obtidos pelos testes estáticos, o que era um comportamento esperado e condizente com o fenômeno físico estudado. O mesmo pode ser observado com relação ao aumento da frequência.

Tabela 7.1: Resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas da madeira de Caixeta. Letras diferentes indicam diferença estatística significante.

Prop.	Número de Ciclos [Nci]				Frequências [Fr] - Hz		
	0	450	4500	45000	0	0,5	1,0
E_M	A	A	A	B	A	A	B
f_M	A	A	B	B	A	A	B

Da Tabela 7.1, os resultados do teste de Tukey evidenciam que para um número de ciclos de 0, 450 e 4500 ciclos (em alguns casos), e ainda, para frequências de 0 e 0,5Hz (também em alguns casos), não houve diferença significativa nos valores das variáveis estudadas (mostrado pela letra *A*) resultando em valores equivalentes do módulo de elasticidade e da tensão na flexão. Entretanto, para os casos de 45000 ciclos e frequência de 1,0Hz, diferenças estatísticas significativas foram observadas (representado pela letra *B*) e em alguns casos pela letra *C*, denotando reduções significativas ainda maiores de ambas propriedades.

Os modelos de regressão multivariáveis e os respectivos coeficientes de determinação para a estimativa dos valores do módulo de elasticidade e da tensão na flexão estática para a madeira de Caixeta são expressos pelas Equações 7.1 e 7.2, respectivamente.

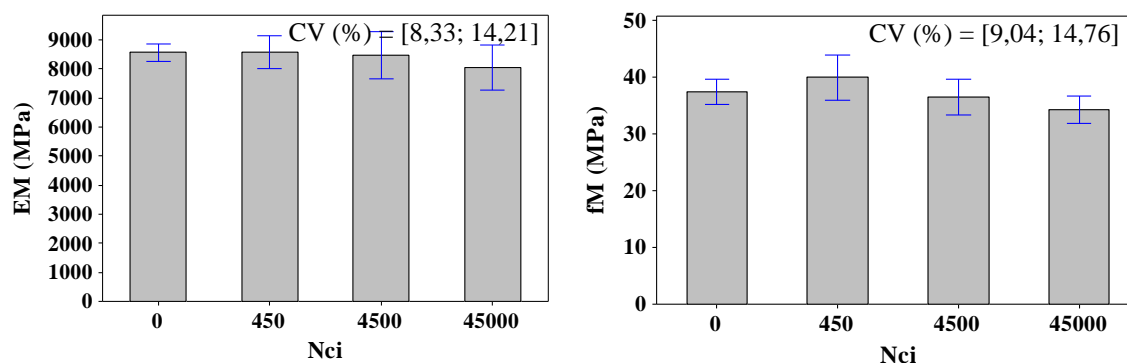
$$E_M \text{ (MPa)} = 7214 - 0,118 \cdot N_{ci} - 4060 \cdot Fr - 0,0245 \cdot N_{ci} \cdot Fr + 0,000003 \cdot N_{ci}^2 + 5507 \cdot Fr^2 \text{ [R}^2=70,34\%] \quad (7.1)$$

$$f_M \text{ (MPa)} = 30,4 - 0,000553 \cdot N_{ci} - 9,54 \cdot Fr - 0,000157 \cdot N_{ci} \cdot Fr + 0,000000 \cdot N_{ci}^2 + 16,6 \cdot Fr^2 \text{ [R}^2=65,22\%] \quad (7.2)$$

Os valores dos coeficientes de determinação obtidos na estimativa dos valores do E_M e da f_M indicam imprecisão na previsão de 29,66 e 34,78%, respectivamente, estimativas essas que podem ser melhoradas com a consideração do conjunto envolvendo as cinco espécies de madeira adotadas nessa pesquisa. Pelas Equações 7.1 e 7.2 ficam evidentes que aumentos nos valores dos fatores individuais N_{ci} e Fr proporcionam reduções nos valores de ambas as propriedades mecânicas, assim como constatado pelo teste de Tukey.

7.2. Madeira de Cedroarana

A Figura 7.2 ilustra a variação dos valores médios, intervalos dos valores dos coeficientes de variação (CV - %) e os intervalos de confiança (ao nível de 95% de confiança) do módulo de elasticidade (E_M) e da tensão na flexão (f_M) para a madeira de Cedroarana em função do número de ciclos e da frequência na fadiga.



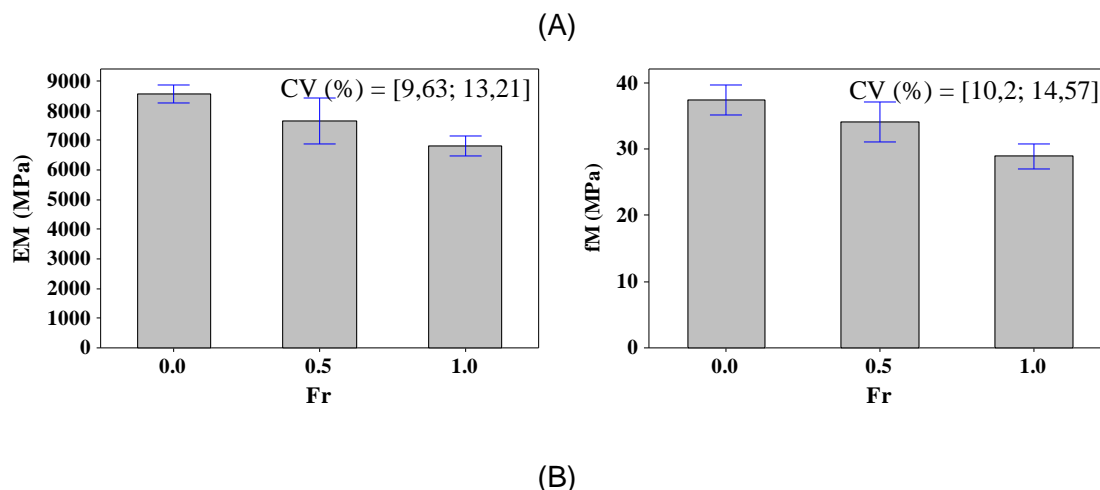


Figura 7.2: Variação das propriedades mecânicas da madeira de Cedroarana em função do número de ciclos [Nci] (A) e da frequência [Fr] (B) de excitação na fadiga.

A Tabela 7.2 apresenta os resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas em função dos dois fatores avaliados (Nci, Fr) para a madeira de Cedroarana.

Assim como na espécie anterior, o teste de Tukey evidencia que conforme o número de ciclos é aumentado, os valores de E_M e f_M passam a ter variações significativas em relação àqueles obtidos pelos testes estáticos, o que era um comportamento esperado e condizente com o fenômeno físico estudado. O mesmo pode ser observado com relação ao aumento da frequência.

Tabela 7.2: Resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas da madeira de Cedroarana. Letras diferentes indicam diferença estatística significativa.

Prop.	Número de Ciclos [Nci]				Frequências [Fr] - Hz		
	0	450	4500	45000	0	0,5	1,0
E_M	A	A	A	B	A	A	B
f_M	A	A	B	B	A	A	B

Da Tabela 7.2, os resultados do teste de Tukey evidenciam que para um número de ciclos de 0, 450 e 4500 ciclos (em alguns casos), e ainda, para frequências de 0 e 0,5Hz (também em alguns casos), não houve diferença significativa nos valores das variáveis estudadas (mostrado pela letra *A*) resultando em valores equivalentes do módulo de elasticidade e da tensão na flexão. Entretanto, para os casos de 45000 ciclos e frequência de 1,0Hz, diferenças estatísticas significativas foram observadas (representado pela letra *B*) e em alguns casos pela letra *C*, denotando reduções significativas ainda maiores de ambas propriedades.

Os modelos de regressão multivariáveis e os respectivos coeficientes de determinação para a estimativa dos valores do módulo de elasticidade e da tensão na flexão estática para a madeira de Cedroarana são expressos pelas Equações 7.3 e 7.4, respectivamente.

$$E_M \text{ (MPa)} = 8578,89 - 0,118 \cdot N_{ci} - 1271,14 \cdot Fr + 0,0480 \cdot N_{ci} \cdot Fr + 2,3427 \cdot 10^{-6} \cdot N_{ci}^2 + 3429,89 \cdot Fr^2 \text{ [R}^2=61,26\%] \quad (7.3)$$

$$f_M \text{ (MPa)} = 37,46 - 0,0007737 \cdot N_{ci} - 7,197 \cdot Fr + 4,7968 \cdot 10^{-5} \cdot N_{ci} \cdot Fr + 1,3965 \cdot 10^{-8} \cdot N_{ci}^2 - 16,04 \cdot Fr^2 \text{ [R}^2=53,89\%] \quad (7.4)$$

Os valores dos coeficientes de determinação obtidos na estimativa dos valores do E_M e da f_M indicam imprecisão na previsão de 38,74 e 46,11%, respectivamente, estimativas essas que podem ser melhoradas com a consideração do conjunto envolvendo as cinco espécies de madeira adotadas nessa pesquisa. Pelas Equações 7.3 e 7.4 ficam evidentes que aumentos nos valores dos fatores individuais N_{ci} e Fr proporcionam reduções nos valores de ambas as propriedades mecânicas, assim como constatado pelo teste de Tukey.

7.3. Madeira de Cambará

A Figura 7.3 ilustra a variação dos valores médios, intervalos dos valores dos coeficientes de variação (CV - %) e os intervalos de confiança (ao nível de 95% de confiança) do módulo de elasticidade (E_M) e da tensão na flexão (f_M) para a madeira de Cambará em função do número de ciclos e da frequência na fadiga.

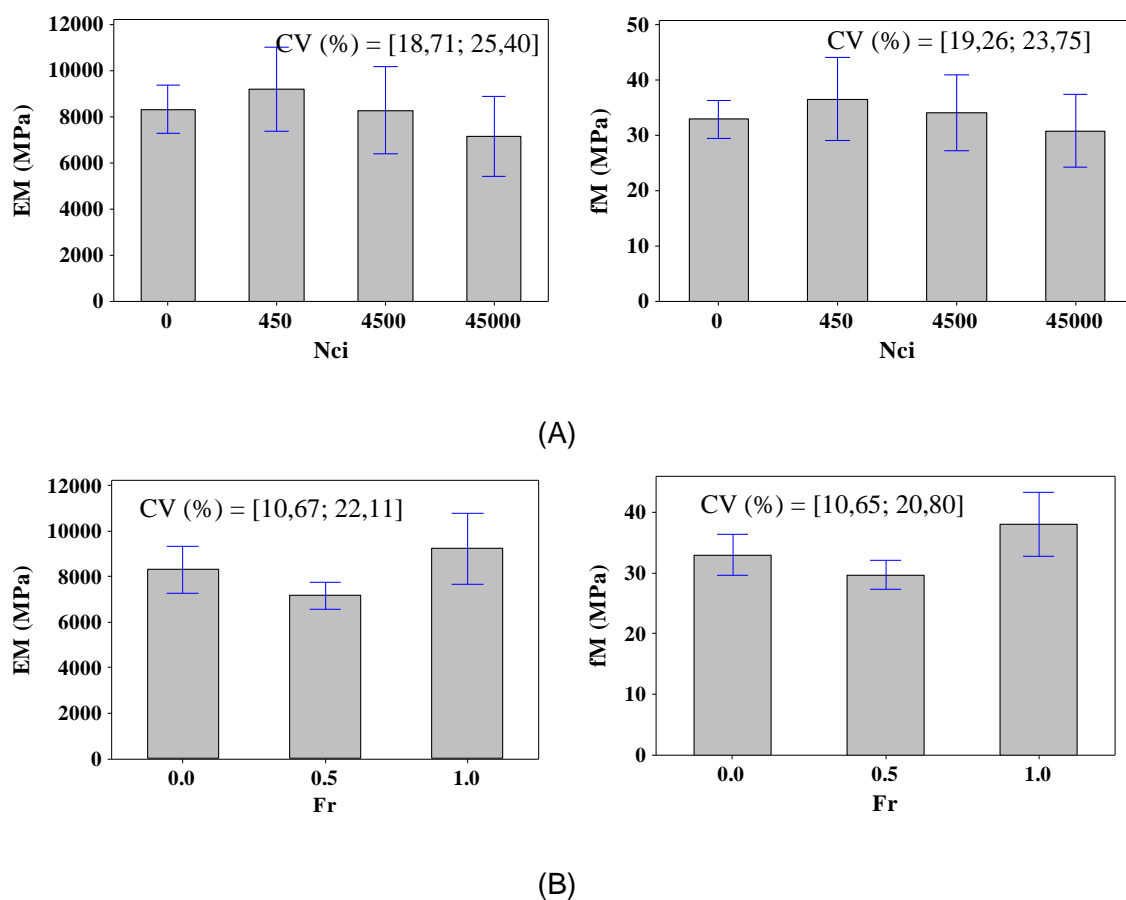


Figura 7.3: Variação das propriedades mecânicas da madeira de Cambará em função do número de ciclos [N_{ci}] (a) e da frequência [Fr] (b) de excitação na fadiga.

A Tabela 7.3 apresenta os resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas em função dos dois fatores avaliados (N_{ci} , Fr) para a madeira de Cambará.

Novamente o teste de Tukey evidencia que conforme o número de ciclos é aumentado, os valores de E_M e f_M passam a ter variações significativas em relação àqueles obtidos pelos testes estáticos, o que era um comportamento esperado e condizente com o fenômeno físico estudado. O mesmo pode ser observado com relação ao aumento da frequência.

Tabela 7.3: Resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas da madeira de Cambará. Letras diferentes indicam diferença estatística significativa.

Prop.	Número de Ciclos [Nci]				Frequências [Fr] - Hz		
	0	450	4500	45000	0	0,5	1,0
E_M	A	A	A	B	A	A	B
f_M	A	A	B	B	A	A	B

Da Tabela 7.3, os resultados do teste de Tukey evidenciam que para um número de ciclos de 0, 450 e 4500 ciclos (em alguns casos), e ainda, para frequências de 0 e 0,5Hz (também em alguns casos), não houve diferença significativa nos valores das variáveis estudadas (mostrado pela letra *A*) resultando em valores equivalentes do módulo de elasticidade e da tensão na flexão. Entretanto, para os casos de 45000 ciclos e frequência de 1,0Hz, diferenças estatísticas significativas foram observadas (representado pela letra *B*) e em alguns casos pela letra *C*, denotando reduções significativas ainda maiores de ambas propriedades.

Os modelos de regressão multivariáveis e os respectivos coeficientes de determinação para a estimativa dos valores do módulo de elasticidade e da tensão na flexão estática para a madeira de Cambará são expressos pelas Equações 7.5 e 7.6, respectivamente.

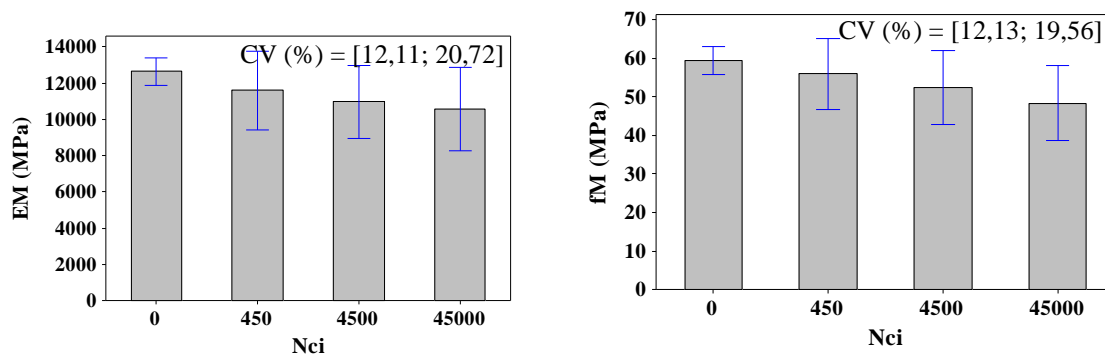
$$E_M \text{ (MPa)} = 8318,56 - 0,196716 \cdot Nci - 3599,96 \cdot Fr - 0,0671916 \cdot Nci \cdot Fr + 4,4293 \cdot 10^{-6} \cdot Nci^2 + 5899,28 \cdot Fr^2 \quad [R^2=48,81\%] \quad (7.5)$$

$$f_M \text{ (MPa)} = 33,0006 - 0,000443057 \cdot N_{ci} - 14,8959 \cdot Fr - 0,000270559 \cdot N_{ci} \cdot Fr + 1,13665 \cdot 10^{-8} \cdot N_{ci}^2 + 24,0849 Fr^2 \quad [R^2=41,25\%] \quad (7.6)$$

Os valores dos coeficientes de determinação obtidos na estimativa dos valores do E_M e da f_M indicam imprecisão na previsão de 51,19 e 58,75%, respectivamente, estimativas essas que podem ser melhoradas com a consideração do conjunto envolvendo as cinco espécies de madeira adotadas nessa pesquisa.

7.4. Madeira de Tatajuba

A Figura 7.4 ilustra a variação dos valores médios, intervalos dos valores dos coeficientes de variação (CV - %) e os intervalos de confiança (ao nível de 95% de confiança) do módulo de elasticidade (E_M) e da tensão na flexão (f_M) para a madeira de Tatajuba em função do número de ciclos e da frequência na fadiga.



(A)

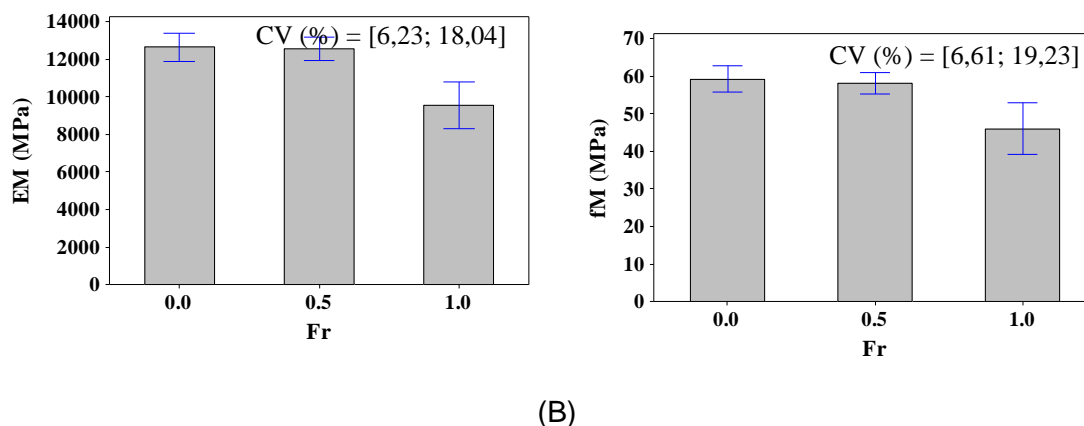


Figura 7.4: Variação das propriedades mecânicas da madeira de Tatajuba em função do número de ciclos [N_{ci}] (A) e da frequência [Fr] (B) de excitação na fadiga.

A Tabela 7.4 apresenta os resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas em função dos dois fatores avaliados (N_{ci} , Fr) para a madeira de Tatajuba.

Também nas espécies de maior densidade o teste de Tukey evidencia, de maneira mais incisiva que conforme o número de ciclos é aumentado, os valores de E_M e f_M apresentam variações significativas em relação àqueles obtidos pelos testes estáticos, novamente condizente com o fenômeno físico estudado. O mesmo pode ser observado com relação ao aumento da frequência.

Tabela 7.4: Resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas da madeira de Tatajuba. Letras diferentes indicam diferença estatística significativa.

Prop.	Número de Ciclos [N_{ci}]				Frequências [Fr] - Hz		
	0	450	4500	45000	0	0,5	1,0
E_M	A	A	A	B	A	A	B
f_M	A	B	B	C	A	A	B

Da Tabela 7.4, os resultados do teste de Tukey evidenciam que para um número de ciclos de 0, 450 e 4500 ciclos (em alguns casos), e ainda, para frequências de 0 e 0,5Hz (também em alguns casos), não houve diferença significativa nos valores das variáveis estudadas (mostrado pela letra A) resultando em valores equivalentes do módulo de elasticidade e da tensão na

flexão. Entretanto, para os casos de 45000 ciclos e frequência de 1,0Hz, diferenças estatísticas significativas foram observadas (representado pela letra *B*) e em alguns casos pela letra *C*, denotando reduções significativas ainda maiores de ambas propriedades.

Os modelos de regressão multivariáveis e os respectivos coeficientes de determinação para a estimativa dos valores do módulo de elasticidade e da tensão na flexão estática para a madeira de Tatajuba são expressos pelas Equações 7.7 e 7.8, respectivamente.

$$E_M \text{ (MPa)} = E_M \text{ (MPa)} = 12645,6 - 0,160522 \cdot N_{ci} + 4310,8 \cdot Fr - 0,0134314 \cdot N_{ci} \cdot Fr + 3,25535 \cdot 10^{-6} \cdot N_{ci}^2 - 6727,85 \cdot Fr^2 \text{ [R}^2\text{=58,21\%]} \quad (7.7)$$

$$f_M \text{ (MPa)} = 59,4144 - 0,000860275 \cdot N_{ci} + 18,4491 \cdot Fr - 0,000132873 \cdot N_{ci} \cdot Fr + 1,73446 \cdot 10^{-8} \cdot N_{ci}^2 - 27,0325 \cdot Fr^2 \text{ [R}^2\text{=51,09\%]} \quad (7.8)$$

Os valores dos coeficientes de determinação obtidos na estimativa dos valores do E_M e da f_M indicam imprecisão na previsão de 41,79 e 48,91%, respectivamente, estimativas essas que podem ser melhoradas com a consideração do conjunto envolvendo as cinco espécies de madeira adotadas nessa pesquisa.

7.5. Madeira de Roxinho

A Figura 7.5 ilustra a variação dos valores médios, intervalos dos valores dos coeficientes de variação (CV - %) e os intervalos de confiança (ao nível de 95% de confiança) do módulo de elasticidade (E_M) e da tensão na flexão (f_M) para a madeira de Roxinho em função do número de ciclos e da frequência na fadiga.

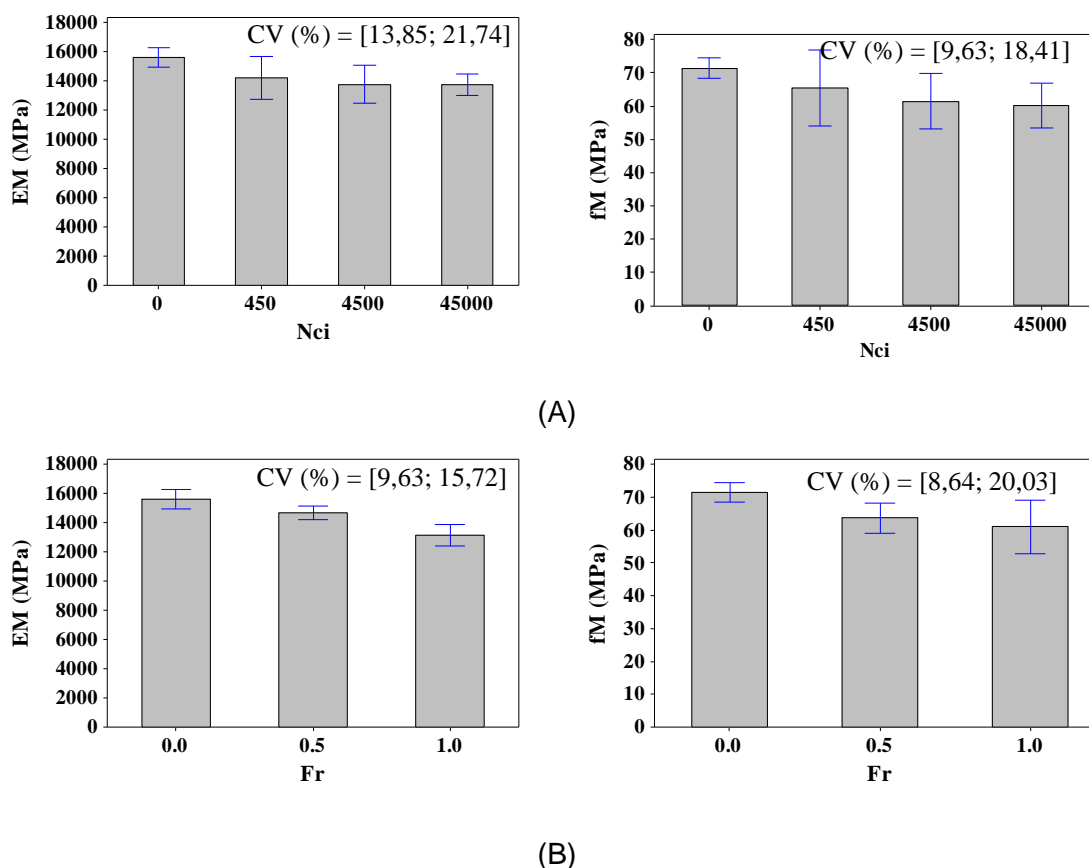


Figura 7.5: Variação das propriedades mecânicas da madeira de Roxinho em função do número de ciclos [Nci] (A) e da frequência [Fr] (B) de excitação na fadiga.

A Tabela 7.5 apresenta os resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas em função dos dois fatores avaliados (Nci, Fr) para a madeira de Roxinho.

Assim como na classe anterior, para espécies de maior densidade, o teste de Tukey evidencia mais uma vez que conforme o número de ciclos é aumentado, os valores de E_M e f_M apresentam variações significativas em relação àqueles obtidos pelos testes estáticos, novamente condizente com o fenômeno físico estudado. O mesmo pode ser observado com relação ao aumento da frequência.

Tabela 7.5: Resultados do teste de Tukey das propriedades mecânicas da madeira de Roxinho. Letras diferentes indicam diferença estatística significante.

Prop.	Número de Ciclos [Nci]				Frequências [Fr] - Hz		
	0	450	4500	45000	0	0,5	1,0
E_M	A	B	B	B	A	A	B
f_M	A	A	B	B	A	B	B

Da Tabela 7.5, os resultados do teste de Tukey evidenciam que para um número de ciclos de 0, 450 e 4500 ciclos (em alguns casos), e ainda, para frequências de 0 e 0,5Hz (também em alguns casos), não houve diferença significativa nos valores das variáveis estudadas (mostrado pela letra *A*) resultando em valores equivalentes do módulo de elasticidade e da tensão na flexão. Entretanto, para os casos de 45000 ciclos e frequência de 1,0Hz, diferenças estatísticas significativas foram observadas (representado pela letra *B*) e em alguns casos pela letra *C*, denotando reduções significativas ainda maiores de ambas propriedades.

Os modelos de regressão multivariáveis e os respectivos coeficientes de determinação para a estimativa dos valores do módulo de elasticidade e da tensão na flexão estática para a madeira de Roxinho são expressos pelas Equações 7.9 e 7.10, respectivamente.

$$E_M \text{ (MPa)} = E_M \text{ (MPa)} = 15654,7 - 0,155182 \cdot Nci + 745,255 \cdot Fr + 0,0516713 \cdot Nci \cdot Fr + 2,34101 \cdot 10^{-6} \cdot Nci^2 - 3098,85 Fr^2 \quad [R^2=50,94\%] \quad (7.9)$$

$$f_M \text{ (MPa)} = f_M \text{ (MPa)} = 71,3756 - 0,00155421 \cdot Nci + 3,03048 \cdot Fr + 0,000611025 \cdot Nci \cdot Fr + 2,15213 \cdot 10^{-8} \cdot Nci^2 - 12,4466 \cdot Fr^2 \quad [R^2=42,66\%] \quad (7.10)$$

Os valores dos coeficientes de determinação obtidos na estimativa dos valores do E_M e da f_M indicam imprecisão na previsão de 49,06 e 57,34%, respectivamente, estimativas essas que podem ser melhoradas com a

consideração do conjunto envolvendo as cinco espécies de madeira adotadas nessa pesquisa.

7.6. Todas as Espécies de Madeira

A Figura 7.6 ilustra a variação dos valores médios, intervalos dos valores dos coeficientes de variação (CV - %) e os intervalos de confiança (ao nível de 95% de confiança) da densidade aparente ($\rho_{12\%}$) das cinco espécies de madeira estudadas.

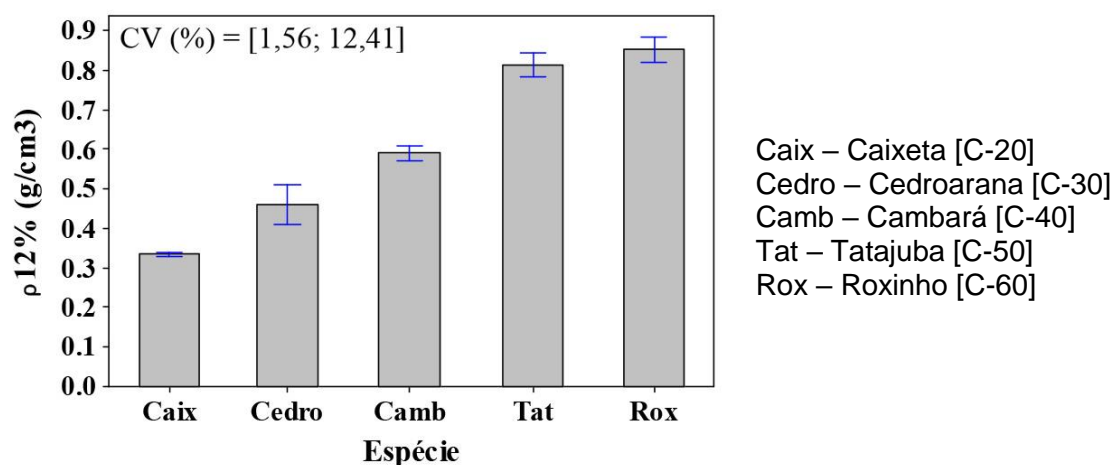


Figura 7.6: Variação nos valores das densidades das espécies de madeira investigadas.

A fim de se obter um modelo único para determinação de E_M e f_M , abrangendo todas as espécies, independente da classe de resistência a que pertençam, introduziu-se nesse momento um parâmetro de fácil obtenção e amplamente genérico para quaisquer espécies de madeira que se pretenda utilizar, a densidade aparente ($\rho_{12\%}$). Os modelos de regressão multivariáveis e os respectivos coeficientes de determinação para a estimativa dos valores do módulo de elasticidade e da tensão na flexão estática para o conjunto envolvendo as cinco espécies de madeira são expressos pelas Equações 7.11 e 7.12, respectivamente, ressaltando a densidade aparente ter sido inserida como variável independente nesses modelos, o que permite maior generalização do uso dos ajustes na estimativa das propriedades E_M e f_M .

$$\begin{aligned}
 E_M \text{ (MPa)} = & 9707,66 - 0,0936647 \cdot N_{ci} - 2117,43 \cdot Fr - 13666,8 \cdot \rho_{12\%} - \\
 & 0,0567916 \cdot N_{ci} \cdot Fr - 0,0453735 \cdot N_{ci} \cdot \rho_{12\%} + 813,833 \cdot Fr \cdot \rho_{12\%} + \\
 & 0,0676045 \cdot N_{ci} \cdot Fr \cdot \rho_{12\%} + 2,32517 \cdot 10^{-6} \cdot N_{ci}^2 + 2921,14 \cdot Fr^2 + 21913 \cdot \rho_{12\%}^2 \quad (7.11) \\
 & [R^2=70,58\%]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_M \text{ (MPa)} = & 46.4895 - 0,000189931 \cdot N_{ci} - 5,39633 \cdot Fr - 84,4083 \cdot \rho_{12\%} - \\
 & 0,000643106 \cdot N_{ci} \cdot Fr - 0,000832534 \cdot N_{ci} \cdot \rho_{12\%} + 3,47444 \cdot Fr \cdot \rho_{12\%} + \\
 & 0,00100965 \cdot N_{ci} \cdot Fr \cdot \rho_{12\%} + 1,23445 \cdot 10^{-8} \cdot N_{ci}^2 + 9,67021 \cdot Fr^2 + 123,464 \cdot \\
 & \rho_{12\%}^2 \quad [R^2=67,89\%] \quad (7.12)
 \end{aligned}$$

Os valores dos coeficientes de determinação obtidos na estimativa dos valores do E_M e da f_M para o conjunto envolvendo as cinco espécies de madeira indicam imprecisão na previsão de 29,42 e 32,11%, respectivamente.

8. CONCLUSÕES

A partir da experimentação e das análises estatísticas realizadas apresenta-se:

- O efeito fadiga mostrou-se presente e pronunciado em todas as classes de resistência de madeiras estudadas.
- Em todas as classes verificou-se uma redução nas propriedades de resistência e de rigidez com o aumento do número de ciclos de carregamento aplicado em todas as frequências estudadas.
- Foi possível obter-se curvas de $[\sigma_m \times N_c]$ e $[E \times N_c]$ individualmente para todas as classes de resistência, curvas essas que apresentaram resultados estatisticamente significativos para a área de engenharia, com coeficientes de determinação da ordem de 0,7.
- Os modelos obtidos a partir dessas curvas mostram números condizentes com os fenômenos físicos esperados e apresentados para o efeito fadiga.
- O resultado mais significativo obtido na presente pesquisa, foi a partir dos modelos de regressão multivariáveis e dos respectivos coeficientes de determinação para a estimativa dos valores do módulo de elasticidade e da tensão na flexão estática, obter-se um modelo genérico para o conjunto envolvendo as cinco espécies de madeira, ressaltando a inserção da densidade aparente como variável independente, o que permitiu maior generalização do uso dos ajustes na estimativa das propriedades E_M e f_M , apresentando coeficientes de determinação significativos que validaram os resultados obtidos nesse trabalho.
- Fica como sugestão para trabalhos futuros, uma investigação mais detalhada dentro de cada classe de resistência, abrangendo um número

maior de espécies por classe a fim de refinar o modelo proposto no presente trabalho.

- Cabe destacar que a inserção da densidade aparente como variável independente no modelo permitiu a generalização deste, independente das classes de resistência, além da vantagem de se tratar de um parâmetro de fácil obtenção, o que incentiva a utilização do modelo proposto.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, NBR 7190N. Projeto de estruturas de madeira. **Rio de Janeiro: Associação Brasileira De Normas Técnicas**, 1997.

ASTM, D 143-52. Standard methods of testing small clear specimens of timber. **Philadelphia (PA): American Society for Testing and Materials**, Part 22, p. 59-116,1981.

ASTM, D143. Standard test methods for small clear specimens of timber. **West Conshohocken: American Society for Testing and Materials**. 2000.

ASTM, D143–94. Standard test methods for small clear specimens of timber. **Philadelphia: American Society for Testing and Materials**, p. 31, 2000.

ASTM, E 1823. Standard terminology relating to fatigue and fracture testing. **Philadelphia: American Society for Testing and Materials**. P. 22, 2007.

ASTM, E1150/87. Standard definitions of terms relating to fatigue. **American Society for Testing and Materials**, p. 1-10,1987.

BERNI, C. A. et al. **South American timbers-the characteristics, properties and uses of 190 species**. Division of Building Research, CSIRO., 1979.

BHKARI, N. M. et al. Post-fatigue behaviour of kekatong glued laminated timber railway sleepers. **InCIEC 2015**. Springer Singapore, p. 819-831, 2016.

CARVALHO, A. M. **Valorização da madeira do híbrido Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha**. 2000. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2000.

CHRISTOFORO, A. L. et al. 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.

CHUDNOFF, M. Tropical timbers of the world. US Forest Products Laboratory, Forest Service. **US Department of Agriculture**, 1979.

CLORIUS, C. O. **Fatigue in wood**: An investigation in tension perpendicular to the grain. 2002. Tese (PhD em Structural Mechanics and Materials) – Technical University of Denmark, Lyngby, 2002.

CLORIUS, S. O.; PEDERSEN, M. U. **Fatigue damage in wood**: An investigation of frequency influence on fatigue development in wood. 1996. Thesis (M.Sc. em Structural Engineering and Materials) – Technical University of Denmark, Denmark, 1996.

EL DEBS, M. K.; TAKEYA, T. Pontes de concreto: Notas de aula, Fascículo 1, Introdução. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SET, 1999.

ESPINOSA, M. M. **Desenvolvimento de um modelo estatístico para aplicação no estudo de fadiga em emendas dentadas de madeira**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de São Carlos) – Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 165,2001.

ESPINOSA, M. M.; SANDANIELO, V. L. M.; LOUZADA NETO, F. O método de Bootstrap para o estudo de dados de fadiga dos materiais. **Revista de Matemática e Estatística**, UNESP, v. 24, n. 2, p. 37-55, 2006.

EUROCODE 5. Design of timber structures. **Brussels: Comité Européen De Normalization**, 1993.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation. **Materials and Structures**, v. 44, n. 8, p. 1431-1440, 2011.

FONSECA, A. G. et al. Qualidade fisiológica de sementes de *Pinus elliotti* Engelm. submetidas a diferentes métodos de armazenamento. **CERNE (online)**, Lavras, v. 18, n. 3, p. 457-463, 2012.

GARCIA, F. M. **Rendimento operacional de uma serraria com a espécie Cambará (*Quase laxiflora* Farm.) na região Amazônica**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2013.

GUIMARÃES L. E. S. et al. Efeito do carregamento cíclico sobre as propriedades de flexão e ultrassom em madeiras de quatro espécies florestais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 473-481, Dez. 2012.

HELLMEISTER, J. C. Pontes de Eucalipto Citriodora. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1, São Carlos, SP. **Anais**. São Carlos, V. Pontes, p. 1-78, 1983.

IBAMA,

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

IBDF. Plano de manejo. Parque Nacional da Serra da Canastra. **Brasília: INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL**, 1981.

IPT, http://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira/busca, **Instituto de Pesquisa e Tecnologia**, 2017.

JANKOWSKY, I. P. et al. Madeiras Brasileiras (Volume I). **Caxias do Sul: Spectrum**, v. 1, 1990.

LEWIS, W. C.; ASCE, M. Design considerations for fatigue in Timber Structures. **Journal of the Structural Division**: Proceedings of the American Society of Civil Engineers. v. 86, n. ST5, May. 1960.

LI, J. et al. Fatigue behavior of wood-fiber-based tri-axial engineered sandwich composite panels (ESCP). **Holzforschung**, v. 70, n. 6, p. 567-575, 2016.

MACÊDO, A. N. **Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC)**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola

de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 150,2000.

MACÊDO, A.N.; CALIL JÚNIOR, C. Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 9, n. 37, p. 95-126, 2007.

MACÊDO, L. B et al. Reabilitação de peças estruturais com auxílio de parafusos auto atarraxantes de 4mm de diâmetro e 50 mm de comprimento. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 15.,2016. Curitiba. **Anais**. Curitiba: EBRAMEM, 2016.

MOILANEN, C. et al. Influence of strain rate, temperature and fatigue on the radial compression behaviour of Norway spruce. **Holzforschung**, v. 71, n. 6, p. 505-514, 2017.

OGAWA, K. et al. Fatigue behavior of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) under repeated compression loading tests perpendicular to the grain. **Holzforschung**, v. 71, n. 6, p. 499-504, 2017.

PORTEOUS, J.; KERMANI, A. Structural timber design to Eurocode 5. **John Wiley & Sons**, 2013.

SEGUNDINHO, P. G. de A. **Estudo das vibrações induzidas por pedestres em passarelas de madeira**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia de São Carlos) – Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 361, 2010.

SERPA, P. N. et al. Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore (online)**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 723-733, Oct. 2003. SERPA, P. N.; VITAL, Benedito Rocha; DELLA LUCIA, Ricardo Marius and PIMENTA, Alexandre Santos. *Rev. Árvore [online]*. 2003, vol.27, n.5, pp.723-733. ISSN 1806-9088.

SMITH, I.; LANDISS, E.; GONG, M. Fracture and fatigue in wood. **John Wiley & Sons**, Sussex, England, p. 229, 2003.

STOLF, D. O. et al. Influence of the moisture content of some wood species on toughness. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 501-508, 2014.

SUDAM/IPT. Grupamento de espécies tropicais da Amazônia por similaridade de características básicas e por utilização. **Belém: SUDAM**, p. 237, 1981.

SURESH, S. **Fatigue of materials**. 2. Ed. Great Britain: Cambridge University Press, p. 617, 1991.

YANG, H. S.; QIAO, P; WOLCOTT, M. P. Fatigue characterization and reliability analysis of wood flour filled polypropylene composites, **Polymer Composites**, v. 31, n. 4, p. 553-560, 2010.

ZANGIÁCOMO, A. L.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Elasticity moduli in round wooden beams of *Pinus caribaea*. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 3, p. 566-570, Jun. 2016.