

VITOR AFONSO NEVES SILVA

**Caracterização não destrutiva de elementos de madeira usando a Técnica de Excitação
por Impulso**

Vitor Afonso Neves Silva

Caracterização não destrutiva de elementos de madeira usando a Técnica de Excitação por Impulso

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina

Guaratinguetá-SP
2021

Silva, Vitor Afonso Neves
S586c Caracterização não destrutiva de elementos de madeira usando a
técnica de excitação por impulso / Vitor Afonso Neves Silva –
Guaratinguetá, 2021.
80 f : il.
Bibliografia: f. 72-80

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade
de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina

1. Madeira - Estrutura. 2. Madeira - Propriedades. 3. Ensaios não
destrutivos. I. Título.

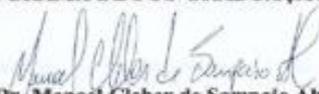
CDU 624.011.1

VITOR AFONSO NEVES SILVA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

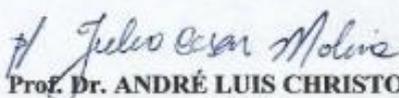
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO

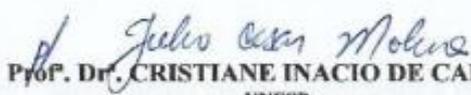
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JULIO CESAR MOLINA
Orientador - UNESP
participou por videoconferência


Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO
UFSCar
participou por videoconferência


Prof. Dr. CRISTIANE INACIO DE CAMPOS
UNESP
participou por videoconferência

Dezembro de 2021

DADOS CURRICULARES

VITOR AFONSO NEVES SILVA

NASCIMENTO	12.11.1990 – Itapeva / SP
FILIAÇÃO	Jose da Silva Neto Sandra de Fatima Neves
2014/2019	Curso de Graduação Engenharia Industrial Madeireira – UNESP/Itapeva
2019/2021	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP/Guaratinguetá

Dedico este trabalho aos meus pais Jose da Silva Neto e Sandra de Fatima Neves. E a minha esposa Natália Andrade Bianchi.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Julio Cesar Molina por me direcionar ao longo da construção deste trabalho de Mestrado;

ao técnico Juliano Brito por todo o auxílio e paciência com meus incontáveis pedidos de ajuda;

por fim, agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 88882.433470/2019- 01.

RESUMO

O estudo da caracterização mecânica da madeira é fundamental para a utilização eficiente de madeiras em estruturas. A Técnica de Excitação por Impulso (TEI) é um tipo de ensaio, não destrutivo, baseado na ASTM E 1876:15, onde a peça sofre um impacto de curta duração que induz a uma resposta acústica composta por frequências naturais de vibração. A partir dessa técnica, pode-se obter o módulo de elasticidade dinâmico, que corresponde uma estimativa para o módulo de elasticidade da madeira. No entanto, pesquisas são necessárias para melhor evidenciar que o módulo de elasticidade fornecido pelo equipamento, neste caso. Este trabalho teve como finalidade realizar a caracterização da rigidez da madeira por meio de ensaios não destrutivos com uso do equipamento Sonelastic, para comparação com resultados de rigidez (longitudinal e flexional) obtidos a partir da caracterização recomendada pela ABNT NBR 7190:2020, considerando a influência da classificação visual. Com base no projeto de norma PN 02.126.010-001, foi realizada a classificação visual dos elementos de madeira ensaiados. Foram ensaiadas lamelas de madeiras de Cedro Australiano, Cedro Indiano e Eucalipto Grandis, com dimensões nominais de 2,5 x 6 x 123 cm, tendo-se em vista a utilização dessas lamelas na confecção vigas de madeira lamelada colada, para pesquisas futuras. No Sonelastic, foram realizadas solicitações em diferentes direções das lamelas (longitudinal e transversal). Os valores de rigidez longitudinal (E_{dL}) e flexional (E_{dF}) obtidos, neste caso, foram comparados com os resultados de rigidez (E_M) determinados com base nos ensaios padronizadas (flexão de três pontos e compressão) recomendados pela ABNT NBR 7190:1997. Os resultados indicaram que o módulo de rigidez (E_M) apresentou maior compatibilidade com E_{dF} . O E_{dL} apresentou maior correlação com o E_{c0} . No caso da análise das classes visuais foi visto que essa análise é fundamental para utilização da madeira em estruturas, para minimizar possíveis variações presentes na madeira.

PALAVRAS-CHAVE: Excitação por Impulso. Flexão. Rigidez. Compressão paralela. Madeiras de reflorestamento.

ABSTRACT

The study of the mechanical characterization of wood is fundamental for the efficient use of wood in structures. The Impulse Excitation Technique (IET) is a type of test, non-destructive, based on ASTM E 1876:15, where the piece undergoes a short duration impact that induces an acoustic response composed of natural vibration frequencies. From this technique, the dynamic modulus of elasticity can be obtained, which corresponds to an estimate for the modulus of elasticity of wood. However, research is needed to better evidence the modulus of elasticity provided by the equipment, in this case. This work aimed to carry out the characterization of wood stiffness through non-destructive tests using the Sonelastic equipment, to compare with stiffness results (longitudinal and flexural) obtained from the characterization recommended by ABNT NBR 7190:2020. Based on the draft standard PN 02.126.010-001, the visual classification of the tested wooden elements was carried out. Laminated sample of wood from Cedro Australiano, Cedro Indiano and Eucalipto Grandis were tested, with nominal dimensions of 2.5 x 6 x 123 cm, with a view to using these layers in the manufacture of glued laminated wood beams, for future research. In Sonelastic, requests were made in different directions of the sample (longitudinal and transversal). The values of longitudinal (E_{dL}) and flexural (E_{dF}) stiffness obtained, in this case, were compared with the stiffness (E_M) results determined based on standardized tests (three-point bending and compression) recommended by ABNT NBR 7190:1997. The results indicated that the modulus of stiffness (E_M) presented greater compatibility with E_{dF} . E_{dL} was more correlated with E_{c0} . In the case of the analysis of visual classes, it was seen that this analysis is essential for the use of wood in structures, to minimize possible variations present in the wood.

KEYWORDS: Impulse Excitation. Bending. Stiffness. Parallel compression. Reforestation woods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cedro Australiano	22
Figura 2 - Cedro Indiano	23
Figura 3 - Eucalipto Grandis	25
Figura 4 - Direções ortogonais da madeira.....	26
Figura 5 - Medula	29
Figura 6 - Encurvamento	30
Figura 7 - Arqueamento.....	30
Figura 8 - Torcimento.....	30
Figura 9 - Esmoado	31
Figura 10 - Nós: (a) individual; (b) em conjunto; (c) individuais próximos	32
Figura 11 – Fissuras: (a) passante; (b) não passante; (c) racha não passante; (d) Racha passante.....	32
Figura 12 - Método de ensaio de excitação por impulso – Equipamento Sonelastic	35
Figura 13 - Recomendação de ensaio para obtenção do módulo de elasticidade longitudinal (E).....	36
Figura 14 - Recomendação de ensaio para obtenção do módulo de elasticidade flexional (E).....	37
Figura 15 - Ilustração da sollicitação no CP, para obtenção do E_{dL}	38
Figura 16 - Ilustração da sollicitação no CP, para obtenção do E_{dF}	38
Figura 17 - Método de ensaio alternativo, para obtenção do E_{dF}	39
Figura 18 - Ensaio de Flexão Estática	40
Figura 19 - Corpo de prova para ensaio de resistência à compressão paralela às fibras	41
Figura 20 - CP para determinação densidade aparente e da umidade da madeira.....	42
Figura 21 – Usinagem das vigas para retirada dos corpos de prova.....	48
Figura 22 - Obtenção da umidade inicial com uso do medidor elétrico Moisture Mete 4806 ..	49
Figura 23 - Lamelas entabacadas	49
Figura 24 - Gabarito confeccionado com base na ABNT NBR PN 02.126.010-001	50
Figura 25 - Ensaio destrutivo de compressão paralela as fibras.....	51
Figura 26 - Ensaio de excitação por impulso longitudinal (E_{dL}) biapoiado	52
Figura 27 - Ensaio de excitação por impulso longitudinal (E_{dL}) sem os apoios.....	53
Figura 28 - Ensaio de excitação por impulso flexional (E_{dF}) biapoiado	53
Figura 29 - Ensaio de excitação por impulso flexional (E_{dF}), biapoiado com apoios simples ..	54
Figura 30 - Ensaio de excitação por impulso flexional (E_{dF}), sem apoios nos pontos nodais..	54

Figura 31 – Ensaio de Flexão estática de três pontos com base no Anexo B da ABNT NBR 7190:1997 para determinação de E_M	55
Figura 32 - Resultado da classificação visual – Cedro Australiano	57
Figura 33 – Resultado da classificação visual – Cedro Indiano	58
Figura 34 – Resultado da classificação visual – Eucalipto Grandis	58
Figura 35 - Excitação por impulso longitudinal com e sem apoios.....	60
Figura 36 - Análise de regressão linear com e sem apoios, Cedro Australiano	61
Figura 37 - Análise de regressão linear com e sem apoios, Cedro Indiano.....	61
Figura 38- Análise de regressão linear com e sem apoios, Eucalipto Grandis.....	62
Figura 39 – Regressão linear – Todas as Classes (Cedro Australiano).....	64
Figura 40 – Regressão linear - Classe 1 (Cedro Australiano)	65
Figura 41 – Regressão linear - Classe 3 (Cedro Australiano)	66
Figura 42 – Regressão linear para E_{c0} – (Cedro Australiano)	68
Figura 43 – Regressão linear – Todas as Classes (Cedro Indiano)	70
Figura 44 – Regressão linear - Classe 1 (Cedro Indiano).....	71
Figura 45 – Regressão linear - Classe 3 (Cedro Indiano).....	72
Figura 46 – Regressão linear para E_{c0} – (Cedro Indiano).....	74
Figura 47 – Regressão linear – Todas as Classes (Eucalipto Grandis)	76
Figura 48 – Regressão linear - Classe 1 (Eucalipto Grandis).....	77
Figura 49 – Regressão linear - Classe 2 (Eucalipto Grandis).....	78
Figura 50 – Regressão linear - Classe 3 (Eucalipto Grandis).....	79
Figura 51 – Regressão linear para E_{c0} – (Eucalipto Grandis).....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios para análise visual de madeira de coníferas	33
Tabela 2 - Critérios para análise visual de madeira de folhosas.....	34
Tabela 3 - Classificação do coeficiente da correlação de Pearson	56
Tabela 4 – Caracterização físico-mecânica das madeiras (U=12%)	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MLC	Madeira Laminada Colada
CLT	Madeira Lamelada Cruzada
CP	Corpo de prova
PN	Projeto de Norma
TEI	Técnica de Excitação por Impulso
MOE	Módulo de Elasticidade
E_M	Módulo de Elasticidade na Flexão Estática
E_{c0}	Módulo de Elasticidade na Compressão Paralela às Fibras
E_{dL}	Módulo de Elasticidade não destrutivo longitudinal
E_{dF}	Módulo de Elasticidade não destrutivo flexional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	GERAL.....	17
2.2	ESPECÍFICOS	17
3	JUSTIFICATIVA	18
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1	FUNDAMENTOS	19
4.1.1	Madeira e alguns de seus produtos derivados	19
4.1.2	Madeira de reflorestamento	19
4.1.3	Cedro australiano (Toona Ciliata M. Roem)	21
4.1.4	Cedro indiano (Acrocarpus fraxinifolius)	22
4.1.5	Eucalipto grandis (Eucalyptus grandis)	23
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	25
4.2.1	Classificação visual.....	28
4.2.2	Caracterização não destrutiva da rigidez da madeira	34
4.2.3	Caracterização destrutiva da madeira	40
4.3	ESTUDOS DESENVOLVIDOS NO BRASIL E NO EXTERIOR SOBRE CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA PELA TÉCNICA DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO (TEI).....	43
4.4	CONCLUSÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	46
5	MATERIAL E MÉTODOS	48
5.1	CONFECÇÃO DAS LAMELAS E CPs DE CARACTERIZAÇÃO	48
5.2	CONTROLE DE UMIDADE DAS LAMELAS.....	49
5.3	CLASSIFICAÇÃO VISUAL	50
5.4	ENSAIOS MECÂNICOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	51
5.5	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO	52
5.6	ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA DE TRÊS PONTOS	54
5.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.....	55
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
6.1	CLASSIFICAÇÃO VISUAL	57
6.2	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MADEIRAS UTILIZADAS.....	58
6.3	INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE APOIO DOS CORPOS DE PROVA	59

6.4	COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RIGIDEZ.....	63
6.4.1	Cedro Australiano - Ensaio de flexão (EMIC) x Ensaio não destrutivo (Sonelastic).....	63
6.4.2	Cedro Australiano - Ensaio de compressão destrutivo (EMIC) x Ensaio não destrutivo (Sonelastic)	67
6.4.3	Cedro Indiano - Ensaio de flexão (EMIC) x Ensaio não destrutivo (Sonelastic).....	69
6.4.4	Cedro Indiano - Ensaio de compressão destrutivo (EMIC) x Ensaio não destrutivo (Sonelastic)	73
6.4.5Eucalipto Grandis - Ensaio de flexão (EMIC) x Ensaio não destrutivo (Sonelastic)	75
6.4.6	Eucalipto Grandis - Ensaio de compressão destrutivo (EMIC) x Ensaio não destrutivo (Sonelastic)	80
7	CONCLUSÕES.....	83
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade tem se tornado um propósito na busca do desenvolvimento consciente, de forma que não ocorra a degradação completa dos recursos ambientais não renováveis. Em consonância com esse objetivo, a madeira apresenta-se como uma matéria-prima renovável que absorve e retém gás carbônico (CO₂) durante o crescimento da árvore, auxiliando na retenção de poluentes atmosféricos.

Sendo a madeira um material natural, composto por polímeros como a lignina e a celulose, esta é caracterizada pela anisotropia, ou seja, suas propriedades mecânicas variam dependendo da direção de suas fibras. Desse modo, diversos estudos que buscam novas técnicas de ensaio para facilitar e identificar suas propriedades mecânicas se justificam, e buscam melhores aplicações especialmente para espécies de reflorestamento.

As madeiras de reflorestamento mais abundantes são dos gêneros Pinus e Eucalipto, e estas madeiras já fazem parte de diversos processos produtivos no país, como produção industrializada de painéis, mobiliário, celulose e papel. Em paralelo, e ganhando mais espaço na indústria brasileira da construção civil e de moveis, existem outras espécies de reflorestamento, como o Cedro Australiano e o Cedro Indiano que apresentam alta qualidade e fácil manejo, podendo ser cultivadas junto com outras culturas, como o café, cacau, seringueira, banana e outras espécies de árvores.

Para a madeira, é fundamental uma caracterização mecânica que apresente maior confiabilidade, para que a mesma possa ser utilizada de forma mais assertiva, garantindo sua aplicação em estruturas hiperestáticas, consumindo menos matéria-prima.

Tratando-se dos ensaios destrutivos, seguindo os parâmetros da norma ABNT NBR 7190:1997 (Projeto de estruturas de madeira), é necessário um grande investimento financeiro na compra e manutenção periódica de equipamentos e treinamento de operadores. A peça ensaiada, neste caso, sofre a ação de uma força mecânica até sua ruptura, tornando a mesma inapta para o uso posterior.

Por outro lado, nos ensaios não destrutivos, as peças podem ser ensaiadas e reutilizadas, podendo-se assim efetuar a caracterização de vigas, e elementos secundários de madeira, garantindo-se maior precisão estrutural, e tornando-se um facilitador para a construção civil, além da necessidade de um investimento financeiro reduzido com equipamentos e operadores. Os ensaios não destrutivos auxiliam no desenvolvimento das empresas produtoras de elementos industrializados como a Madeira Lamelada Colada (MLC) e Madeira Lamelada

Colada Cruzada (CLT ou MLCC), que utilizam uma classificação mecânica prévia das peças componentes dos elementos estruturais.

A técnica de excitação por impulso (TEI), consiste num ensaio não destrutivo, tendo como base a ASTM E 1876:15 (*Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*) para determinação da rigidez da madeira. Neste tipo de ensaio, a peça de madeira é submetida a um impacto realizado por um pulsador manual ou automático, gerando assim uma resposta acústica através da sua frequência natural de vibração. Essa vibração é captada através do software Sonelastic que possui uma faixa de frequência: de 20 Hz a 96 kHz, e o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) do elemento ensaiado é determinado. No entanto, para a utilização correta do equipamento Sonelastic é fundamental o conhecimento de todas as respostas fornecidas pelo equipamento em termos de rigidez.

Em outras palavras, nos ensaios o equipamento fornece valores de módulo dinâmico (E_d) relativos à flexão, torção, compressão, entre outros, e nem sempre, estas respostas são tão claras para o usuário. Nesse sentido, comumente utiliza-se o módulo de elasticidade na direção longitudinal para qualquer comparação de rigidez com outros métodos.

Além disso, segundo a ABNT NBR 7190 (1997), uma madeira estrutural somente é considerada classificada quando passa por processo de classificação mecânica como também visual. No meio técnico, é comum a utilização da classificação mecânica da madeira sem considerar a classificação visual. No entanto, a consideração da classificação visual para utilização de peças com melhor qualidade pode garantir uma melhor resposta estrutural para o elemento de madeira considerado.

Portanto, este trabalho teve como finalidade o estudo e a identificação da resposta de rigidez da madeira, fornecida pelo equipamento Sonelastic, considerando diferentes classes visuais, para identificação das rigidezes fornecidas para as madeiras ensaiadas tendo-se em vista a calibração do equipamento para posterior utilização deste na caracterização da madeira em escala industrial.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Caracterização visual e mecânica de elementos de madeira, com base na técnica de excitação por impulso em comparação com os resultados de rigidez obtidos por testes tradicionais (compressão e flexão estática de três pontos) propostos pela ABNT NBR 7190:1997, para calibração do equipamento.

2.2 ESPECÍFICOS

- Caracterização mecânica da rigidez de madeiras de Cedro Australiano, Cedro Indiano e Eucalipto, utilizando o equipamento Sonelastic (de forma não destrutiva), para a obtenção dos módulos de elasticidade dinâmicos (longitudinal e flexional);

- Estudo das condições de apoio (com ou sem apoios) para as peças ensaiadas no equipamento sonelastic tendo-se em vista a obtenção de valores mais precisos de rigidez longitudinal e flexional;

- Classificação visual das madeiras utilizadas com base no projeto de revisão da ABNT NBR 7190:2021 para escolha das peças de melhor qualidade e verificação da influência da classificação visual (de forma isolada e geral) na resposta de rigidez das lamelas de madeiras;

- Caracterização das rigidezes (longitudinal e flexional) das madeiras utilizadas através de ensaios tradicionais de compressão paralela as fibras e de flexão estática de três pontos, seguindo-se as recomendações do Anexo B da versão atual da ABNT NBR 7190:1997;

- Verificação da correlação entre os módulos de elasticidade (flexional e longitudinal) obtidos entre a técnica de excitação por impulso e ensaios tradicionais segundo a ABNT NBR 7190:1997 para melhor caracterização dos valores de rigidez fornecidos pelo equipamento Sonelastic.

3 JUSTIFICATIVA

A indústria da madeira, busca novos métodos para que a madeira seja testada e classificada. Com isso, busca-se, principalmente, promover uma maior durabilidade e confiabilidade para as estruturas de madeira confeccionadas industrialmente, podendo-se, assim, minimizar seus custos e promover uma maior disseminação das diferentes técnicas construtivas atualmente disponíveis no mercado (MLC, CLT entre outras).

Para que a indústria da madeira na construção civil tenha maior competitividade é necessário a utilização de técnicas que garantam maior agilidade na avaliação e construção das estruturas em madeira, demonstrando assim que a madeira e seus produtos derivados podem ser utilizados de forma segura paralelamente à minimização dos danos ao meio ambiente.

Atualmente, a verifica-se que a caracterização destrutiva da madeira é realizada por meio dos procedimentos descritos no Anexo B da norma brasileira em vigor, ABNT 7190:1997. Esses ensaios utilizam equipamentos com um custo elevado, necessitando ainda de pessoas treinadas para que o ensaio seja executado de forma correta. Além disso, os corpos de prova utilizados nos ensaios destrutivos não são reaproveitados em uso posterior.

Por outro lado, os ensaios não destrutivos são rápidos, práticos, e permitem, sobretudo, o reaproveitamento do material ensaiado. Os ensaios não destrutivos podem ser utilizados principalmente na caracterização de madeiras para posterior utilização em produtos industrializados de madeira para uso estrutural, como, por exemplo, a Madeira Lamelada Colada (sigla MLC), a Madeira de Lâminas Paralelas (LVL), e a Madeira Lamelada Colada Cruzada (CLT ou MLCC), os quais estão ganhando destaque no cenário brasileiro.

Existe, principalmente, a necessidade da validação dos métodos de ensaios não destrutivos, como por exemplo, a Técnica de Excitação por Impulso (TEI) para uso seguro na classificação estrutural da rigidez da madeira.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 FUNDAMENTOS

4.1.1 Madeira e alguns de seus produtos derivados

A madeira sendo um material natural e renovável, pode ser empregada em diversas áreas da construção civil, dentre elas: revestimento de paredes, esquadrias, forros, pisos, estruturas de pontes, em diversos tipos de cobertura, entre outras. Na indústria de papel e celulose também pode ser utilizada como matéria-prima de diversos tipos de papéis como por exemplo o papel de impressão, kraft e *tissue*, além de combustível para diversos tipos de caldeiras, na indústria de produtos derivados de madeira como chapas de fibras, de madeira compensada, aglomerada, entre outras (DIAS E LAHR, 2002).

Segundo Derikvand (2016), a madeira utilizada de forma estrutural possui limitações dimensionais, as quais podem comprometer sua aplicação. Essas limitações apresentam possibilidades de melhoria, sendo uma delas o uso da laminação, confeccionando produtos derivados da madeira como LVL (nome em inglês: Laminated Veneer Lumber), CLT (Cross-Laminated Timber), MLC (Glulam ou Glue Laminated Timber). Esses elementos industrializados citados têm sido mais difundidos e utilizados nos últimos anos para confecção de estruturas de edificações como também na indústria moveleira.

Desse modo, em particular, a MLC, tem se apresentado como uma das alternativas de elemento industrializado para a construção civil, e esta vem passando por um processo de melhoria contínua, com utilização de novas espécies de madeira, na busca de melhores propriedades físicas e mecânicas, para o produto final (BIANCHI, 2020).

4.1.2 Madeira de reflorestamento

No cenário atual, busca-se cada vez mais o desenvolvimento social e sustentável. Dentro deste contexto, a madeira de reflorestamento mostra-se como uma alternativa para sua utilização em estruturas. Isso se deve ao fato de a madeira ser um material ecologicamente correto, e com custo reduzido, devido a sua abundância no país. Segundo Zenid *et al.* (2009), o projeto de manejo florestal aprovado pelo IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis) é de fundamental importância para a utilização dos recursos naturais, vindos de florestas plantadas, de modo a promover uma cadeia produtiva e sustentável.

As florestas plantadas, devido à sua alta rotatividade, têm apresentado toras com diâmetros continuamente menores. Nesse sentido, existe uma busca constante por novos processos em que a madeira seja aproveitada e manejada da forma mais eficiente possível. O Brasil possui muitas florestas de rápido crescimento, que vêm sendo aprimoradas geneticamente, além de auxiliar na diminuição da concentração de CO₂ da atmosfera. Sendo assim, se a madeira for mantida na forma de móveis, estruturas para construções, e painéis, por mais tempo o gás carbônico se manterá preso, sendo o CO₂ um dos principais agentes do efeito estufa (PONCE, 1995).

Existem formas de melhorar as propriedades físico-mecânicas da madeira para que suas aplicações sejam mais confiáveis. Essas melhorias vêm sendo alcançadas através da confecção de painéis como CLT e compensado, além de vigas e outros elementos de MLC, sendo estes apenas alguns exemplos de elementos utilizados em estruturas de madeira (PIZZO, 2002).

Com uma grande competitividade no mercado de madeiras de reflorestamento, e o Brasil possui vantagens nesse aspecto. No ano de 2018, segundo o relatório do IBÁ (Indústria Brasileira de Árvores), promulgado em 2019, o setor florestal brasileiro gerou uma receita total de R\$ 86,6 bilhões. Além disso, colaborou com 1,3% do PIB (Produto Interno Bruto) e 6,9% do PIB industrial. Estima-se que entre os anos de 2020 e 2023, o setor de reflorestamento irá receber um investimento aproximado de R\$ 32,6 bilhões. O setor madeireiro coloca o país em destaque em relação ao mercado internacional de produtos florestais. É de vital importância manter seu crescimento em investimentos nesse setor (JUVENAL, 2002).

Segundo o relatório do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), o Brasil possui uma área plantada com mais de 9,8 milhões de hectares (ha), sendo 7,5 milhões de ha (76,2%) de Eucalipto e 1,9 milhões de ha (20,1%) de Pinus. Outros gêneros de madeira correspondem, neste contexto, a 3,6 mil ha (3,7%). Esses dados apresentam pouca variabilidade se comparados aos dados apresentados pelo IBGE desde 2014, com exceção das áreas destinadas ao plantio de outros gêneros que apresentaram uma queda em comparação com seus 4,2 mil ha plantados em 2015.

No crescimento da busca por matérias-primas renováveis e de rápida rotação, a silvicultura tem direcionado seus estudos para espécies de crescimento rápido, como por exemplo, os gêneros Pinus e Eucalipto. Nesse sentido, observa-se uma carência na diversidade desses estudos, para que seja possível uma maior variedade para à produção florestal.

4.1.3 Cedro australiano (*Toona Ciliata M. Roem*)

Com o auxílio do fomento florestal realizado na região Sudeste do Brasil, o Cedro Australiano, se consolidou no país após encontrar condições favoráveis para o seu crescimento, pois a temperatura média para seu melhor desenvolvimento está entre 20 a 26 °C, favorecendo seu rápido crescimento (PINHEIRO *et al.*, 2006). Entretanto, seu desenvolvimento genético apresenta variações visíveis, devido à sua taxa de crescimento que difere entre as plantações do mesmo gênero (SOUZA, 2009).

O Cedro Australiano (pertence à família Meliaceae), em função do seu rápido crescimento, é uma espécie plantada visando a utilização em projetos de estruturas e móveis. Esta espécie possui uma grande similaridade com árvores nativas nacionais, como, por exemplo, os cedros do gênero *Cedrella* e o mogno (*Swietenia macrophylla King*) (LORENZI *et al.*, 2003; PINHEIRO *et al.*, 2003).

O Cedro Australiano, é uma madeira cuja árvore pode alcançar 8 m de altura em apenas 3 anos, atingindo um diâmetro de 15 cm. Apesar de seu rápido crescimento, a espécie apresenta características de qualidade intermediária em comparação ao mogno, apresentando uma ótima rentabilidade. Além disso, o Cedro Australiano apresenta uma grande quantidade de extrativos, o que garante uma maior resistência a insetos xilófagos proporcionando uma elevada durabilidade natural para essa madeira (ARES E FOWNES, 2000; MANGLIAVORI *et al.*, 2003; SOMAVILLA, 2014).

Sendo uma espécie presente nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do Brasil, e de boa produtividade, o Cedro Australiano possui estrutura com características de madeiras nobres. Apresenta problemas de adaptação em regiões com temperaturas mais baixas e com a ocorrência de geadas (como a região Sul do Brasil), (NAVROSKI, 2017). O Cedro Australiano pode ser plantado em consonância com outras culturas.

Sendo uma madeira de coloração avermelhada, o Cedro Australiano ganha escurecimento com o tempo, e esta madeira apresenta uma densidade média de aproximadamente 0,306 g/cm³ (ou 306 kg/m³) com uma textura não muito refinada ao toque em função de sua grã levemente reversa, ainda que apresente certa uniformidade. As

características que possibilitam o seu uso em diversas aplicações incluem sua trabalhabilidade, durabilidade e resistência aos cupins. Tais características permitem que essa madeira possa ser empregada em produtos com necessidade de melhores acabamentos (NISGOSKI *et al.*, 2011). Segundo Trianoski (2014), o Cedro Australiano apresenta um valor

comercial elevado sendo considerada uma espécie com média resistência mecânica. Podemos observar na Figura 1, a madeira de Cedro Australiano.

Figura 1 - Cedro Australiano



Fonte: Nassur (2010).

4.1.4 Cedro indiano (*Acrocarpus fraxinifolius*)

Em decorrência de um aumento do consumo de matérias-primas renováveis, a madeira tem se destacado, aumentando assim suas possibilidades de mercado e levando os produtores a buscarem alternativas mais rentáveis e de rápido crescimento (THEBALDI *et al.*, 2015). Nesse processo, buscou-se introduzir no Brasil espécies já conhecidas em outros países, e que apresentassem um potencial adequado com a demanda esperada para aquelas espécies (VENTURIN *et al.*, 2014).

O Cedro Indiano, pode ser encontrado em florestas da região norte e do tipo mistas perenes em países como a Índia, Indonésia, Bangladesh, Nepal e Myanmar. Seu melhor desenvolvimento se dá entre temperaturas no intervalo de 19 a 28 °C, onde não existem ocorrências de geadas, tendo como vantagem o desenvolvimento em solos francos, argilosos, rasos e compactados (PINHEIRO *et al.*, 2003).

Apresentando-se como uma madeira de fibras curtas, relativamente dura, e com o cerne avermelhado, o Cedro Indiano possui baixo teor de lignina e um alto teor de extrativos totais. Possui rápido crescimento, sendo indicada para reflorestamento de curta rotação. Pode ser utilizada na confecção de móveis, na produção de celulose e em elementos construtivos

(FIRMINO *et al.*, 2015). Segundo Trianoski *et al.* (2011), o Cedro Indiano apresenta baixa estabilidade dimensional e resistência mecânica elevada.

Segundo Lorenzi (2003), uma das características mais interessantes dessa espécie é sua autopoda, que consiste na expulsão de suas próprias folhas senescentes. Uma vez que esse processo ocorre, um outro benefício é a formação de uma camada de folhas sobre o solo, gerando um fertilizante orgânico rico em nitrogênio, impedindo que o solo perca umidade beneficiando a árvore e as plantas que se encontram ao seu redor.

O Cedro Indiano atinge, em média, de 15 a 20 m de altura, e seu diâmetro pode variar de 30 a 50 cm. Sua semelhança física com árvores como a *Fraxinus excelsior* e *Juglans regia* faz com que a mesma seja utilizada como substituta de ambas na confecção de mobília, embalagens e na construção civil (PRADO *et al.*, 2003).

Apesar dessa espécie apresentar várias possibilidades de plantio e uma grande diversidade de aplicações, há poucos estudos com o Cedro Indiano, o que dificulta seu cultivo e aplicação no Brasil (VENTURIN *et al.*, 2014).

Tanto o Cedro Australiano como o Cedro Indiano (Figura 2), no Brasil, são encontrados na região sudoeste do estado de São Paulo.

Figura 2 - Cedro Indiano



Fonte: Vale do Cedro (2021).

4.1.5 Eucalipto grandis (*Eucalyptus grandis*)

O Eucalipto pertence à família Myrtaceae, e apresenta um bom desenvolvimento no Brasil, e essa adaptação levou à intensificação do seu plantio durante o século XX. Neste

período, o Eucalipto era utilizado para confecção de dormentes para ferrovias (PAES, 2002). Este grupo de árvores apresenta espécies variadas e com densidade variando entre 500 a 1000 kg/m³. Além disso, apresenta uma resistência mecânica considerada elevada, com uma alta durabilidade contra xilófagos devido ao seu cerne de alta densidade e acúmulo de extrativos elevado (ZENID *et al.*, 2009).

Segundo Silva (2002), daqui a algum tempo, as espécies que compõem o escopo da madeira de rápido crescimento irão ocupar grande parte do mercado da indústria da madeira, devido ao crescente aumento da demanda, em paridade com a pressão econômica, para maior lucratividade. O Eucalipto vem apresentando-se como uma matéria-prima de elevada gama de aplicações. Couto (1995) afirma que a variabilidade de aplicações do gênero Eucalipto o mantém em destaque, podendo apresentar potencial para o setor de painéis, moveleiro e produtos engenheirados (ou industrializados), contribuindo para a diminuição do desmatamento, visto que seu cultivo e colheita são planejados.

Em comparação com às madeiras de coníferas, o Eucalipto apresenta consideráveis vantagens, sendo que alguns consideram sua aparência mais atraente, além de apresentar maior rigidez e resistência, atingindo valores favoráveis para serem empregados em estruturas (HILLIS, 2000).

O custo da madeira de florestas naturais tem ficado cada dia mais elevado, o que acarreta na necessidade de melhor aproveitamento dos recursos florestais de cunho renovável. Por este motivo, mostra-se necessário o melhoramento das técnicas de usinagem para a indústria da madeira em relação à madeira de Eucalipto (COSTA, 1996). O cenário atual mostra que a busca por recursos renováveis e seu melhor aproveitamento só vem crescendo em 2020 sendo está uma alternativa que possivelmente se tornará uma obrigação em um futuro próximo.

O *Eucalyptus grandis* é uma espécie que vem sendo cultivada no Brasil há décadas, apresentando crescente cultivo devido à necessidade de suprir o setor de papel e celulose. Mas, devido à sua grande produção, este tipo de eucalipto foi empregado com êxito em setores energéticos, na produção de carvão vegetal e no setor de painéis (SILVA, 2002).

Embora esta espécie não apresente uma resistência muito elevada se comparada com outras espécies da mesma família, por exemplo, o *Eucalyptus saligna*, ainda assim o mesmo apresenta vantagem como a fácil trabalhabilidade, além de bom desempenho em se tratando de ancoragem por pregos e parafusos, além de grã uniforme, o que possibilita sua utilização na confecção de móveis (SERPA *et al.*, 2003). Segundo Dugmore (2019), esta madeira apresenta uma baixa estabilidade dimensional quando úmida e, por isso, o seu processo de

secagem deve ser acompanhado com cuidado para evitar problemas com rachaduras e torções. Por outro lado, quando esta madeira é processada corretamente e utilizada na confecção de MLC e CLT, esta apresenta uma ótima qualidade de colagem.

Figura 3 - Eucalipto Grandis



Fonte: Autoria própria (2021).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

A classificação da madeira pode ser feita do ponto de vista visual como também mecânica.

A classificação visual da madeira é um processo não destrutivo que busca escolher visualmente as peças de melhor qualidade no que se refere a presença de defeitos próprios e de secagem.

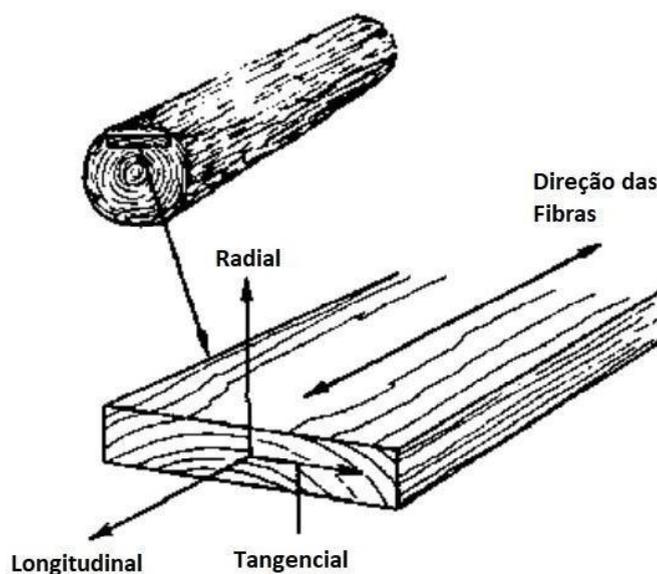
Geralmente, a classificação visual da madeira é feita com base em normas estrangeiras como, por exemplo, ASTM D4761-97, sendo essa classificação específica para madeiras de coníferas. No Brasil, o método de ensaio PN 02.126.010-001 é o mais atual, e está em consulta nacional na ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) como parte do projeto de revisão da ABNT NBR 7190. Este método de ensaio especifica os critérios para a classificação de peças de madeira de forma mecânica e visual. As recomendações deste documento são para peças de madeira serrada de folhosas e coníferas, provenientes de

florestas plantadas, que se destinam ao uso estrutural, assim atribuindo uma classe de resistência para cada peça.

A norma brasileira “ABNT NBR7190: 1997: Projeto de estruturas de madeira” apresenta recomendações para a determinação das propriedades mecânicas e físicas da madeira, seja ela de reflorestamento ou não. As recomendações são baseadas em estudos desenvolvidos com madeiras nativas (DIAS, 2000).

A caracterização da madeira é fundamental para madeiras de uso estrutural, sendo necessário o conhecimento do módulo de elasticidade, além dos valores de resistência. Deve-se analisar minuciosamente cada espécie de madeira utilizada devido à variabilidade das suas propriedades físicas e mecânicas que podem ocorrer no próprio lenho. Vale mencionar que a madeira, devido ao seu comportamento ortotrópico, apresentam diferentes propriedades mecânicas para cada uma das direções ortogonais: tangencial, longitudinal, radial (Figura 4) (RITTER, 1990).

Figura 4 - Direções ortogonais da madeira



Fonte: Ritter (1990).

Segundo Christoforo (2013), tratando-se dos ensaios de caracterização, duas principais propriedades mecânicas elásticas para o uso de vigas em estruturas são os módulos de elasticidade transversal e longitudinal. Os ensaios experimentais necessitam de uma base sólida e padronizada, e para que não haja divergência entre condições de ensaio, no Brasil, utiliza-se a ABNT NBR 7190: 1997, para a execução dos ensaios físicos e mecânicos (MATOS e MOLINA, 2016).

Dentre as propriedades relacionadas anteriormente, a ABNT NBR 7190:1997 possui em seu Anexo B um detalhamento dos ensaios propostos para a determinação das propriedades mecânicas elásticas e de resistência.

Para realizar caracterização físico-mecânica de espécies de madeira, a ABNT NBR 7190: 1997 recomenda três tipos de caracterização, sendo estas a caracterização completa, a mínima e a simplificada. Para espécies desconhecidas, a norma recomenda a caracterização completa, sendo, neste caso, necessária a realização dos ensaios: compressão, tração, cisalhamento e embutimento nas direções paralela e normal às fibras, para determinação das resistências e rigidezes, além das densidades básica e aparente. No caso de madeiras de espécies pouco conhecidas, recomenda a caracterização mínima que consiste na determinação das resistências à compressão, a tração e ao cisalhamento, na direção paralela às fibras, além das densidades básica e aparente. Para madeiras conhecidas recomenda o ensaio de compressão paralela às fibras para determinação da resistência e da rigidez nesta direção com utilização destes valores para estimar as outras propriedades de interesse, a partir de relações simplificadas propostas na mesma norma (DIAS, 2000; MATOS e MOLINA, 2016; BENIN, 2017).

O número de repetições de ensaios para a determinação de cada uma das propriedades da madeira segundo a ABNT NBR 7190:1997 são as seguintes: para a caracterização completa (não há indicação de número mínimo mais seria interessante aproximadamente 40 repetições); caracterização mínima 12 repetições; caracterização simplificada: mínimo de 06 repetições. Essas indicações são apresentadas no texto de revisão da ABNT NBR 7190:2021.

Segundo Dias e Lahr (2002), o ensaio destrutivo tem como característica a necessidade de máquinas específicas que costumam ser de grande porte e necessitam de manutenção periódica por técnicos especializados. Além disso, embora os ensaios destrutivos sejam a melhor maneira de se conhecer os valores das propriedades da madeira, não há possibilidade de aproveitamento do corpo de prova após o ensaio.

Como alternativa de ensaio, surgiram os ensaios não destrutivos, apresentando um menor custo e maior facilidade de execução. Segundo Molina (2017), a avaliação não-destrutiva (Ensaio não destrutivo - NDE) consiste no uso de métodos para a avaliação das propriedades sem comprometimento do uso final do material. A sigla mais comumente usada para se referir aos ensaios não destrutivos é NDT (em inglês, *non destructive tests*).

Como exemplo desses ensaios, tem-se também a classificação visual, que é considerada como um ensaio não destrutivo inicial devido à sua natureza de prever possíveis falhas em função da visualização de defeitos. Existem também outros ensaios não destrutivos

específicos para determinação das propriedades elásticas da madeira como o ultrassom e o ensaio de vibração longitudinal e transversal, que utilizam as frequências da madeira para aferir a sua rigidez (CARREIRA e CANDIAN, 2008). Além disso, vários outros ensaios não destrutivos são utilizados para a determinação das propriedades elásticas da madeira, dentre eles: a rigidez a flexão, flexão estática de três pontos, ondas de tensão, entre outros (MOLINA, 2017).

Os Métodos de ensaios não destrutivos vêm tornando-se cada vez mais populares, em função de sua elevada precisão, alcançando através das análises estatísticas, em média, uma resposta de 80% para o coeficiente de determinação R². Esses equipamentos apresentam um baixo custo e uma fácil operacionalidade quando comparados aos equipamentos para ensaios destrutivos (SEGUNDINHO, 2012).

4.2.1 Classificação visual

A classificação visual é uma ferramenta importante para a avaliação, inspeção e classificação de peças de madeira serradas para aplicações estruturais. Peças que não obtenham os requisitos necessários já podem ser destinadas a outras aplicações que se adequem melhor a sua classificação visual (CARREIRA, 2003). Nesse sentido, em particular, a classificação visual tem como função observar todas as faces das peças avaliadas, realizando um mapeamento dos possíveis defeitos que comprometam a integridade mecânica das peças (CALIL NETO, 2011).

Segundo Almeida (2013), a classificação visual auxilia na análise das nuances que uma espécie de madeira pode apresentar. Com isso, pode-se prever defeitos que comprometem a utilização da peça, levando a uma melhor precisão em sua aplicação.

O método de ensaio PN 02.126.010-001, que apresenta os critérios para a classificação visual da madeira, divide a classificação em madeiras de classe 1 as quais apresentam melhor qualidade, as de classe 2 que são intermediárias e as de classe 3 que são aquelas que apresentam o maior número de defeitos próprios e de secagem.

Para a classificação visual da madeira para a aplicação em elementos estruturais como MLC, LVL ou CLT, alguns defeitos são considerados mais graves e devem receber uma maior atenção, defeitos esses como: presença de medula, encurvamento, torcimento, encanoamento e presença de nós. Portanto, vários tipos de defeitos podem ser quantificados na classificação visual, sendo que os defeitos mais representativos em cada particular situação de uso da madeira podem ser avaliados.

- **Medula**

Segundo o método de ensaio PN 02.126.010-001, “não são admitidas” medulas (Figura 5) para os elementos estruturais. Segundo Albuquerque (2005), um dos fatores que influenciam na colagem da madeira e na resistência é a densidade, e quanto menor for a densidade maior será a porosidade. Em regiões de medula, onde a densidade é naturalmente menor, ocorre maior penetração do adesivo, podendo gerar uma linha de cola “faminta”, ou seja, a cola será toda absorvida pela madeira não ocorrendo a colagem e comprometendo a resistência mecânica da peça confeccionada.

Figura 5 - Medula

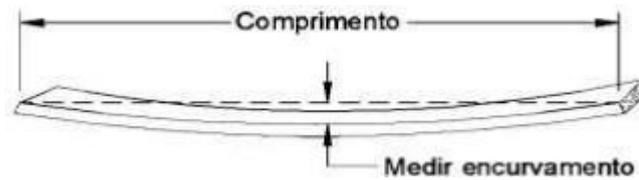


Fonte: Autoria própria (2021).

- **Encurvamento**

Uma peça encontra-se empenada quando suas duas extremidades estão mais elevadas se comparadas com seu eixo de menor inércia, como observado na Figura 6. Para a quantificação deste defeito, deve-se traçar uma linha reta de entre extremidades da madeira, de modo que a altura encontrada no centro peça perpendicular deve ser menor do que 8 mm, para cada 1 metro de comprimento da peça. Esse parâmetro não apresenta variação para coníferas e folhosas.

Figura 6 - Encurvamento

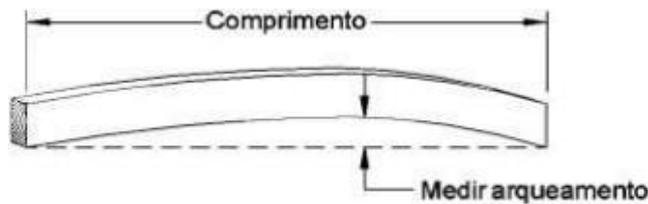


Fonte: ABNT NBR PN 02.126.010-001 (2013).

- **Arqueamento**

Similar ao encurvamento, o arqueamento é um empenamento que ocorre nas extremidades da peça em relação ao eixo de maior inércia. Traça-se uma linha reta entre as extremidades mais elevadas e o local que possuir a maior altura em relação a linha tracejada será o parâmetro de medição, como pode ser observado na Figura 7. Este vão deverá ser menor do que 8 mm, para cada 1 metro de comprimento da peça. Esse parâmetro não apresenta variação para coníferas e folhosas.

Figura 7 - Arqueamento

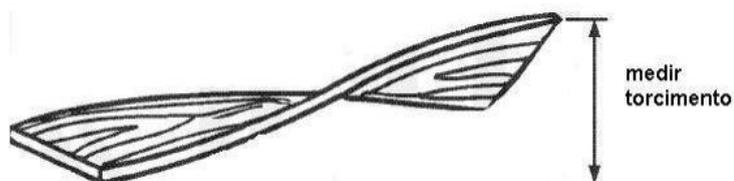


Fonte: ABNT NBR PN 02.126.010-001 (2013).

- **Torcimento**

O torcimento ocorre quando a madeira empena nos dois lados de menor inércia, apresentando um formato espiralado, como observado na Figura 8. Esse defeito não pode apresentar uma altura entre torções maior que 1 mm para cada 25 mm de comprimento.

Figura 8 - Torcimento

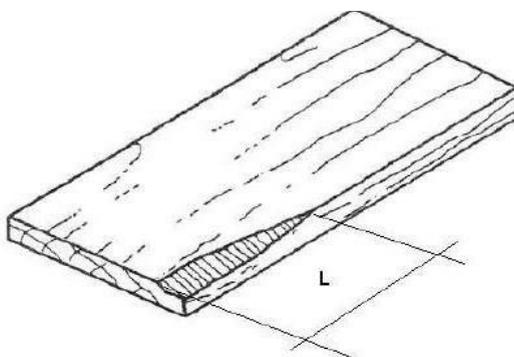


Fonte: ABNT NBR PN 02.126.010-001 (2013).

- **Esmoado**

É a falta de madeira na região das quinas da peça, como observado na Figura 9. Essa falta de madeira pode ser advinda de usinagem, batidas ou defeitos próprios da madeira. Para o defeito ser aceitável, não deve ter dimensão “L” maior do que $\frac{1}{4}$ da espessura ou largura da peça. Em relação ao comprimento, não apresenta nenhuma restrição.

Figura 9 - Esmoado



Fonte: ABNT NBR PN 02.126.010-001 (2013).

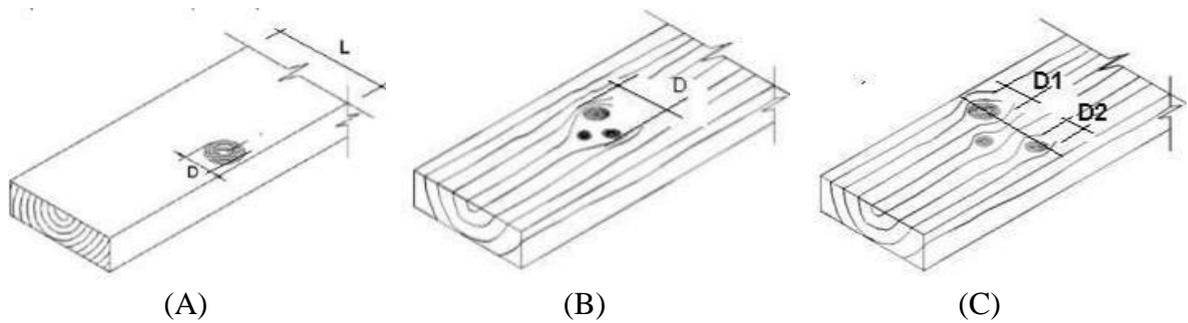
- **Nós**

Segundo Schilling (1998), os nós não surgem com a intensidade da desrama, e sim consistem num defeito intrínseco que varia de acordo com a espécie e bioma de sua plantação.

De acordo com o método de ensaio PN 02.126.010-001, os nós que se encontram nas bordas da madeira devem ser desconsiderados durante a análise, considerando apenas os nós que se encontram nas faces de maior largura. Caso algum desses nós estiver solto, e passante, é recomendada a não utilização desta peça para fins estruturais.

O procedimento para se medir os nós está ilustrado na Figura 10 (a). No caso de nós muito próximos, onde não é visível a separação das fibras da madeira, mostra-se necessária a consideração do conjunto de nós, como observado na Figura 10 (b). Na Figura 10 (c), pode-se observar um caso diferente, no qual três nós encontram-se agrupados, mas a fibra entre eles é visível. Neste caso, deve-se medir cada nó individualmente, sendo o diâmetro total deste defeito igual a soma do diâmetro de cada nó.

Figura 10 - Nós: (a) individual; (b) em conjunto; (c) individuais próximos

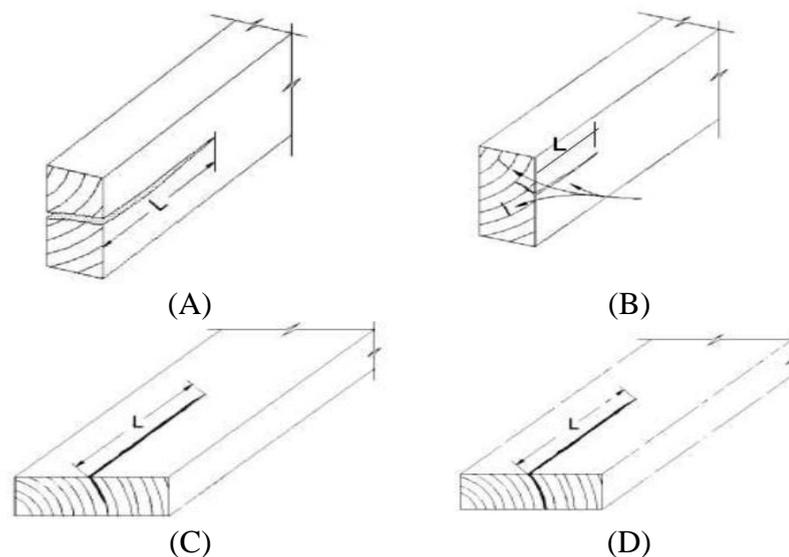


Fonte: Adaptado de ABNT NBR PN 02.126.010-001 (2013).

- **Fissura**

Tratando-se de fissuras, trata-se como as passantes, Figura 11 (a); não passantes Figura 11 (b); rachas não passantes e passantes, Figuras 11 (c) e 11 (d), respectivamente. Nesse sentido, fissuras e rachas passantes são permitidas apenas se encontrarem-se nas extremidades e o comprimento (L) da fissura não deve ser maior que a largura toda peça. Para fissuras e rachas não passantes, o L da fissura não pode ser maior do que 1,0 m e sua medida deve ser de até $\frac{1}{4}$ do comprimento da peça avaliada.

Figura 11 – Fissuras: (a) passante; (b) não passante; (c) racha não passante; (d) Racha passante



Fonte: Adaptado de ABNT NBR PN 02.126.010-001 (2013).

Em casos de avaliação de patrimônios tombados que contêm madeira, as análises visuais são utilizadas para verificar trincas e locais que possuem apodrecimento e ataque biológico (SILVA, 2010). De acordo com Segundinho (2013), a classificação visual é utilizada para a

retirada de defeitos da madeira ensaiada, diminuindo o número de variáveis que podem interferir na resistência intrínseca da madeira.

Alguns autores como Bianchi (2020), Santos (2019), Gomes (2018) e Nogueira (2017), utilizaram o método de ensaio PN 02.126.010-001, como base para a verificação das condições de uma peça de madeira para a confecção de MLC estrutural, visando realizar o controle de qualidade das indústrias produtoras de madeira engenheirada.

As Tabelas 1 e 2, apresentam os requisitos necessários de classificação para os gêneros Pinus e Eucalipto. As referidas tabelas sugerem diversos parâmetros a fim de otimizar a utilização da madeira de forma segura, garantindo a qualidade do material.

Tabela 1 - Critérios para análise visual de madeira de coníferas

Defeito	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Medula	Não se admite		
Nós	1/4	1/2	2/3
Inclinação das fibras (mm/mm)	1:9	1:6	1:3
Fissuras não passantes (m)	O comprimento das fissuras não deve ser maior que 1 m e nem $\frac{1}{4}$ do comprimento da peça.		
Fissuras passantes (m)	Somente se as fissuras passantes nos extremos e o comprimento não deve ser maior do que a largura da peça.		
Encurvamento/arqueamento (mm)	Menor que 8 mm para cada 1 m de comprimento		
Torcimento (mm/m)	Menor que 1 mm para cada 25 mm de comprimento		
Encanoamento	Sem restrições		
Esmoadado (mm/mm)	Transversalmente menor que $\frac{1}{4}$ da espessura ou largura da peça. Sem restrições para o comprimento		
Ataques biológicos	Não de admite zonas atacadas por fungos causadores de podridão. Admitem-se zonas atacadas por fungos cromógenos. Admitem-se orifícios causados por insetos com diâmetro inferior a 2 mm.		
Madeiras de reação (mm.mm ⁻¹)	Menor ou igual a 1/5		
Outros	Danos mecânicos, presença de bolsa de resina e outros defeitos se limitam por analogia com alguma característica similar.		

Fonte: ABNT NBR PN 02.126.010-001 (2013).

Tabela 2 - Critérios para análise visual de madeira de folhosas

Defeito	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Medula	Não se admite		
Nós	1/5	1/3	1/2
Inclinação das fibras (mm/mm)	1:12	1:9	1:6
Fissuras não passantes (m)	O comprimento das fissuras não deve ser maior que 1 m e nem ¼ do comprimento da peça.		
Fissuras passantes (m)	Somente se as fissuras passantes nos extremos e o comprimento não deve ser maior do que a largura da peça.		
Encurvamento/arqueamento (mm)	Menor que 8 mm para cada 1 m de comprimento		
Torcimento (mm/m)	Menor que 1 mm para cada 25 mm de comprimento		
Encanoamento	Sem restrições		
Esmoadado (mm/mm)	Transversalmente menor que ¼ da espessura ou largura da peça. Sem restrições para o comprimento		
Ataques biológicos	Não de admite zonas atacadas por fungos causadores de podridão. Admitem-se zonas atacadas por fungos cromógenos. Admitem-se orifícios causados por insetos com diâmetro inferior a 2 mm.		
Madeiras de reação (mm.mm ⁻¹)	Menor ou igual a 1/5		
Outros	Danos mecânicos, presença de bolsa de resina e outros defeitos se limitam por analogia com alguma característica similar.		

Fonte: ABNT NBR PN 02.126.010-001 (2013).

Nos itens seguintes são apresentadas as principais informações sobre os ensaios não destrutivos mais comuns para a caracterização da rigidez da madeira.

4.2.2 Caracterização não destrutiva da rigidez da madeira

Os ensaios realizados através de técnicas não destrutivas proporcionam a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico. Equipamentos como stress wave, ultrassom, e vibração transversal são empregados nesse tipo de teste (BODIG, 2001; GONSALVES *et al.*, 2011; SONA, 2020).

O *Stress wave* é o método das ondas de tensão, onde uma onda é induzida através de um impacto, que se inicia em uma das extremidades do corpo de prova ensaiado. Esta onda propaga-se, tendo como principais fontes de informação a velocidade de transmissão e a atenuação que o material ensaiado vai permitir, sendo utilizado para uma visualização

espectral do material ensaiado, podendo-se verificar possíveis falhas e vazios (Xin *et al.*, 2020).

Para realizar ensaios não destrutivos com o equipamento de ultrassom é necessário transdutores que apresentem frequências maiores do que 20 kHz, para que o tempo de propagação de onda seja medido com precisão. Segundo Calegari (2006), a propagação de ondas ocorre por meio de impulsos elétricos, que são convertidos em ondas elásticas, verificando as distâncias e o tempo que a onda levou para percorrer o CP.

No ensaio de flexão estática de três pontos, uma força é empregada no centro do vão do CP, sem que o mesmo se rompa e o deslocamento (flecha) do corpo de prova é medido no ponto de aplicação da força, onde os dados colhidos são aplicados em equações sugeridas pela ABNT NBR 7190:1997 para determinação da rigidez do material.

Segundo Cossolino *et al.* (2009), dentre os ensaios mais utilizados um que vem ganhando destaque a cada dia é a Técnica de Excitação por Impulso (TEI), que utiliza o equipamento sonelastic, mas que ainda foi pouco explorado no país. Outro ensaio não destrutivo também bastante utilizado pela boa qualidade dos resultados é o de Vibração Transversal.

Como documento normativo para embasar o equipamento que considera a técnica de excitação por impulso, tem-se a ASTM E 1876:15 (*Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*). Esta norma indica os procedimentos para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico (Ed) e da frequência (Hz) do material estudado. Esta técnica de ensaio utiliza a frequência a madeira, que é obtida através de um impacto mecânico na extremidade do material, como pode-se observar na Figura 12. Os dados do ensaio são captados por um sistema de aquisição de dados acoplado a um software a partir do uso de um notebook e de um microfone.

Figura 12 - Método de ensaio de excitação por impulso – Equipamento Sonelastic

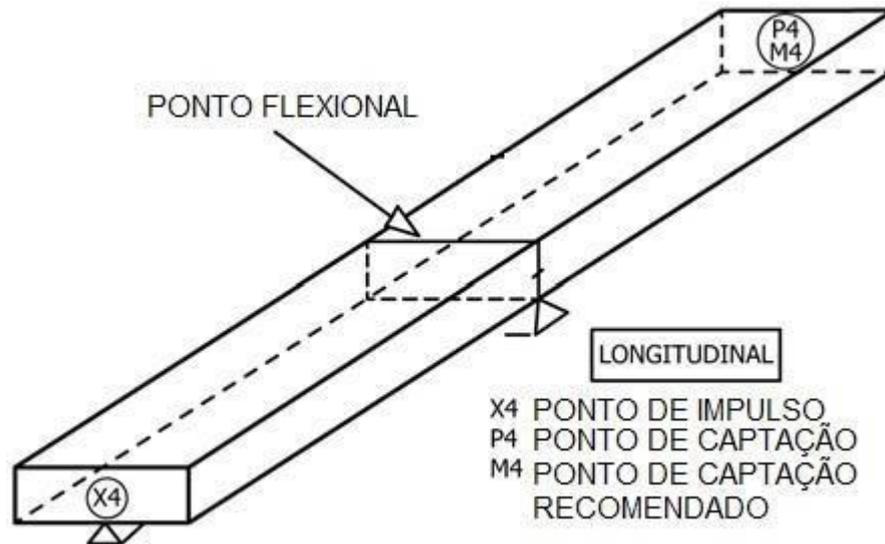


Fonte: ATCP (2011).

- **Ensaio não destrutivo longitudinal**

Segundo a norma ASTM E 1876:15, para a obtenção do módulo de elasticidade longitudinal (E) utilizando-se o Sonelastic deve-se seguir o procedimento de ensaio apresentado de forma resumida na Figura 13.

Figura 13 - Recomendação de ensaio para obtenção do módulo de elasticidade longitudinal



Fonte: Adaptado de ASTM E 1876 (2015).

Para o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal (E_{dL}), é utilizada a Equação (1), como se segue:

$$E_{dL} = 4mf_1^2 \left(\frac{L}{btK} \right) \quad (1)$$

Onde:

E_{dL} = módulo de elasticidade longitudinal [GPa]; m = massa da amostra [g];

f_1 = frequência longitudinal [Hz];

L = comprimento da amostra [mm];

b = largura da seção transversal [mm];

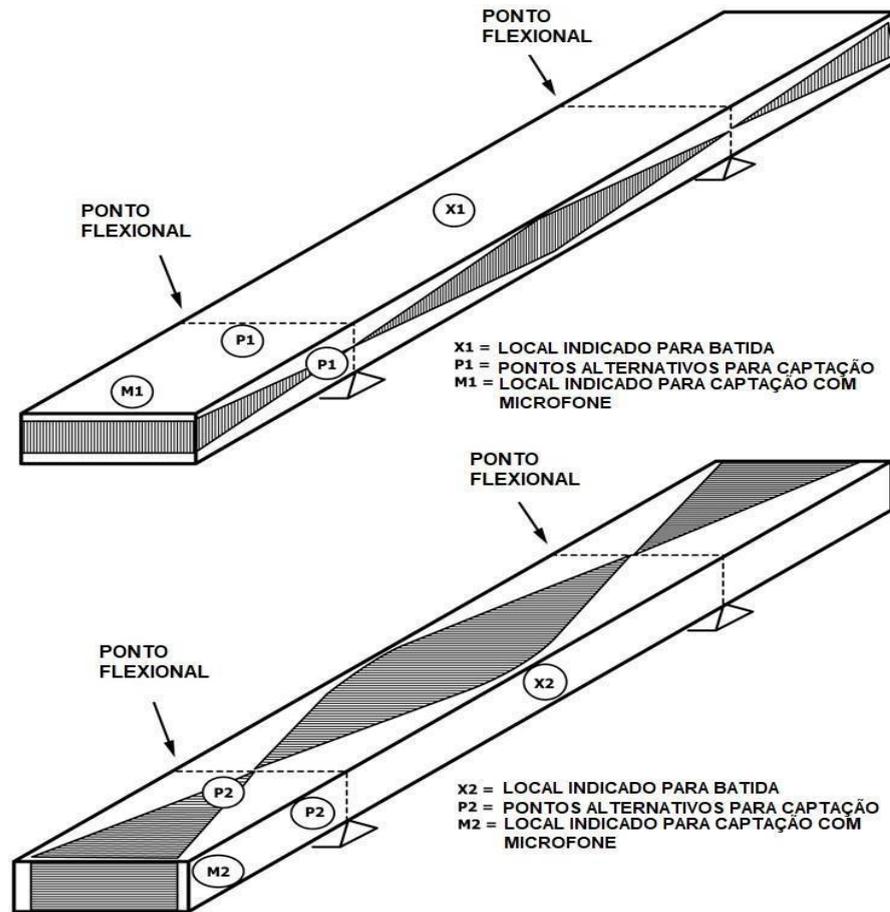
t = altura da seção transversal [mm];

K = coeficiente de correlação entre as dimensões da amostra e os coeficientes de Poisson.

- **Ensaio não destrutivo flexional**

Segundo a norma ASTM E 1876:15, para a obtenção do módulo de elasticidade flexional (E_{df}) deve-se seguir o procedimento de ensaio apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Recomendação de ensaio para obtenção do módulo de elasticidade flexional (E)



Fonte: Adaptado de ASTM E 1876: (2015).

Para o cálculo do módulo de elasticidade flexional (E_{df}), é utilizada a Equação (2), encontrada na ASTM E 1876:15, e utilizada por *softwares* de ensaio não destrutivo de excitação por impulso que realizam o cálculo desse módulo.

$$E_{df} = 0,9465 \left(\frac{mf_f^2}{b} \right) \left(\frac{L^3}{t^3} \right) T_1 \quad (2)$$

Onde:

E_{dF} = módulo de elasticidade flexional [GPa];

m = massa da amostra [g];

f_f = flexional [Hz];

L = comprimento da amostra [mm];

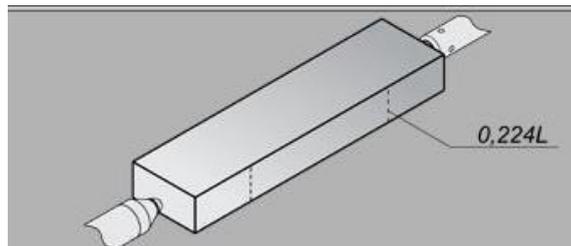
b = largura da seção transversal [mm];

t = é a altura da seção transversal [mm];

T_1 = Fator de correção para o modo de flexão fundamental para levar em conta a espessura finita da barra, coeficiente de Poisson.

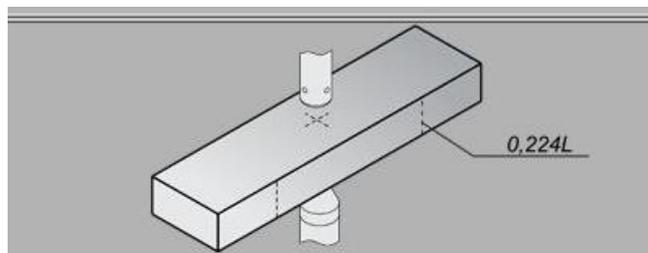
Para obtenção do E_{dL} e E_{dF} , utiliza-se métodos de ensaio distintos que estão apresentados de forma ilustrativa no *software* Sonelastic. Pode-se observar, nas Figuras 15 e 16, recomendações de ensaio para a obtenção dos respectivos módulos de elasticidade longitudinal (E_{dL}) e flexional (E_{dF}).

Figura 15 - Ilustração da solicitação no CP, para obtenção do E_{dL}



Fonte: Software Sonelastic (2021).

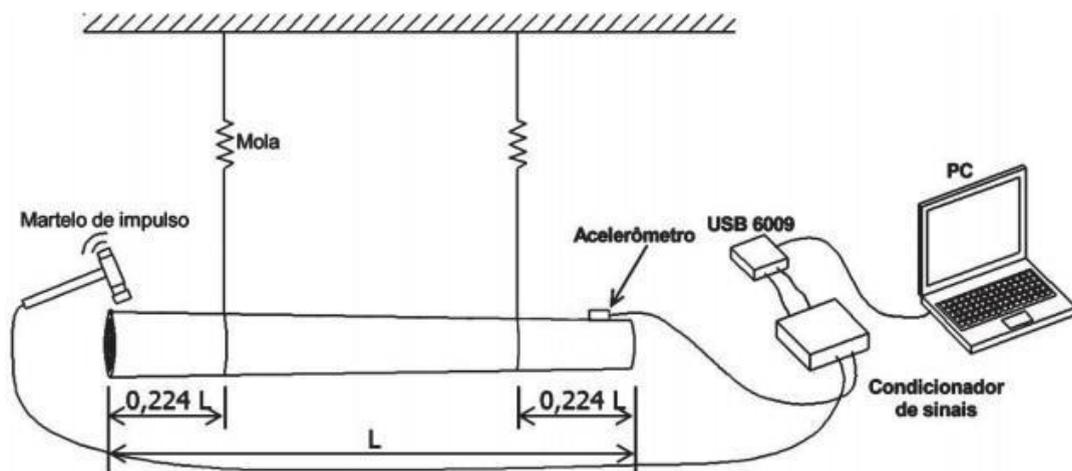
Figura 16 - Ilustração da solicitação no CP, para obtenção do E_{dF}



Fonte: Software Sonelastic® (2021).

Segundo Carreira (2011), a avaliação visual possui uma lacuna, ou seja, a impossibilidade de analisar a parte interna da peça avaliada. Nesse sentido, é recomendada uma avaliação visual, acompanhada de uma Ensaio Não Destrutiva (NDE). Para a realização do ensaio de excitação por impulso flexional, a tora de madeira foi içada com duas molas em seus pontos nodais, como pode-se observar na Figura 17. Os resultados obtidos, neste caso, apresentaram boa correlação com os resultados obtidos através do ensaio de flexão estática.

Figura 17 - Método de ensaio alternativo, para obtenção do E_{dF}



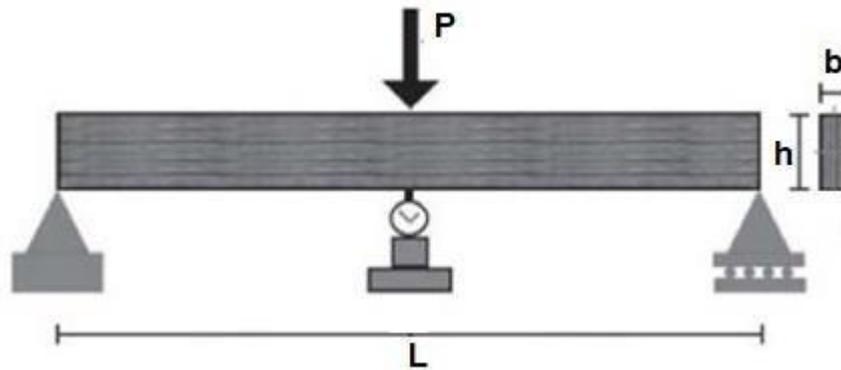
Fonte: Carreira (2011).

O *software* Sonelastic, em consonância com a ASTM E 1876:15, propõe diversas soluções para obtenção das propriedades mecânicas da madeira, utilizando o princípio da excitação por impulso. Esse método tem grande valia devido a sua rápida execução e ao manuseio intuitivo do *software*, visto que a interface do mesmo é autoexplicativa, demonstrando o posicionamento da peça ensaiada para a obtenção do módulo almejado.

- **Ensaio de flexão estática em três pontos**

O ensaio de flexão estática é realizado por uma máquina universal de ensaios. Este ensaio consiste na aplicação de uma carga “P”, geralmente de forma concentrada no meio do vão, dentro do regime elástico, flexionando-a até a ruptura, como pode-se observar na Figura 18. O valor do módulo de elasticidade (E_M) pode ser obtido a partir da Equação (3):

Figura 18 - Ensaio de Flexão Estática



Fonte: Adaptada de Christoforo (2013).

$$E_M = \left(\frac{PL^3}{48FI} \right) \quad (3)$$

Onde:

E_M = módulo de elasticidade das lamelas [MPa];

P = força no trecho linear da curva [MPa];

L = distância entre apoios [mm];

F = flecha correspondente à força P [mm];

I = momento de inércia [mm⁴].

4.2.3 Caracterização destrutiva da madeira

Segundo Calil Júnior *et al.* (2003), no âmbito estrutural, a madeira destaca-se devido a sua origem renovável, e apresenta uma relação resistência/peso que facilita sua aplicação em estruturas, podendo ter uma resistência mais elevada do que o aço.

A realização dos estudos da caracterização mecânica da madeira é de suma importância para sua aplicação mais eficiente, para que espécies de reflorestamento possam suprir aplicações de madeiras nativas, no quesito de resistência, maximizando a qualidade e a eficiência de cada peça de madeira utilizada.

Os estudos nacionais e internacionais sobre as propriedades mecânicas da madeira vêm sendo realizados por diversos pesquisadores. No caso do Brasil, atualmente, esses estudos são, em sua grande maioria, relacionados às madeiras de reflorestamento com foco nas diferentes características da madeira, como lenho adulto e juvenil (BALLARIN e PALMA, 2003;

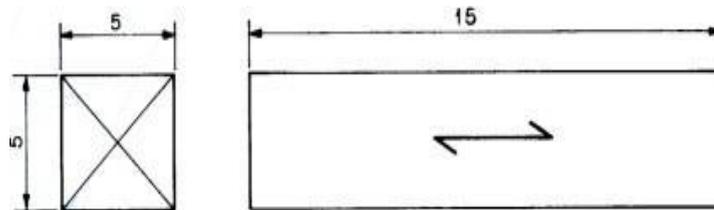
TREVISAN, 2017), nas diferenças entre espécies, madeiras de mesma espécie vindas de regiões diferentes (BORTOLETTO JR., 2008; AQUINO, 2019) e na qualidade da madeira de forma geral (OLIVEIRA, 2008; MODES, 2019).

Como uma forma de padronizar ensaios mecânicos destrutivos da madeira, utiliza-se o Anexo B da norma ABNT NBR 7190:1997, o qual também está incluído em uma proposta de método de ensaio relativo à versão de revisão ABNT NBR 7190:2021, atualmente em consulta nacional. Nos ensaios destrutivos uma força aplicada sobre uma peça de madeira até sua ruptura parcial ou total, para a obtenção de suas propriedades mecânicas. Além da determinação das propriedades mecânicas da madeira o Anexo B da ABNT NBR 7190 :1997 traz recomendações para a determinação de algumas propriedades físicas da madeira. Alguns dos principais ensaios recomendações pelo Anexo B, os quais tem importância para esta pesquisa, são relacionados nos itens seguintes:

- **Ensaio de compressão paralela às fibras**

O Anexo B da ABNT 7190:1997 propõe as dimensões do corpo de prova (CP) para a determinação do ensaio de compressão paralela às fibras (f_{c0}), como pode-se observar na Figura 19, com dimensões apresentadas em centímetros.

Figura 19 - Corpo de prova para ensaio de resistência à compressão paralela às fibras



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Pode-se observar, através da Equação (4), como é obtida a resistência à compressão paralela às fibras.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (4)$$

Onde:

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras da madeira [MPa];

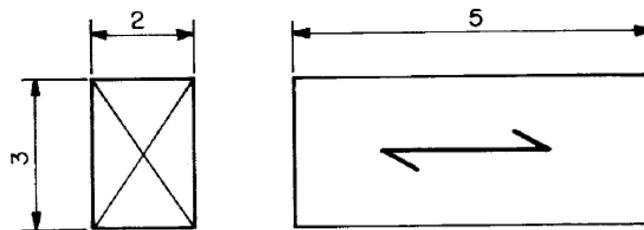
$F_{c0,max}$ = força de compressão máxima aplicada ao CP [N];

A = área inicial da seção transversal que sofre compressão [mm²].

- **Umidade e densidade aparente**

O Anexo B da ABNT 7190:1997 contém dimensões de CPs para a determinação da densidade aparente e umidade, como pode-se observar na Figura 20, com dimensões apresentadas em centímetros. A Equação (5) apresenta como é feita a obtenção do teor de umidade (U%) a partir de massa inicial e massa seca do CP. As propriedades mecânicas da madeira devem ser sempre referenciadas para um determinado nível de umidade e madeiras com maior densidade tendem a apresentar maiores valores para as propriedades mecânicas.

Figura 20 - CP para determinação densidade aparente e da umidade da madeira



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} * 100 \quad (5)$$

Onde:

m_i = massa inicial da madeira [g];

m_s = massa da madeira seca [g].

A Equação (6) é utilizada para cálculo da densidade aparente (ρ_{ap}) quando o CP atinge o U% igual a 12%.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (6)$$

Onde:

ρ_{ap} = densidade aparente [g/cm³];

m_{12} = massa do CP com teor de umidade de 12% [g];

V_{12} = volume do CP com teor de umidade de 12% [g].

As propriedades mecânicas da madeira obtida por ensaios destrutivos, são fundamentais para a caracterização da madeira, os quais demandam um tipo específico de CP. Muitas vezes, a amostragem é inadequada, sendo confeccionada por meio de corpos de prova de regiões menos favoráveis, sem defeitos, não representando o verdadeiro comportamento do material. A caracterização por métodos não destrutivos mostra-se mais eficaz, sem a necessidade da confecção de corpos de prova específicos e possibilita a utilização das peças após seu ensaio e considerando-se inclusive os defeitos próprios e de secagem durante a caracterização (ROSS *et al.*, 1994).

4.3 ESTUDOS DESENVOLVIDOS NO BRASIL E NO EXTERIOR SOBRE CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA PELA TÉCNICA DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO (TEI)

Cossolino *et al.* (2009) estudaram a influência da variação dos apoios na resposta do módulo de elasticidade de madeiras da espécie *Pinnus oocarpa*. Foram utilizadas 60 vigas, sendo 30 com dimensões de 4 x 20 x 200 cm e outras 30 com dimensões de 4 x 24 x 300 cm. Todas as vigas foram ensaiadas de forma não destrutiva com variação da distância entre apoios, com apoios inicialmente nas extremidades e deslocando-se 5 vezes de forma espelhada até chegarem ao centro da peça. Posteriormente, a peça foi ensaiada com toda sua superfície em contato com o chão. Para a variação de apoio, o desvio padrão obtido foi de 0,1%. Em seguida as vigas foram ensaiadas de forma destrutiva com o ensaio de flexão estática, onde obteve-se o módulo de elasticidade E_M , e foram comparados os módulos obtidos entre os dois ensaios além de ser realizada a regressão linear entre E_d e E_M que apresentou o valor de $R^2 = 0,89$ para o coeficiente de correlação. Concluíram que os apoios não interferiram diretamente na obtenção do módulo de elasticidade dinâmico longitudinal e que E_d e E_M , não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si.

Segundinho *et al.* (2012), avaliaram 24 vigas de *Eucalyptus sp.* com dimensões 4 x 6 x 200 cm, 14 vigas de *Pinus oocarpa* com dimensões de 4,5 x 9 x 230 cm e mais 30 pranchas

com dimensões de 4 x 24 x 201 cm e 30 pranchas com dimensões de 4 x 24 x 305 cm, ambas de madeiras de *Pinnus oocarpa*. Foram realizados ensaios não destrutivos utilizando-se o aparelho Sonelastic e em seguida, foram realizados os ensaios destrutivos de flexão estática para comparação dos resultados. Os módulos de elasticidade obtidos foram analisados estatisticamente verificando-se que a regressão linear entre E_d e E_M apresentou um R^2 próximo de 1, indicando, portanto, que não existiram diferenças estatísticas para módulos de elasticidade obtidos entre os dois métodos de ensaio.

Lima Junior (2016) estudou a madeira de *Eucalyptus grandis*, ensaiando 40 CPs com dimensões de 5 x 5 x 115 cm e comparou os resultados obtidos com o ensaio não destrutivo do qual utilizou-se do *software* Sonelastic, com os resultados obtidos com o ensaio destrutivo, utilizando o ensaio de flexão estática. Com a comparação estatística entre E_d e E_M foi obtido um R^2 de 0,85, mostrando que a utilização da técnica de excitação por impulso, apresentou alta eficácia para a caracterização de peças de madeira.

Faria (2019) utilizou-se previamente do Ensaio de Excitação por Impulso para a pré-classificação de 80 lamelas com dimensões de 6,0 x 1,5 x 120,0 cm, de madeira de *Toona ciliata* (Cedro Australiano), para a confecção de MLC. Obteve valores para a rigidez da madeira condizentes com os valores encontrados na literatura. Como conclusão do estudo foi observado que a classificação de lamelas com métodos não destrutivos mostrou-se eficaz visto que a rigidez final do elemento de MLC superou os resultados encontrados na literatura.

Carrasco (2017) analisou 29 espécies distintas de madeira, e para isso foram confeccionados 29 CPs isentos de defeitos. Para execução dos ensaios, utilizou-se o *software* Sonelastic e foram obtidos os módulos de elasticidade dinâmicos longitudinal (E_d) e comparados com os valores obtidos através do ensaio destrutivo de flexão estática, obtendo-se através da análise de regressão linear um $R^2 = 0,98$.

Ross *et al.* (1991) realizaram o ensaio não destrutivo de vibração transversal em 30 vigas de *Spruce-Pine-Fir*. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados de flexão estática, chegando-se em um valor de R^2 de 0,99, ou seja, uma ótima correlação, de modo a validar o método estudado.

Navickas (2015) avaliou a mudança do módulo de elasticidade após o tratamento térmico. Foram utilizados 20 CPs de madeira de *Picea abies* e 20 CPs da madeira de *Pinus silvestres*, com dimensões de 2,0 x 2,0 x 31,5 cm, submetidas ao tratamento térmico a temperatura de 190° com duração entre 1 e 3 horas. Foi utilizado como método de verificação do MOE o ensaio não destrutivo de vibração transversal, indicando que alguns pesquisadores

pelo mundo, já estão adotando como padrão de obtenção do módulo de elasticidade, métodos de ensaio não destrutivos.

Segundinho (2017) estudou a precisão do ensaio de vibração transversal utilizando *Pinus sp.* recém cortado para verificar se a caracterização não destrutiva se mostrava sensível à umidade do material. Foram utilizadas 20 vigas com 5 cm x 10 cm x 200 cm, que foram confeccionadas a partir de árvores recém abatidas. Concluiu-se que a mesma variação do ensaio não destrutivo ocorreu com o ensaio mecânico, mostrando que o ensaio de vibração transversal foi eficiente para as madeiras com teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras segundo a ABNT NBR 7190:1997, ou seja, $U = 25\%$.

Carreira (2011) verificou o módulo de elasticidade dinâmico na flexão de 10 toras de *Eucalyptus citriodora*, com dimensões de aproximadamente 4,5 metros de comprimento e diâmetro aproximado de 16 cm, destinadas à utilização em estruturas. Para análise não destrutiva foi utilizada a técnica de vibração transversal, na qual os resultados obtidos foram comparados com os módulos de elasticidades obtidos com o ensaio de flexão estática, alcançando um valor de $R^2 = 0,89$.

Carreira *et al.* (2003) avaliaram a correlação linear entre os módulos estático, utilizando flexão estática de três pontos e o módulo dinâmico, utilizando o ensaio de vibração transversal de 600 peças de madeira de *Pinus ssp.* com dimensões aproximadas de 3,5 x 12,5 x 260 cm. O coeficiente R^2 encontrado foi de 0,98 e concluíram que a vibração transversal se mostrou estatisticamente compatível para correlacionar a rigidez à flexão.

Green *et al.* (2004) ressaltam que o principal padrão da escolha da madeira para construção é o critério de análise visual, no qual busca-se agrupar cada peça de madeira em classes e defeitos para uma determinada finalidade. Mas como desvantagem, não é possível, com este método, avaliar o interior da peça. Nesse sentido, estudaram o comportamento de 120 toras mediante ao ensaio de vibração transversal. Em comparação com o MOE obtido no ensaio de flexão estática, foi obtido um R^2 de 0,95, indicando que o cenário ideal é a combinação da avaliação visual com a avaliação mecânica não destrutiva, visando obter um MOE mais elevado para madeiras que apresentem menos defeitos aparentes.

As *et al.* (2020) avaliaram peças estruturais de *Spruce-Pine-Fir* que foram classificadas visualmente antes de sua aquisição. O teor de umidade (TU) obtido mediante a secagem foi de 10%. Avaliaram, em seguida, a relação do módulo de elasticidade dinâmico (obtido através de TEI) com o módulo de elasticidade obtido através do ensaio destrutivo de flexão estática. O valor de R^2 obtido foi de 0,96, e não existiram diferenças estatísticas entre os métodos utilizados.

A ABNT NBR 7190:1997 passou por processo de revisão e seu texto principal revisado, ABNT NBR 7190:2021, propõe nos documentos “métodos de ensaio”, em particular, no documento na PN 02.126.010-001, as recomendações para classificação mecânica e visual da madeira.

Santos (2019) analisou a madeira de *Pinus spp* com base na PN 02.126.010-001, comparando os resultados não destrutivos com a classificação visual. Devido à baixa densidade do *Pinus spp.*, as amostras foram alocadas em classes de resistências baixas, mas com o auxílio ensaio não destrutivo o E_d obtido pelo método de vibrações longitudinais, apresentou-se como propriedade utilizada para a obtenção da classe de resistência. Outra influência direta na classe de resistência, foram as dimensões dos nós e a classificação visual que influenciaram diretamente na resistência das peças. Os resultados obtidos seguiram a tendência de classificação visual, pois quanto maior foi a classificação, maior foi o módulo de elasticidade dinâmico da peça. Este autor ainda ressalta que foi possível, com análise visual, observar a porção de lenho juvenil, esperando-se uma menor resistência em madeiras de rápido crescimento.

Bianchi (2020) utilizou a PN 02.126.010-001 para a classificação visual em consonância com análise não destrutiva de lamelas de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*, para a confecção de vigas de MLC. Foram alcançados resultados satisfatórios, indicando a eficácia da utilização do método da análise visual, pois durante o processo, algumas lamelas foram descartadas por não atenderem os requisitos mínimos, potencializando os resultados obtidos.

Molina et al. (2019) avaliaram lamelas de madeiras de classe C40 com base em ensaios não destrutivos de excitação por impulso em relação a ensaios de flexão estática obtendo coeficiente de correlação $R^2 = 0,55\%$ quando não é levada em conta a classificação visual da madeira.

4.4 CONCLUSÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com base na revisão de literatura realizada até o momento observou-se que os ensaios não destrutivos têm ganhado a atenção dos pesquisadores por apresentarem bons resultados de rigidez associados aos resultados dos testes destrutivos.

Além disso, os testes não destrutivos utilizam equipamentos mais baratos que os testes destrutivos e os ensaios são realizados com maior rapidez, possibilitando que os mesmos sejam utilizados industrialmente para a classificação mecânica da rigidez da madeira.

Existem vários tipos de ensaios não destrutivos utilizados para determinação da rigidez da madeira, dentre os quais podem ser citados: vibração transversal excitação por impulso, ondas de tensão entre outros.

Vários ensaios já foram realizados envolvendo a técnica de excitação por impulso, mas ainda existem dúvidas quanto ao módulo de elasticidade fornecido pelo equipamento como resposta do ensaio e como deve ser o tipo de sollicitação no elemento ensaiado para obtenção da rigidez desejada.

A maior parte dos trabalhos avaliados na literatura não utilizam a classificação visual associada à classificação não destrutiva para a determinação da rigidez da madeira.

A classificação visual, em sua maioria, é utilizada para madeiras do tipo conífera. Nesse sentido, o método de ensaio PN 02.126.010-001 propõe a avaliação visual para madeiras de folhosas. É necessária a avaliação do método de ensaio proposto pelo projeto de revisão da ABNT NBR 7190:2021, ou seja, método PN 02.126.010-001, para avaliação da eficiência dos mesmos para as madeiras brasileiras, já que algumas madeiras brasileiras apresentam alta densidade.

Os trabalhos relacionados na literatura envolvendo a classificação visual não consideram nenhuma diferenciação entre classes visuais tendo todas as lamelas ou elementos avaliados no mesmo lote.

A análise visual é uma importante ferramenta, facilitando o trabalho de classificação das peças destinadas aos produtos engenheirados de madeira. Sua utilização conjunta com o ensaio não destrutivo corresponde à maneira ideal de classificar e caracterizar a madeira.

A utilização ou não de apoios, durante a realização dos ensaios não destrutivos, na avaliação da rigidez da madeira deve ser mais bem estudada, pois os resultados observados na literatura até o momento, não são suficientes para uma adequada análise da rigidez impedindo o estabelecimento de conclusões gerais.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 CONFECÇÃO DAS LAMELAS E CPs DE CARACTERIZAÇÃO

Para a realização deste trabalho, foi utilizada matéria-prima fornecida pela empresa Vale do Cedro, localizada no município de Ribeirão Branco – SP. Foram consideradas as espécies de madeira Cedro Australiano, Cedro Indiano, Eucalipto Grandis.

Para a retirada dos CPs (lamelas), utilizou-se 8 vigas de cada espécie da madeira tendo estas dimensões nominais de 6 cm x 16 cm x 300 cm. Foram usinadas (Figura 21) e retiradas amostras que seguiram os procedimentos da ABNT NBR 7190:1997, Anexo B. Foram retiradas de cada viga, em média, 10 lamelas com dimensões nominais de 2,5 cm x 6 cm x 123 cm. Retirou-se também, de cada uma das vigas, corpos de prova (CPs) para caracterização física e mecânica das madeiras, ou seja, 03 CPs de compressão paralela às fibras e 06 de umidade e densidade aparente.

Figura 21 – Usinagem das vigas para retirada dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria (2021).

Em seguida, as amostras foram lixadas e identificadas. A umidade inicial dos CPs de caracterização e das lamelas foram obtidas através da utilização do aparelho *Moisture Mete 4806* como pode-se verificar na Figura 22. Para utilização deste medidor elétrico de umidade foi necessária a calibração do mesmo para os diferentes tipos de madeira utilizados.

Figura 22 - Obtenção da umidade inicial com uso do medidor elétrico Moisture Mete

4806



Fonte: Autoria própria (2021).

Posteriormente, os CPs de caracterização foram armazenados em uma sala climatizada até que atingissem a umidade de $12 \pm 1\%$. As densidades das amostras foram calculadas a partir dos CPs de densidade, conforme o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997. A umidade dos corpos de prova também foi aferida pelo método da massa para comparação dos resultados fornecidos pelo medidor elétrico.

5.2 CONTROLE DE UMIDADE DAS LAMELAS

Para que o teor de umidade das lamelas chegasse a $12 \pm 1\%$, as lamelas foram entabicadas (Figura 23) logo após sua usinagem. Durante o período de 30 dias as lamelas foram observadas e suas umidades foram verificadas semanalmente com o auxílio do medidor elétrico Moisture Mete 4806, até que as mesmas chegassem ao equilíbrio esperado. Em seguida estas foram armazenadas em uma sala climatizada onde os ensaios posteriores foram realizados.

Figura 23 - Lamelas entabicadas



Fonte: Autoria própria (2021).

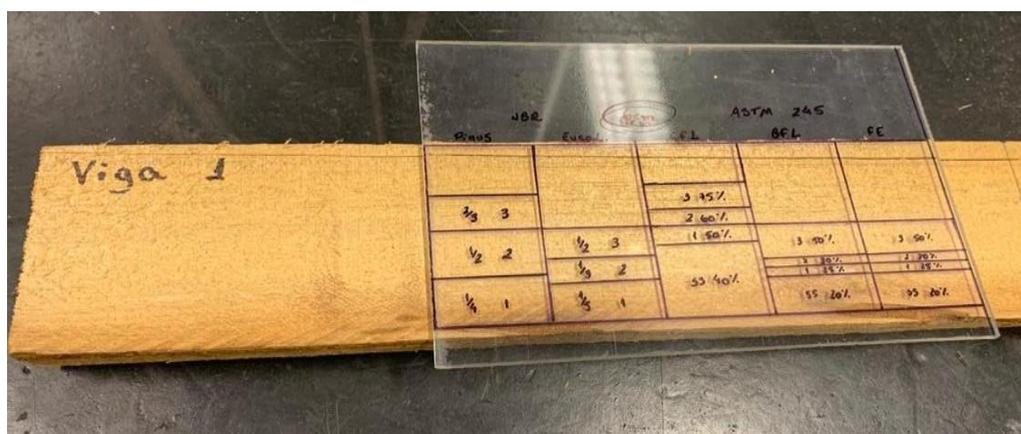
5.3 CLASSIFICAÇÃO VISUAL

A classificação visual ocorreu logo após a secagem das lamelas, sendo realizada com base nos critérios exigidos pelo método de ensaio PN 02.126.010-001. Durante a realização das análises de classificação visual, uma vez que no projeto de norma não constam as espécies utilizadas (Cedro Australiano, Cedro Indiano e Eucalipto Grandis), adotou-se como padrão de classificação visual a Tabela 2, citada na seção 3.2.1 deste trabalho, referente às madeiras do tipo Folhosas.

Com intuito de padronizar e facilitar a classificação visual das lamelas, foi confeccionado um gabarito denominado “máscara” com uma lâmina de acrílico transparente (Figura 24) com os limites estabelecidos para identificar a abrangência dos defeitos, sendo considerados os nós, as fissuras passantes e não passante. Estes parâmetros de classificação visual utilizados em forma de máscara de acrílico aceleraram e padronizaram o processo de classificação. Também foi utilizado um paquímetro na aferição de alguns outros critérios citados na Tabela 2 como os empenamentos etc.

Após a classificação visual de todas as lamelas das 3 espécies de madeira avaliadas neste trabalho, foi avaliada a influência da classe visual nos resultados de rigidez das madeiras. Em outras palavras, foi avaliado se lamelas classificadas visualmente em uma determinada classe visual (por exemplo, somente classe 1, 2 ou 3), produziram coeficiente de determinação R^2 mais elevado com relação às lamelas analisadas de forma geral, sem separação em diferentes classes visuais no que se refere a comparação entre os diferentes módulos de elasticidade.

Figura 24 - Gabarito confeccionado com base na ABNT NBR PN 02.126.010-001



Fonte: Autoria própria (2021).

O gabarito da Figura 24 teve como parâmetro de confecção a largura das peças analisadas que, neste caso, foi de 6 cm. De forma, as lamelas de madeira foram separadas em diferentes classes de qualidade, indicadas pelo projeto de norma PN 02.126.010-001.

Portanto, após a classificação visual, as lamelas de madeira foram enquadradas em três diferentes classes visuais (Classe 1, Classe 2 e Classe 3), sendo a Classe 1 com as lamelas de melhor qualidade visual e as lamelas de classe 3 as lamelas de qualidade inferior.

5.4 ENSAIOS MECÂNICOS DE CARACTERIZAÇÃO

Para caracterização das madeiras foram realizados ensaios destrutivos de compressão paralela às fibras de acordo com a ABNT NBR 7190:1997. A partir desses ensaios determinou-se a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) (Figura 25) e o módulo de elasticidade na compressão paralela (E_{c0}), os quais foram utilizados para comparação com resultados de rigidez dos ensaios não destrutivos. Esses corpos de prova foram retirados das mesmas vigas de madeira utilizadas para retirada das lamelas de madeira para os ensaios não destrutivos.

Figura 25 - Ensaio destrutivo de compressão paralela as fibras.



Fonte: Autoria própria (2021).

Para a obtenção da densidade aparente (ρ_{ap}), de cada CP, utilizou-se a Equação (3), citada na seção 3.2.2 deste trabalho.

5.5 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO

Após a realização da análise visual, as lamelas passaram pelo ensaio mecânico não destrutivo de excitação por impulso, através do uso do equipamento Sonelastic, que tem como base as diretrizes sugeridas pelo documento normativo ASTM E 1876:15. Inicialmente verificou-se a condição de apoio das lamelas nas respostas de rigidez. Foram realizados, inicialmente dois tipos de ensaios longitudinais ou seja: lamelas biapoiadas e lamelas sem o uso de apoios, sendo que ambos os ensaios foram realizados com o microfone posicionado em uma extremidade da lamela com impacto efetuado manualmente pelo pulsador, posicionado na extremidade oposta da lamela como mostrado na Figura 26. Foram realizadas 5 repetições de leitura para cada lamela na determinação da rigidez das mesmas. É importante frisar que o *software* Sonelastic forneceu o valor do módulo de elasticidade dinâmico longitudinal (E_{dL}), como sendo o valor médio obtido com base em 5 repetições de valores anteriores. A Figura 26 mostra os detalhes do primeiro tipo de ensaio realizado, ou seja, o não destrutivo longitudinal do tipo “biapoiado”. Os apoios utilizados, neste ensaio, foram formados por duas cantoneiras metálicas posicionadas nas distâncias entre apoios das lamelas.

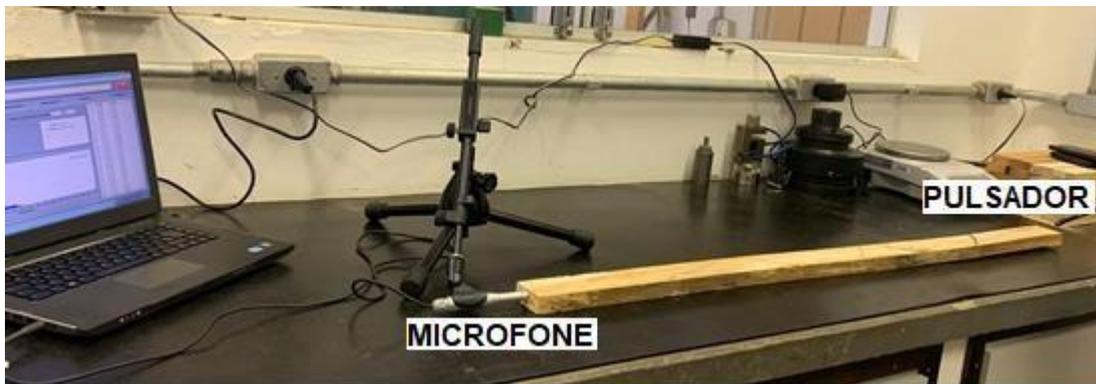
Figura 26 - Ensaio de excitação por impulso longitudinal (E_{dL}) biapoiado



Fonte: Autoria própria (2021).

Em seguida, foi realizado o mesmo ensaio, mas sem a utilização dos apoios como pode ser observado na Figura 27, essa estratégia de se utilizar ou não os apoios para as lamelas ensaiadas buscaram obter melhorar a qualidade das respostas relacionadas a rigidez das madeiras ensaiadas.

Figura 27 - Ensaio de excitação por impulso longitudinal (E_{dL}) sem os apoios



Fonte: Autoria própria (2021).

Dentro deste contexto, é importante salientar que Carreira (2011), para realização do ensaio de vibração transversal flexional, utilizou-se de cordas de Nylon, que se encontravam presas a molas, para simular que as toras ensaiadas estavam em suspensão. Assim, foi possível evitar interferências dos apoios, visto que o ensaio de toras necessitava de apoios muito grandes e com superfícies de contato em uma área muito grande, podendo interferir no resultado do ensaio.

Em seguida, as lamelas ensaiadas foram submetidas ao ensaio não destrutivo de excitação por impulso flexional, no qual a lamela foi mantida biapoiada, e o microfone estava localizado na parte inferior da peça com impacto ocorrendo pelo lado oposto ao que se encontrava o microfone, como pode ser observado na Figura 28. Após o impacto inicial, o *software* Sonelastic retornou o valor do módulo de elasticidade dinâmico flexional (E_{dF}). Utilizou-se apoios de confecção própria para a melhorar a realização do ensaio visando minimizar a área de contato entre os apoios e os CPs ensaiados, e buscando uma alternativa de ensaio simples e possível para que fosse realizada com facilidade.

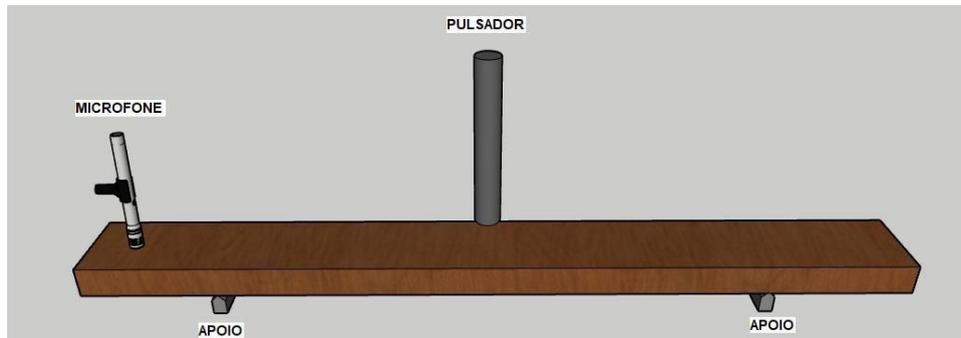
Figura 28 - Ensaio de excitação por impulso flexional (E_{dF}) biapoiado



Fonte: Autoria própria (2021).

Replicou-se o ensaio não destrutivo de excitação por impulso flexional com os apoios, baixos como apresentados na Figura 29. De acordo com o documento normativo ASTM E 1876:15, o ensaio flexional, neste caso, pode ser realizado com a madeira apoiada em apoios simples sendo que o microfone deve ser posicionado na parte superior da madeira, em uma de suas extremidades com o impacto ocorrendo na parte central do CP.

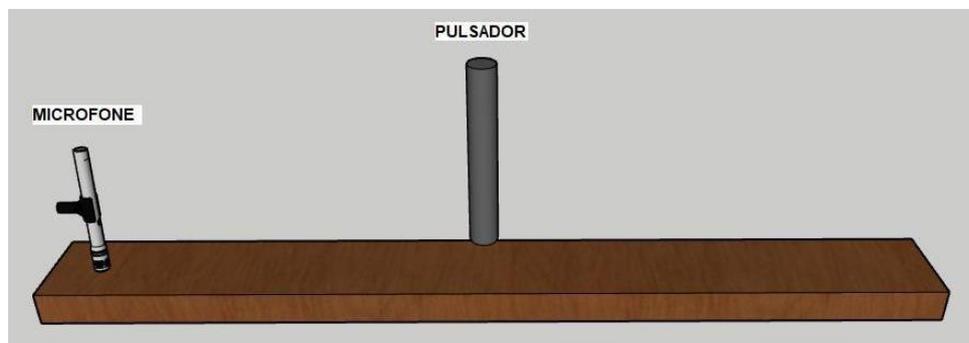
Figura 29 - Ensaio de excitação por impulso flexional (E_{dF}), biapoado com apoios simples



Fonte: Autoria própria (2021).

Replicou-se o ensaio não destrutivo de excitação por impulso flexional apresentado na Figura 29, mas, neste caso, foi sem nenhum tipo de apoio conforme apresentado na Figura 30, onde a peça foi ensaia sobre uma mesa emborrachada.

Figura 30 - Ensaio de excitação por impulso flexional (E_{dF}), sem apoios nos pontos nodais



Fonte: Autoria própria (2021).

5.6 ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA DE TRÊS PONTOS

Após a realização dos ensaios não destrutivos (Sonelastic) e da classificação visual as mesmas lamelas ensaiadas anteriormente passaram pelo ensaio de flexão estática de três pontos segundo anexo B da ABNT NBR 7190:1997 para a obtenção do módulo de elasticidade na flexão (E_M), como pode-se observar na Figura 31. As lamelas, neste caso, foram solicitadas nos ensaios de flexão de três pontos até o limite de serviço de $L/200$, sendo

L a distância entre apoios. A distância entre apoios, neste caso, considerou a relação $L/h > 21$ para minimizar o efeito da parcela de deformação por cisalhamento na flecha final obtida no meio do vão, sendo h a altura da seção transversal da lamela.

Figura 31 – Ensaio de Flexão estática de três pontos com base no Anexo B da ABNT NBR 7190:1997 para determinação de E_M



Fonte: Autoria própria (2021).

Os módulos de elasticidade E_M obtidos pelo ensaio de flexão de três pontos, neste caso, também foram comparados com os resultados de rigidez (E_{dL} e E_{dF}) fornecidos pelo Sonelastic.

5.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

A separação da classificação visual foi organizada inicialmente, de forma descritiva, em forma histogramas de frequência.

Para a avaliação estatística dos resultados de rigidez obtidos, utilizou-se o *software* Minitab 19, versão acadêmica. Para os resultados da avaliação da caracterização físico-mecânica, foram consideradas as seguintes medidas de dispersão: média aritmética (\bar{X}), coeficiente de variação (CV) e desvio padrão (DP).

Analisou-se também a variação da rigidez obtida em função da utilização e não utilização de apoios, durante os ensaios não-destrutivos. Para tanto, construiu-se o gráfico de boxplot, e em seguida realizou-se uma análise de regressão linear, para verificar se existiram diferenças estatísticas entre os ensaios realizados com e sem a presença de apoios.

A normalidade dos dados foi verificada com base no teste de *Anderson-Darling*, antecedendo a realização do teste t.

A verificação das diferenças obtidas para os ensaios não destrutivos nas condições, com e sem o uso de apoios foi verificada com base no teste t (*t-student*) considerando o p-valor referente ao nível de significância de 5%. No teste t realizado (tipo bicaudal) foram admitidas as seguintes hipóteses:

- H_0 (Hipótese nula) = admite-se que as médias são iguais
- H_A (Hipótese alternativa) = admite que as médias são diferentes
- Se **p-valor** \geq **0,05** aceitou-se H_0 (médias eram estatisticamente equivalentes)
- Se **p-valor** $<$ **0,05** rejeitou-se H_0 e aceitou-se H_A (médias não eram equivalentes)

Posteriormente, através da análise de regressão linear, verificou-se a interação dos resultados de rigidez obtidos a partir do ensaio de flexão estática (E_M) de três pontos, com os resultados dinâmicos obtidos através do sonelastic por ensaios não destrutivos de flexão (E_{dF}) e longitudinal (E_{dL}), afim de verificar qual combinação apresentou a maior interação sem a consideração da divisão das lamelas em diferentes classes visuais. Em seguida a mesma análise foi realizada separando os conjuntos de lamelas em diferentes classes visuais.

As comparações de rigidez também foram efetuadas entre os ensaios dinâmicos obtidos no sonelastic com os resultados de rigidez equivalentes à compressão paralela as fibras.

Para cada combinação de rigidez avaliada, conforme descritas anteriormente, foram avaliados os coeficientes de determinação R^2 para identificação da melhor combinação, para parametrização dos resultados utilizou-se a Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação do coeficiente de determinação

Valor de R^2	Interpretação
0%	Nula
0% a 9%	Fraca
9% a 49%	Média
49% a 81%	Forte
81% a 98%	Fortíssima
98% a 100%	Perfeita

Fonte: Coutinho (2012).

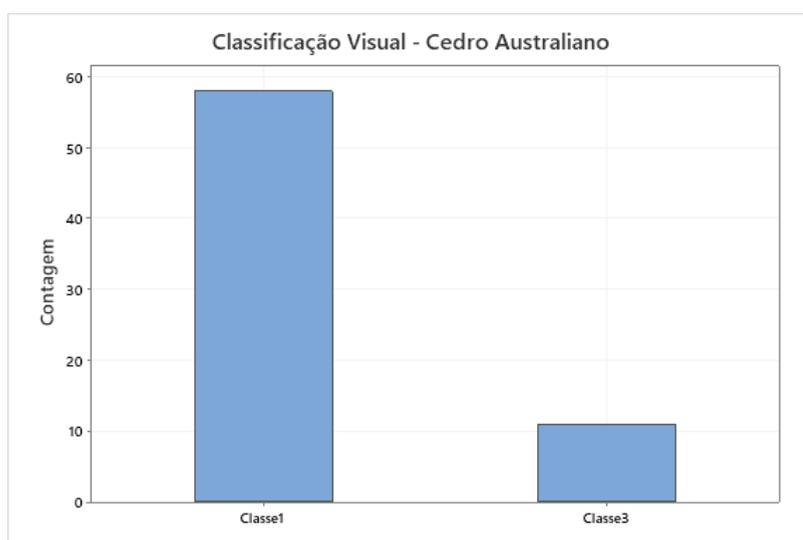
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos itens seguintes são apresentados os principais resultados de caracterização das madeiras e os resultados da comparação entre as rigidezes fornecidos pelo Sonelastic e os ensaios de flexão estática e de compressão.

6.1 CLASSIFICAÇÃO VISUAL

Com base na classificação visual preliminar para as madeiras de Cedro Australiano, foram analisadas um total de 69 lamelas. Foram encontradas 58 lamelas classificadas visualmente na Classe 1 e 11 lamelas classificadas como a Classe 3 (Figura 32).

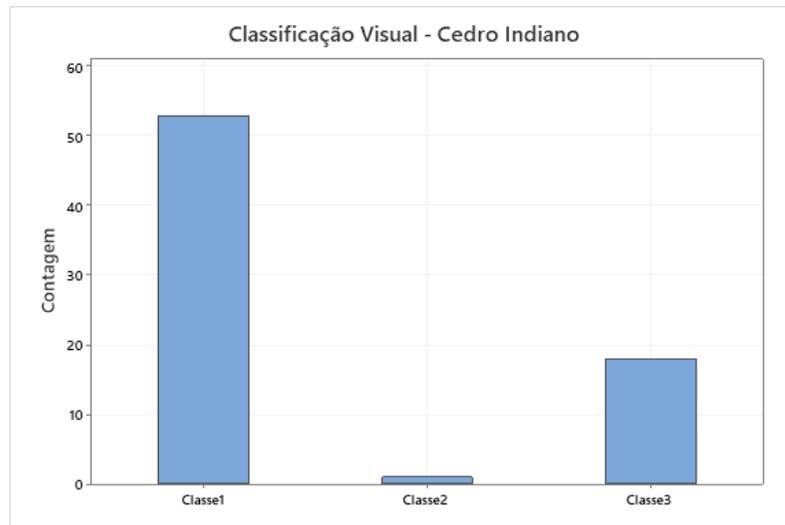
Figura 32 - Resultado da classificação visual – Cedro Australiano



Fonte: Autoria própria (2021).

A mesma análise visual foi realizada para as lamelas de Cedro Indiano, sendo analisadas visualmente um total de 72 lamelas (Figura 33), das quais 53 foram classificadas na Classe 1, 1 lamela na Classe 2 e 18 lamelas na Classe 3.

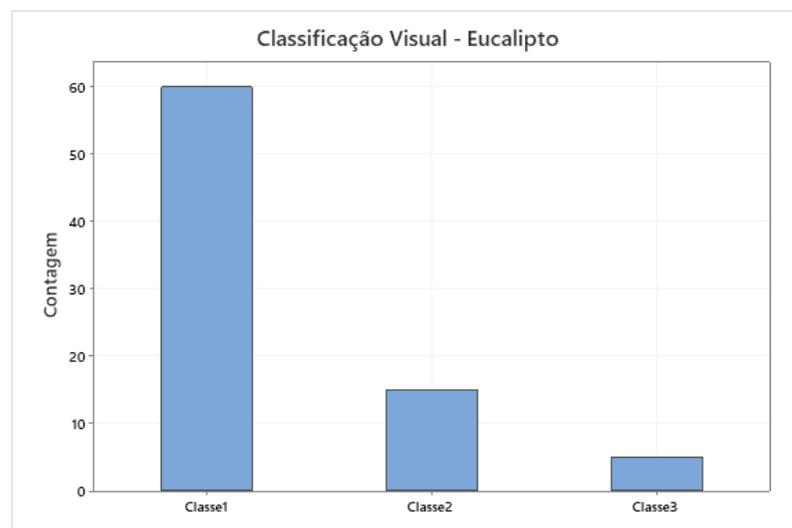
Figura 33 – Resultado da classificação visual – Cedro Indiano



Fonte: Autoria própria (2021).

Para o, Eucalipto Grandis, a classificação visual totalizou 80 lamelas (Figura 34), das quais 60 foram classificadas na Classe 1, 15 lamela na Classe 2 e 5 lamelas na Classe 3.

Figura 34 – Resultado da classificação visual – Eucalipto Grandis



Fonte: Autoria própria (2021).

6.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MADEIRAS UTILIZADAS

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados das caracterizações física e mecânica da madeira a partir das recomendações do Anexo B da ABNT NBR 7190:1997. Os valores médios apresentados para cada tipo de madeira de onde foram retiradas as lamelas são

resultados da média da repetição de 03 corpos de prova retirados de cada tábua, no caso dos ensaios mecânicos (f_{c0} , E_{c0} e f_v) e, de 06 corpos de prova, no caso dos valores de densidade (ρ_{ap}).

Tabela 4 – Caracterização físico-mecânica das madeiras (U=12%)

	Cedro Australiano (D20)	Cedro Indiano (D20)	Eucalipto Grandis (D20)
$f_{v,m}$ (MPa)	9,61	10,57	7,20
DP (MPa)	1,52	2,31	1,10
CV (%)	16	22	15
$f_{c0,m}$ (MPa)	28,38	33,46	38,5
DP (MPa)	2,75	6,20	3,86
CV (%)	10	19	10
$E_{c0,m}$ (MPa)	6636,28	6497,05	9030,71
DP (MPa)	1087,01	3178,28	1476,58
CV (%)	16	49	18
ρ_{ap} (g/cm³)	0,36	0,49	0,45
DP (g/cm³)	0,03	0,06	0,04
CV (%)	9	13	8

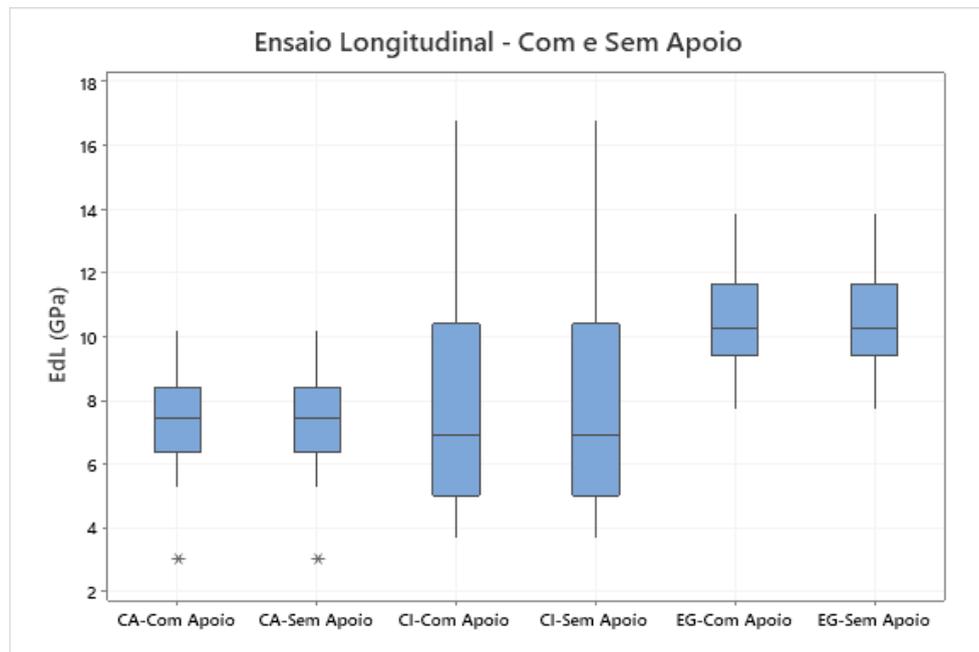
Fonte: Autoria própria (2021).

Observou-se na Tabela 4, que o f_{c0} , E_{c0} , f_v e a ρ_{ap} do Cedro Indiano apresentou maior Desvio Padrão (DP), indicando uma menor uniformidade dos dados, o mesmo pode ser notado em relação ao Coeficiente de Variação (CV), que apresentou menor homogeneidade. O Cedro Australiano e o Eucalipto Grandis, apresentaram uma boa uniformidade dos dados e uma dispersão de média a baixa (Entre 15 a 30%).

6.3 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE APOIO DOS CORPOS DE PROVA

Para o ensaio não destrutivo longitudinal, os resultados médios de rigidez que foram obtidos a partir do ensaio de excitação por impulso com solicitação longitudinal (impacto na direção das fibras da madeira), com amostras de corpos de prova com e sem apoios, foram apresentados no gráfico boxplot da Figura 35 para madeira de Cedro Australiano, indicadas no gráfico como CA e Cedro Indiano indicado no gráfico como CI e Eucalipto Grandis indicado como EG. A normalidade dos dados foi verificada para todas as amostras que apresentaram um valor de $P < 0,05$, (para todas as amostras estudadas).

Figura 35 - Excitação por impulso longitudinal com e sem apoios

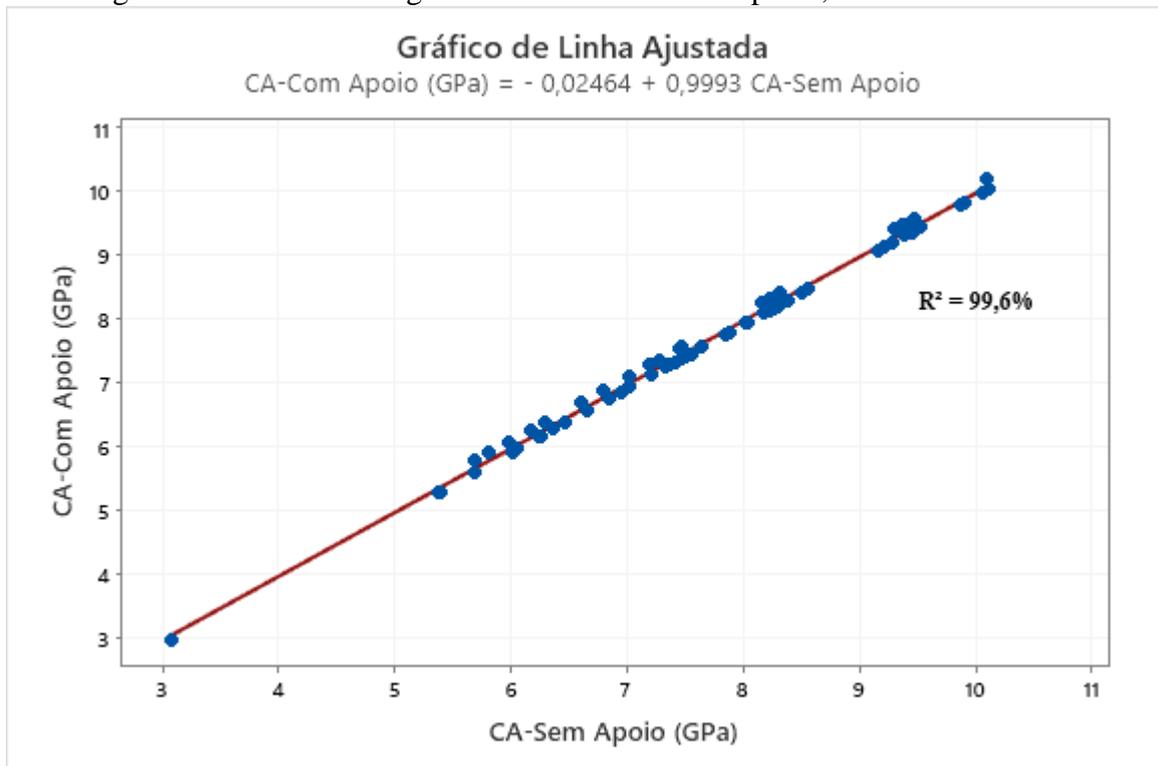


Fonte: Autoria própria (2021).

Observou-se no gráfico de boxplot, obtido analisando os resultados de rigidez (E_{dL}), que os lamelas com impactos longitudinais, com e sem o uso de apoio, não apresentaram diferenças estatísticas, pois analisando no teste t, verificou-se um valor de P, entre CA-Com Apoio e Sem Apoio igual a 0,05, um valor de $P = 0,194$ para CI-Com Apoio e Sem Apoio e um valor de $P = 0,277$ para EG-Com Apoio e Sem Apoio. Nenhum valor de P foi menor do que 0,05, indicando que as médias não diferem estatisticamente.

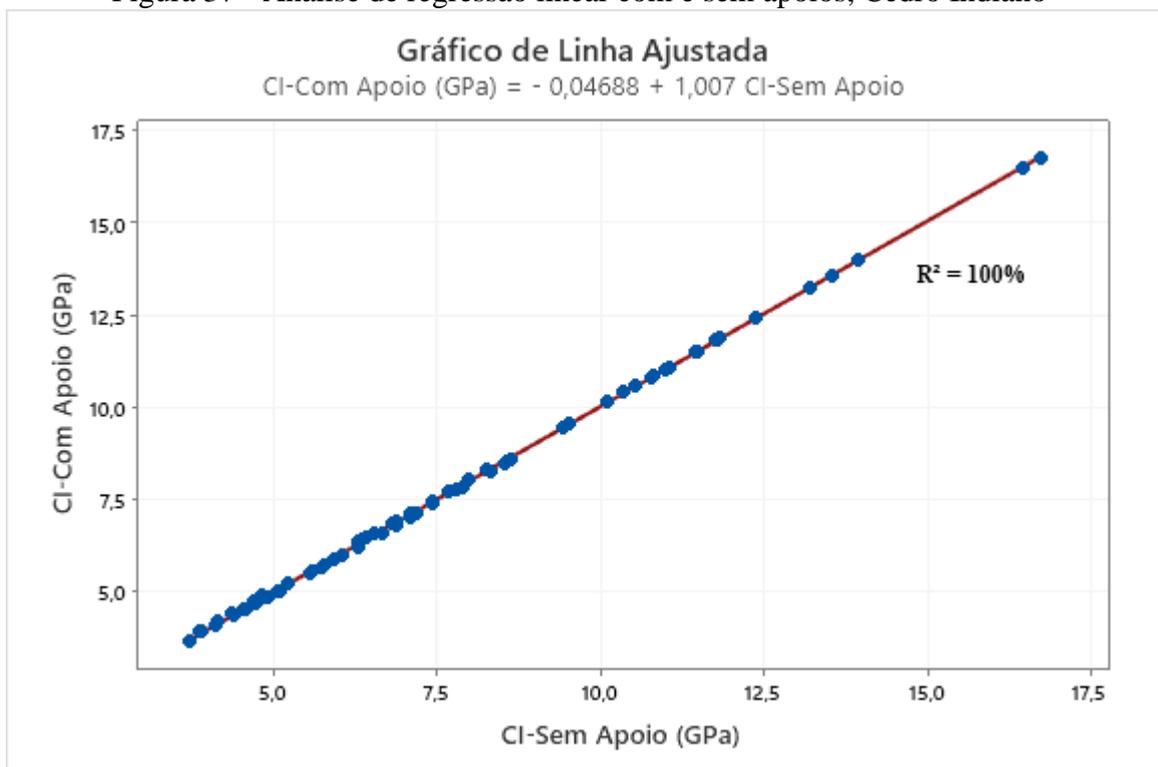
A análise de regressão linear realizada para as três amostras estudadas foi realizada considerando-se a utilização e a não utilização de apoios para a execução do ensaio de excitação por impulso longitudinal, obteve-se um p valor $< 0,05$, os gráficos gerados através da análise de regressão linear, estão representados na Figura 36, 37 e 38.

Figura 36 - Análise de regressão linear com e sem apoios, Cedro Australiano



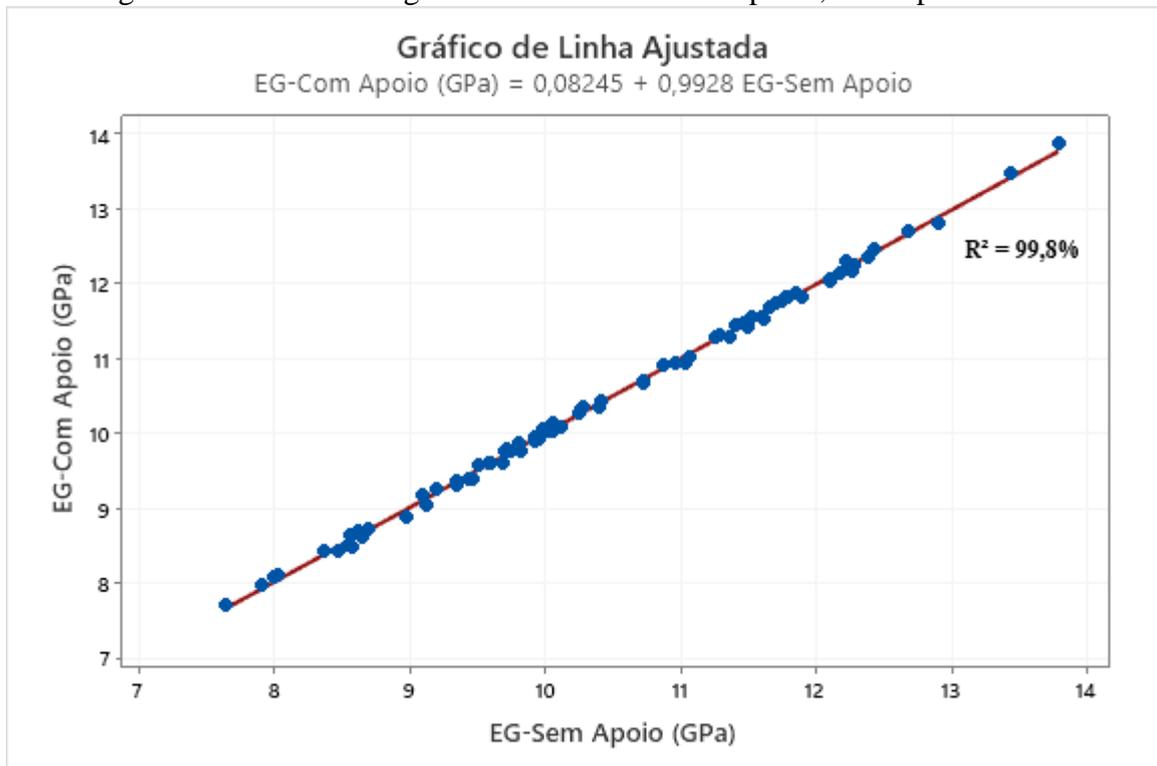
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 37 - Análise de regressão linear com e sem apoios, Cedro Indiano



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 38- Análise de regressão linear com e sem apoios, Eucalipto Grandis



Fonte: Autoria própria (2021).

Para os três casos o valor de R^2 muito próximo de 1, e um Valor de $P < 0,05$ conclui-se que não existiram diferenças significativas entre as condições de apoio consideradas para o ensaio. Assim como estudado por Cossolino *et al.* (2009) que verificaram que a variação de apoios não apresentou diferenças significativas para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico longitudinal (E_{dL}). Segundinho *et al.*, (2012), também chegaram à mesma conclusão, estudando a variação de apoios, obtendo um R^2 muito próximo de 1, fato este que indicou que os apoios não tiveram influência nos resultados de rigidez (E_{dL}) obtidos.

Nesse sentido, verificando os ensaios de excitação por impulso flexionais, constatou-se que apenas os ensaios realizados nas condições “biapoiado” e com os apoios colocados nos “pontos nodais”, com o microfone foi colocado na superfície inferior central da lamela e o impacto foi realizado do lado oposto onde encontrava-se o microfone, pode-se observar melhor resultados obtidos para o ensaio.

As demais variações de apoio e microfone, para o ensaio flexional apresentaram resultados de rigidez incoerentes (Maiores do que 500 GPa), quando comparados aos níveis aceitáveis de valores a serem obtidos para o módulo de elasticidade da madeira.

6.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE RIGIDEZ

Neste item, os resultados de rigidez obtidos a partir dos ensaios de excitação por impulso longitudinal (E_{dL}) e flexional (E_{dF}) foram comparados com os módulos de elasticidade obtidos pelo ensaio de flexão estática de três pontos (E_M). Comparações entre os módulos fornecidos pelo sonelastic com os módulos obtidos na compressão paralela as fibras (E_{c0}) também foram efetuadas. Inicialmente os referidos módulos foram comparados entre si sem a diferenciação das classes visuais, ou seja, todas as lamelas classificadas nas classes visuais 1, 2, e 3 foram analisadas conjuntamente dentro de um mesmo grupo. Posteriormente, os referidos módulos foram comparados entre si, porém, considerando-se no grupo somente as lamelas agrupadas em uma determinada classe visual (1, 2 e 3). Essa comparação em função do agrupamento de forma isolada em uma determinada classe buscou avaliar se houve aumento do coeficiente de determinação R^2 com relação as lamelas analisadas em um mesmo grupo geral, sem distinção das classes visuais

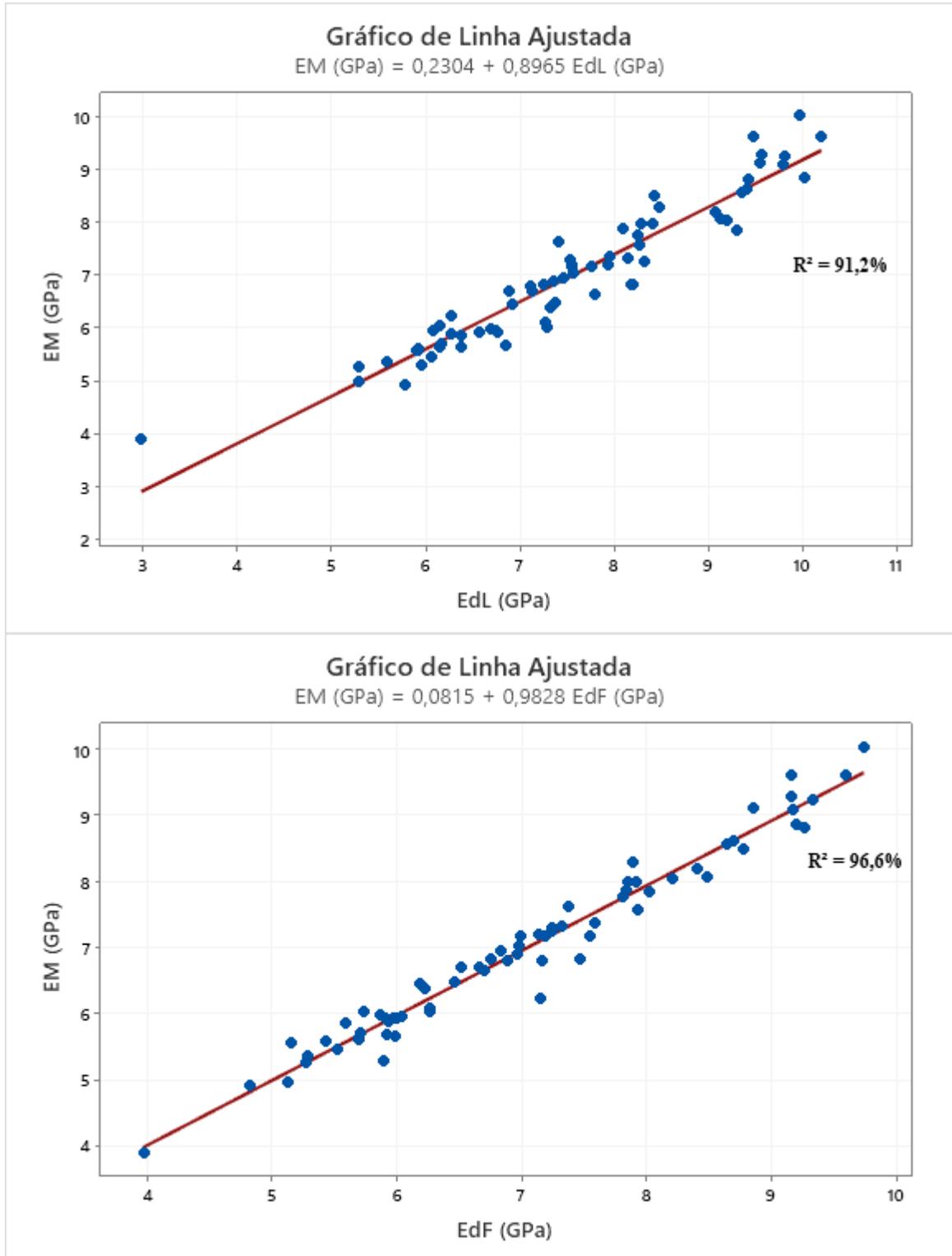
6.4.1 Cedro Australiano - Ensaio de flexão (EMIC) x Ensaio não destrutivo (Sonelastic)

- Análise de Regressão Linear entre $E_M \times E_{dL}$ e $E_M \times E_{dF}$.

Para o Cedro Australiano, nenhuma lamela enquadrou-se na Classe 2, e, nesse caso, não foi realizada a análise de Regressão Linear envolvendo a Classe visual 2.

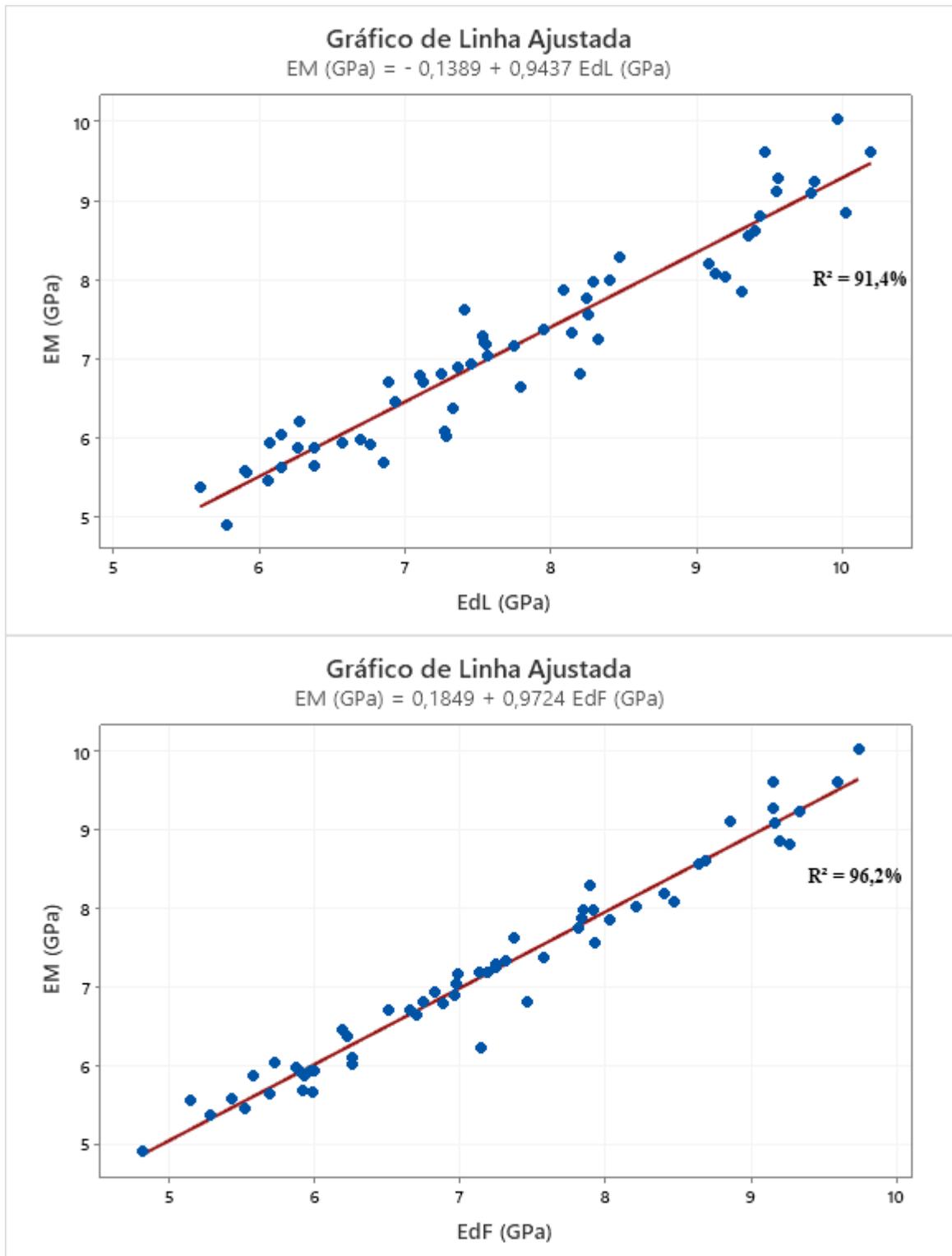
Na Figura 39 apresenta-se a comparação de rigidez sem distinção de classes visuais. Na Figura 40 apresenta-se a regressão linear apenas entre as amostras de Classe visual 1 e na Figura 41 a regressão linear para as amostras classificadas visualmente como Classe 3.

Figura 39 – Regressão linear – Todas as Classes (Cedro Australiano)



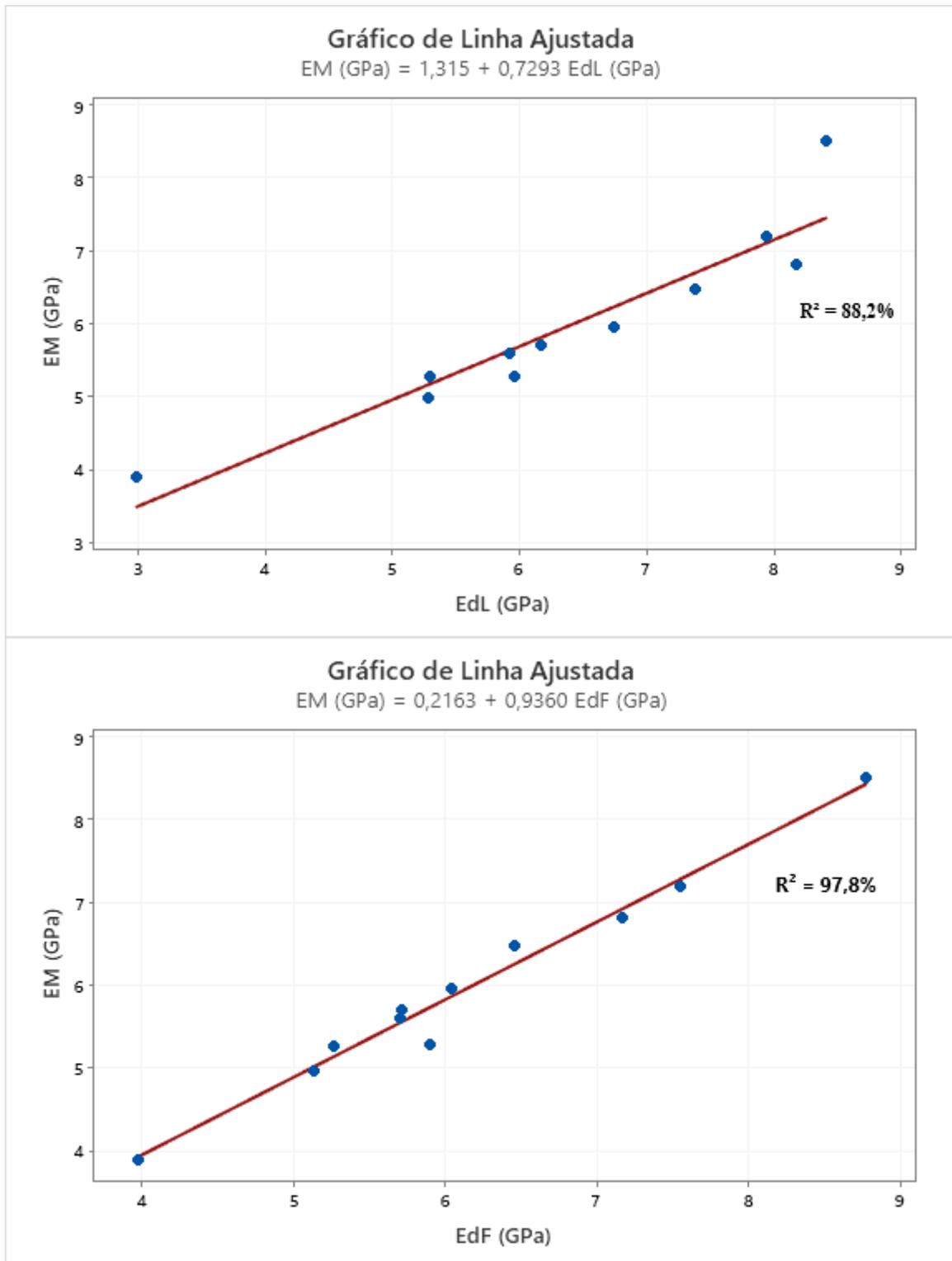
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 40 – Regressão linear - Classe 1 (Cedro Australiano)



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 41 – Regressão linear - Classe 3 (Cedro Australiano)



Fonte: Autoria própria (2021).

Em todas as análises o valor de P foi menor do que 0,05. Analisando os valores dos coeficientes de determinação R^2 obtidos observou-se que todas as regressões lineares para o Cedro Australiano, apresentaram R^2 como sendo uma correlação fortíssima (maior que 88 %). Destaca-se que a correlação entre E_M e E_{dF} , apresentou um R^2 maior quando comparado com o R^2 obtido na correlação entre E_M e E_{dL} quando considerada uma classificação geral das lamelas. Esses resultados reforçam o fato de que o módulo dinâmico (E_{dF}) fornecido pelo sonelastic corresponde ao módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão de três pontos (EM).

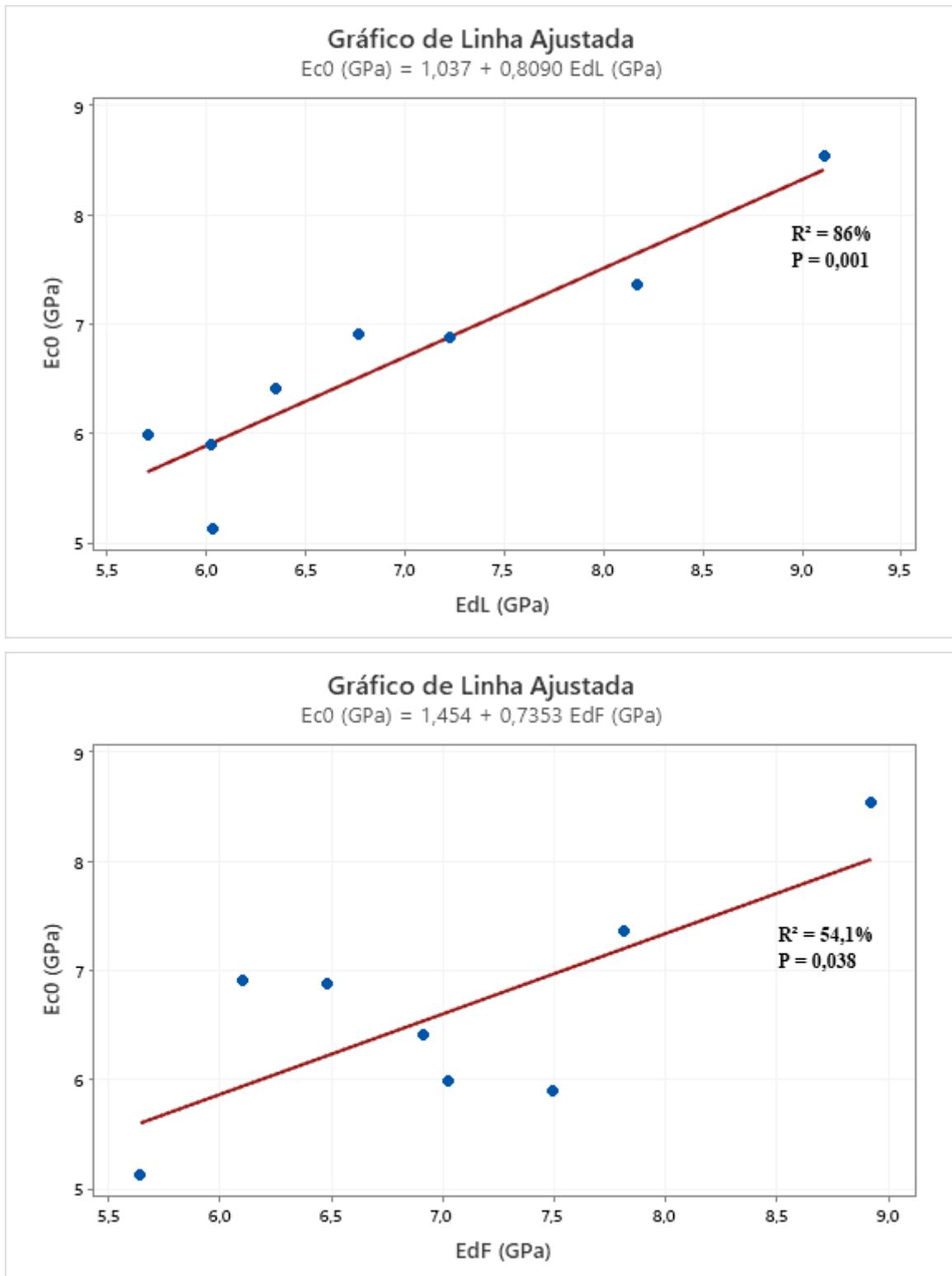
Quando as lamelas foram agrupadas nas classes visuais 1 e 3 ficou evidente um distanciamento maior entre E_M e E_{dL} , (constado pelo menor valor obtido para R^2 para este caso), pois o módulo E_{dL} correspondeu à rigidez a compressão paralela as fibras (E_{c0}) obtida no ensaio destrutivo.

Para os resultados obtidos entre Classes Visuais, notou-se que o R^2 da Classe 3 apresentou um decréscimo se comparado ao R^2 obtido para a comparação entre lamelas da Classe visual 1 para a correlação entre E_M e E_{dL} .

6.4.2 Cedro Australiano - Ensaio de compressão destrutivo (EMIC) x Ensaio não destrutivo (Sonelastic)

- Análise de Regressão Linear entre E_{c0} x E_{dL} e E_{c0} x E_{dF} .

Tratando-se do ensaio destrutivo de compressão (E_{c0}), para o Cedro Australiano. Na Figura 42 apresenta-se a comparação da Rigidez, sem considerar as classes visuais, comparando E_{c0} com E_{dL} e E_{c0} com E_{dF} .

Figura 42 – Regressão linear para E_{c0} – (Cedro Australiano)

Fonte: Autoria própria (2021).

Notou-se que com a determinação R^2 obtidos, observou-se que para o Cedro Australiano, a correlação entre E_{c0} e E_{dF} , apresentou um R^2 igual à 54,1%, indicando uma correlação forte, quando comparado com o R^2 obtido na correlação entre E_{c0} e E_{dL} , que apresentou um R^2 de 86%, indicando uma correlação fortíssima. Esses resultados reforçam o fato de que o módulo dinâmico (E_{dL}) fornecido pelo sonelastic corresponde ao módulo de elasticidade obtido com o ensaio de compressão paralela às fibras (E_{c0}).

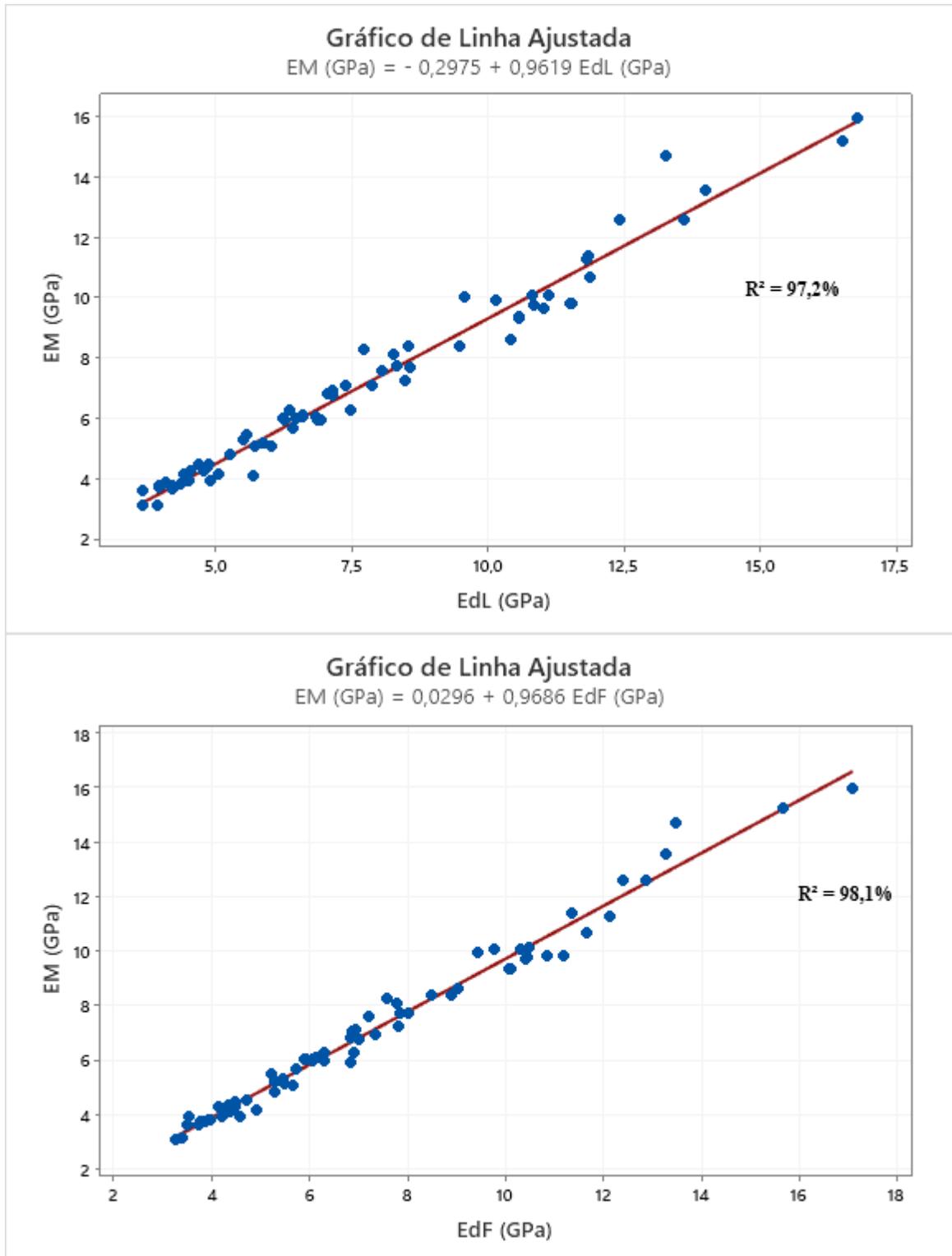
6.4.3 Cedro Indiano - Ensaio de flexão (EMIC) x Ensaio não destrutivo (Sonelastic)

- Análise de Regressão Linear entre $E_M \times E_{dL}$ e $E_M \times E_{dF}$.

O Cedro Indiano, 1 lamela enquadrou-se na Classe 2, e, nesse caso, não foi realizada a análise de Regressão Linear envolvendo a Classe visual 2.

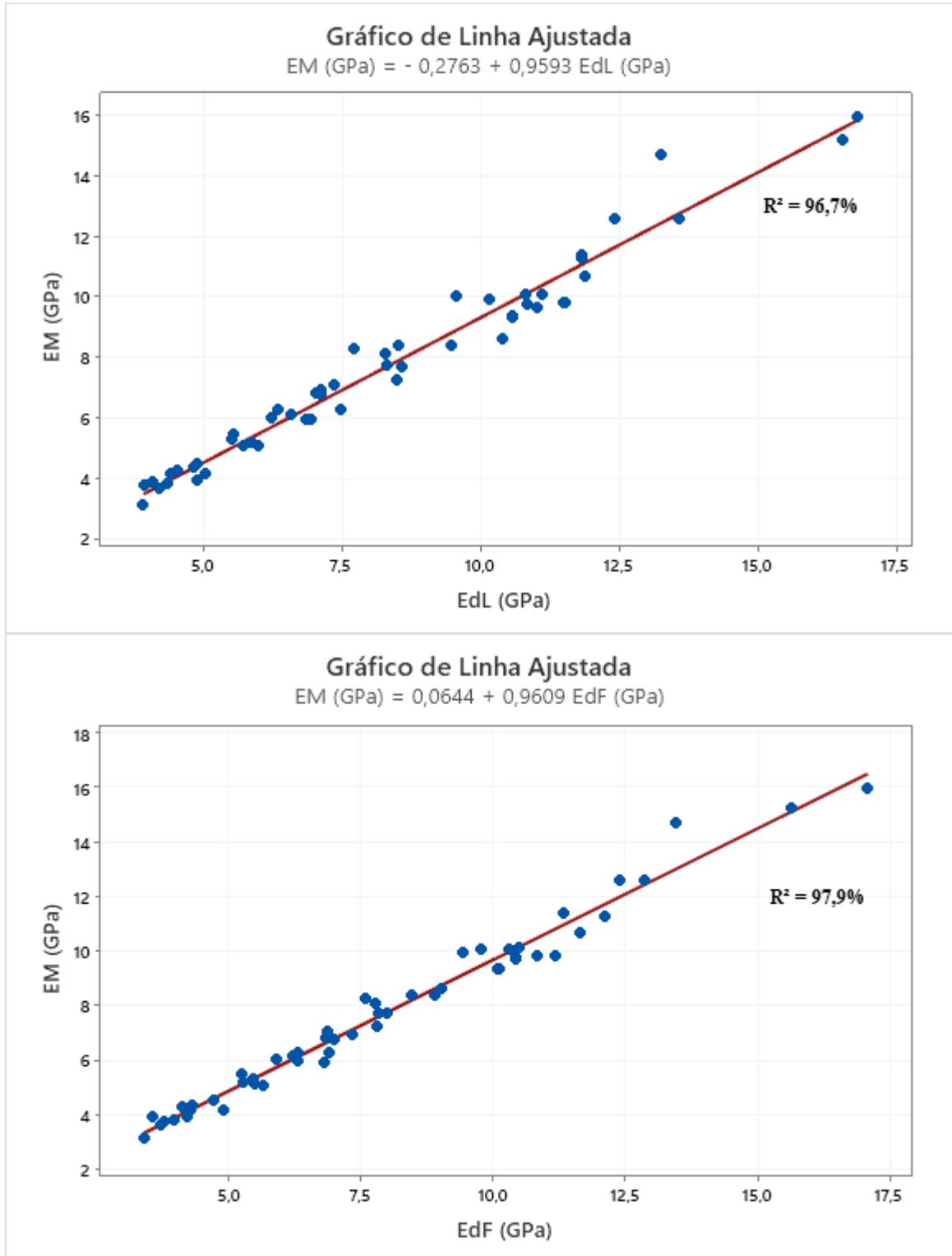
Na Figura 43 apresenta-se a comparação de rigidez sem distinção de classes visuais. Na Figura 44 apresenta-se a regressão linear apenas entre as amostras de Classe Visual 1 e na Figura 45 a regressão linear para as amostras classificadas visualmente como Classe 3.

Figura 43 – Regressão linear – Todas as Classes (Cedro Indiano)



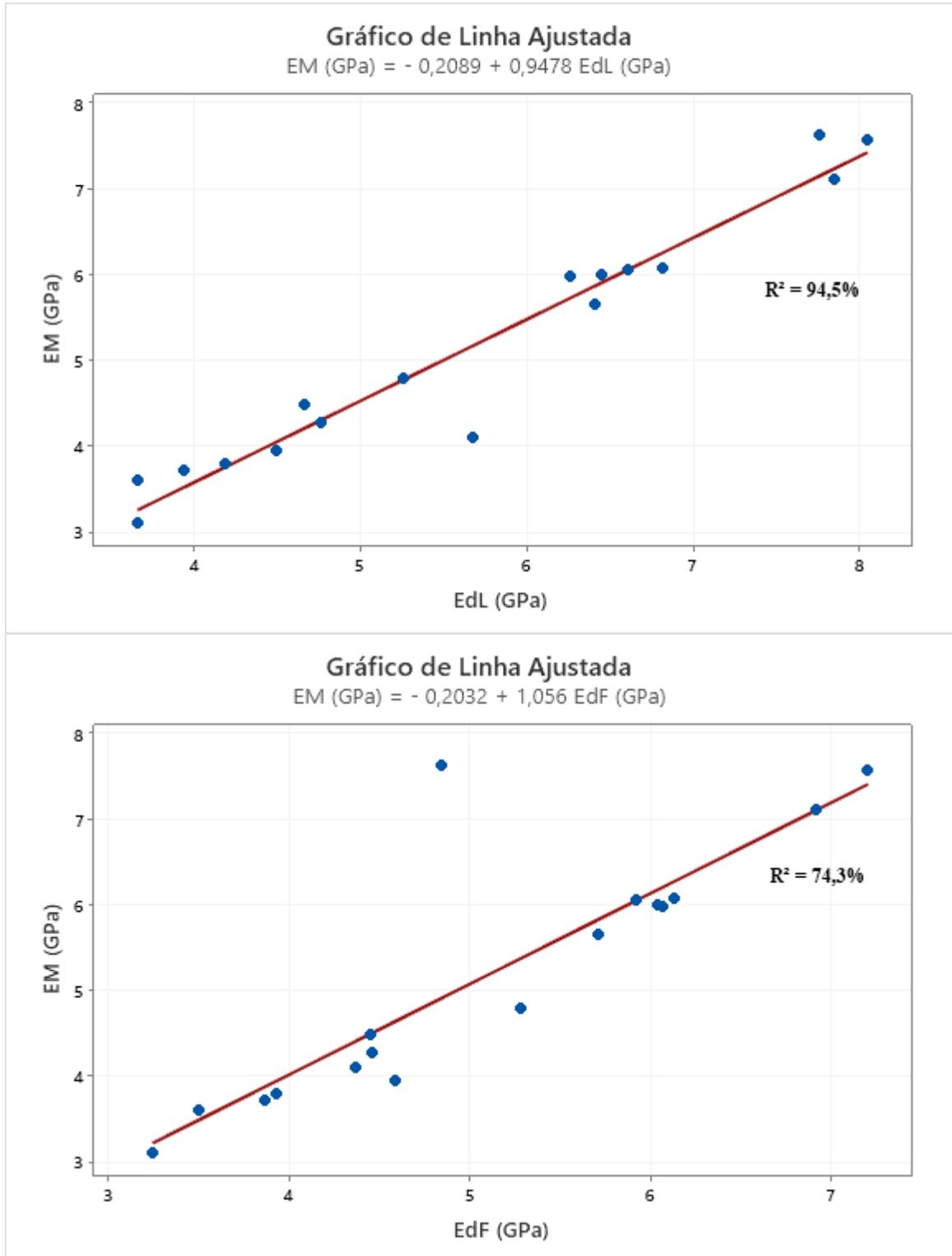
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 44 – Regressão linear - Classe 1 (Cedro Indiano)



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 45 – Regressão linear - Classe 3 (Cedro Indiano)



Fonte: Autoria própria (2021).

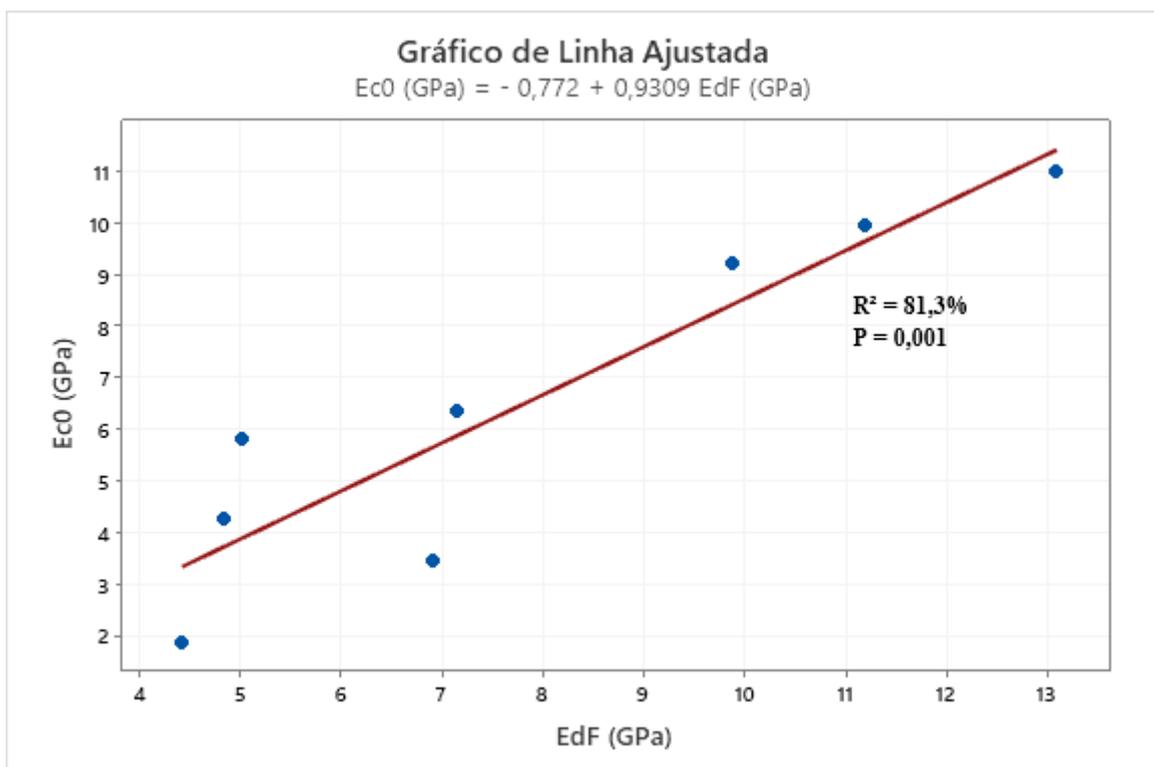
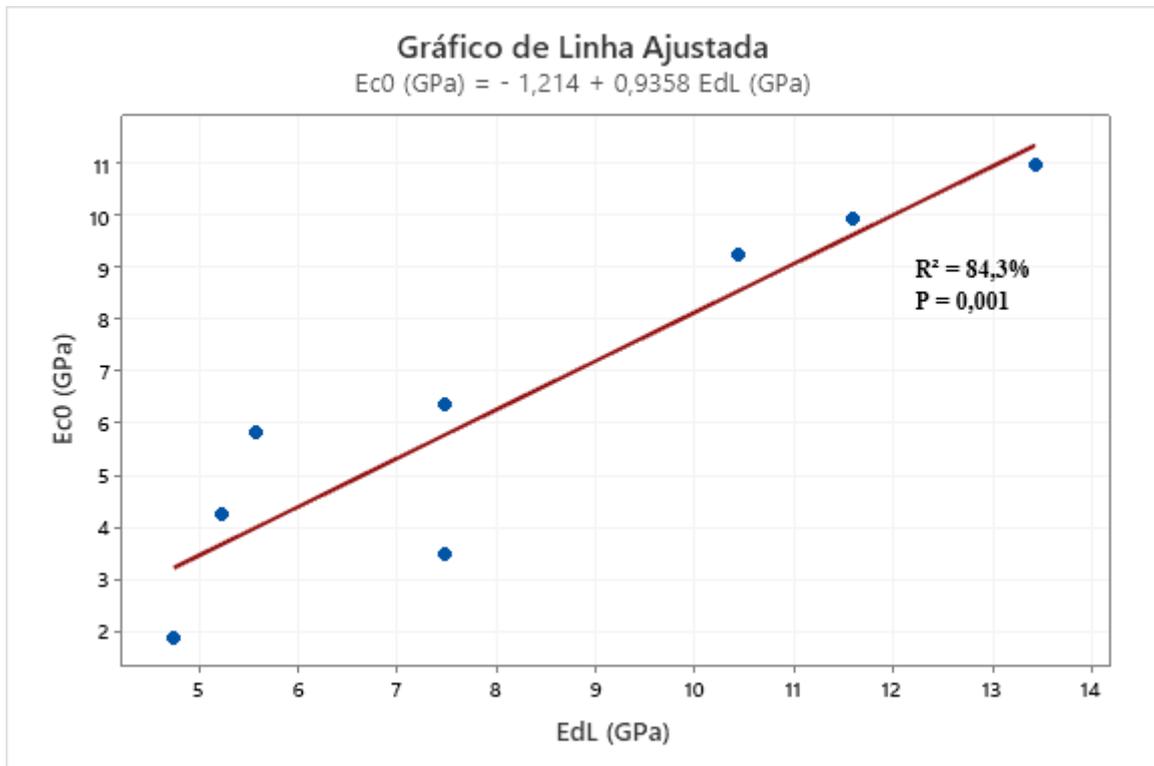
Em todas as análises o valor de P foi menor do que 0,05. Analisando os valores dos coeficientes de determinação R^2 obtidos observou-se que todas as regressões lineares para o Cedro Indiano, apresentaram R^2 como sendo uma correlação forte (maior que 74 %). Destaca-se que a correlação entre E_M e E_{dF} , apresentou um R^2 maior quando comparado com o R^2 obtido na correlação entre E_M e E_{dL} quando considerada uma classificação geral das lamelas. Esses resultados reforçam o fato de que o módulo dinâmico (E_{dF}) fornecido pelo sonelastic corresponde ao módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão de três pontos (E_M).

Para os resultados obtidos entre Classes Visuais, notou-se que o R^2 da Classe 3 apresentou um decréscimo se comparado ao R^2 obtido para a comparação entre lamelas da Classe visual 1 para a correlação entre E_M e E_{dF} .

6.4.4 Cedro Indiano - Ensaio de compressão destrutivo (EMIC) x Ensaio não destrutivo (Sonelastic)

- Análise de Regressão Linear entre E_{c0} x E_{dL} e E_{c0} x E_{dF} .

Tratando-se do ensaio destrutivo de compressão (E_{c0}), para o Cedro Indiano. Na Figura 46 apresenta-se a comparação da Rigidez, sem considerar as classes visuais, comparando E_{c0} com E_{dL} e E_{c0} com E_{dF} .

Figura 46 – Regressão linear para E_{c0} – (Cedro Indiano)

Fonte: Autoria própria (2021).

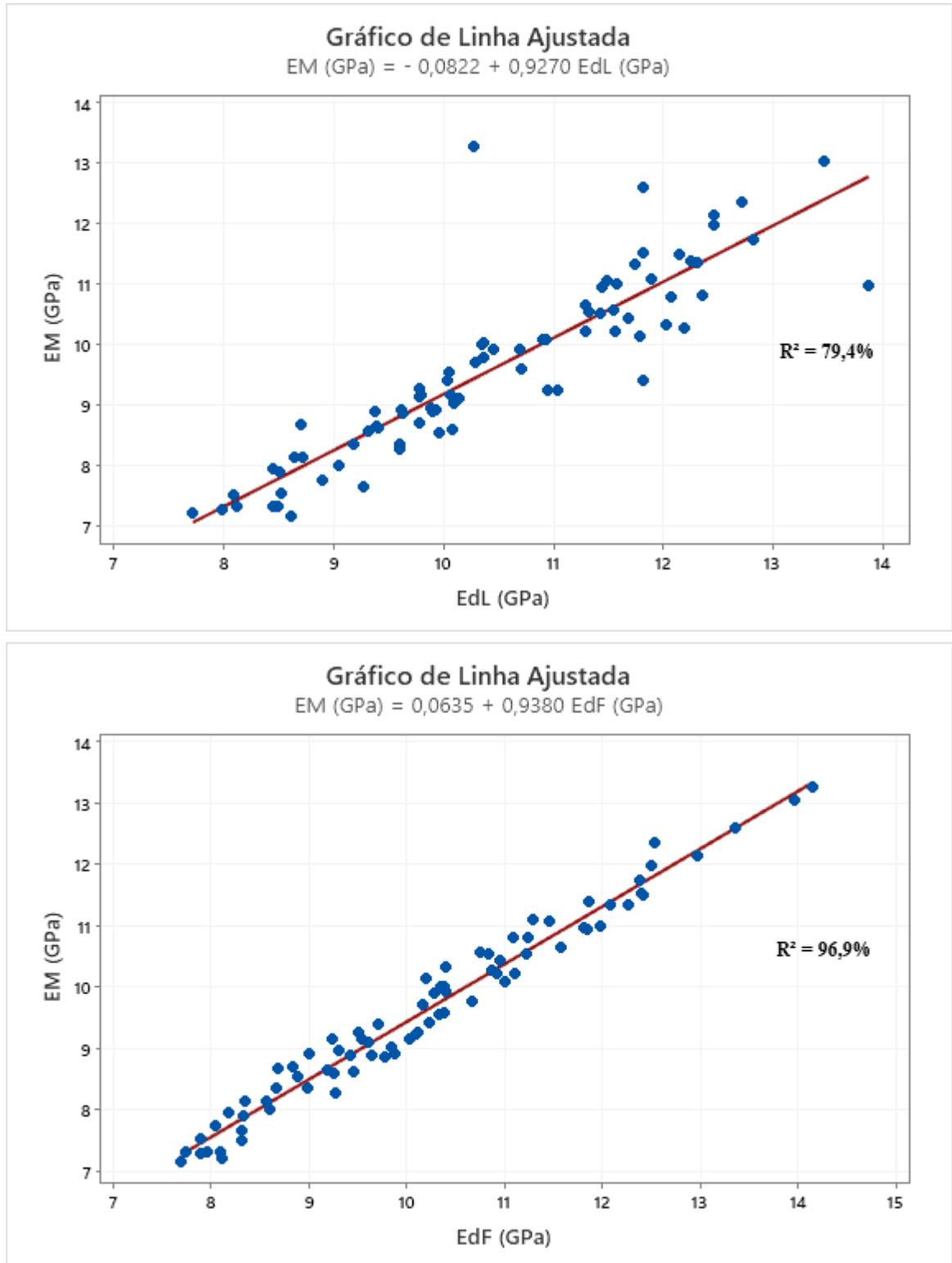
Notou-se que com a determinação R^2 obtidos, observou-se que para o Cedro Indiano, a correlação entre E_{c0} e E_{dL} , que apresentou um R^2 de 84,3%, indicando uma correlação fortíssima e possuindo um R^2 maior do que a correlação entre E_{c0} e E_{dF} . Esses resultados indicaram o fato de que o módulo dinâmico (E_{dL}) fornecido pelo sonelastic corresponde ao módulo de elasticidade obtido com o ensaio de compressão paralela às fibras (E_{c0}).

6.4.5 Eucalipto Grandis - Ensaio de flexão (EMIC) x Ensaio não destrutivo (Sonelastic)

- Análise de Regressão Linear entre $E_M \times E_{dL}$ e $E_M \times E_{dF}$.

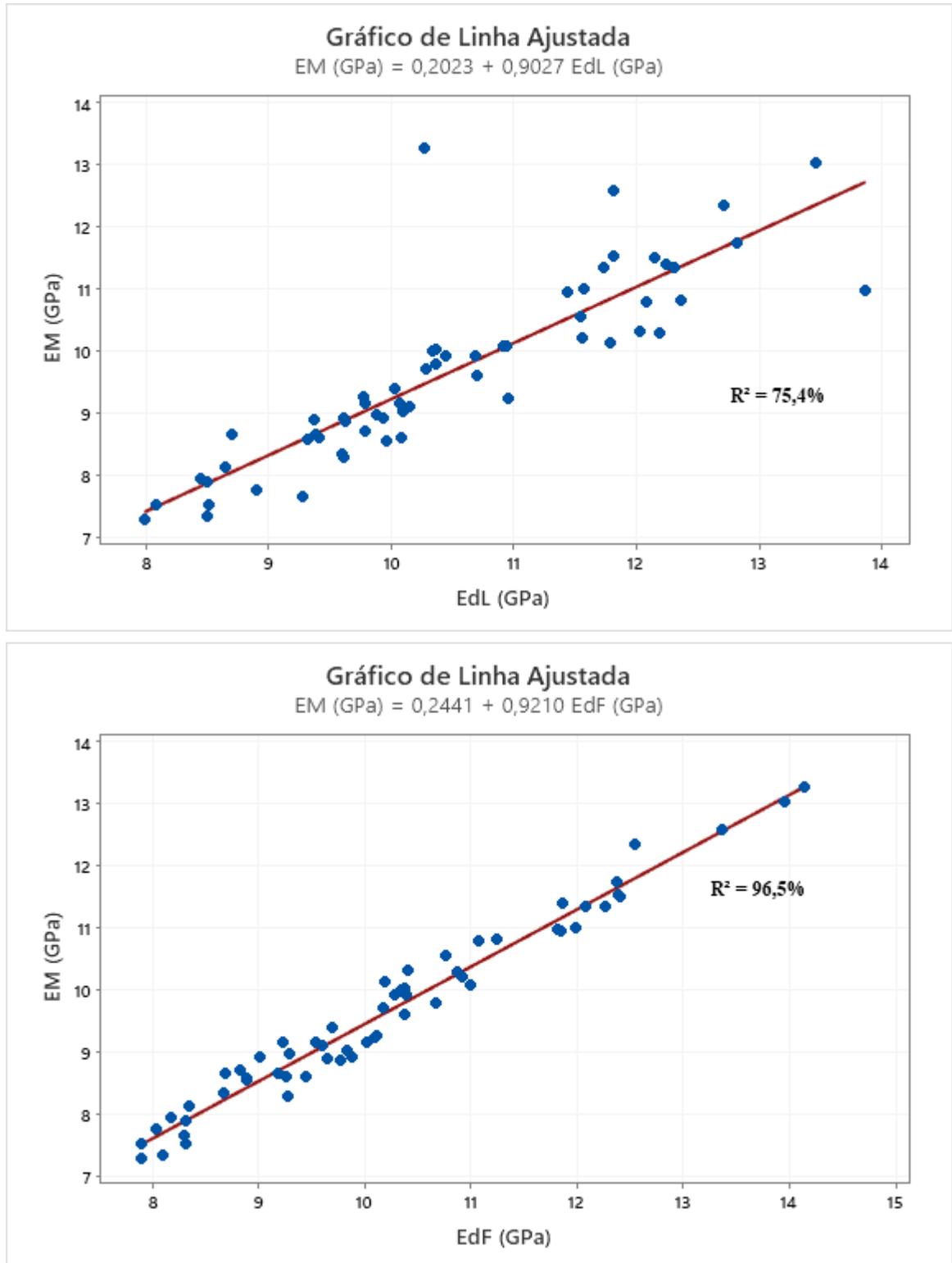
Para o Eucalipto Grandis comparou-se as amostras sem distinção de classe visual (Figura 47), em seguida a análise de regressão linear se deu apenas entre as amostras de Classe 1 (Figura 48) e, na sequência, a mesma análise se repetiu para investigar a Classe 2 (Figura 49) e Classe 3 (Figura 50).

Figura 47 – Regressão linear – Todas as Classes (Eucalipto Grandis)



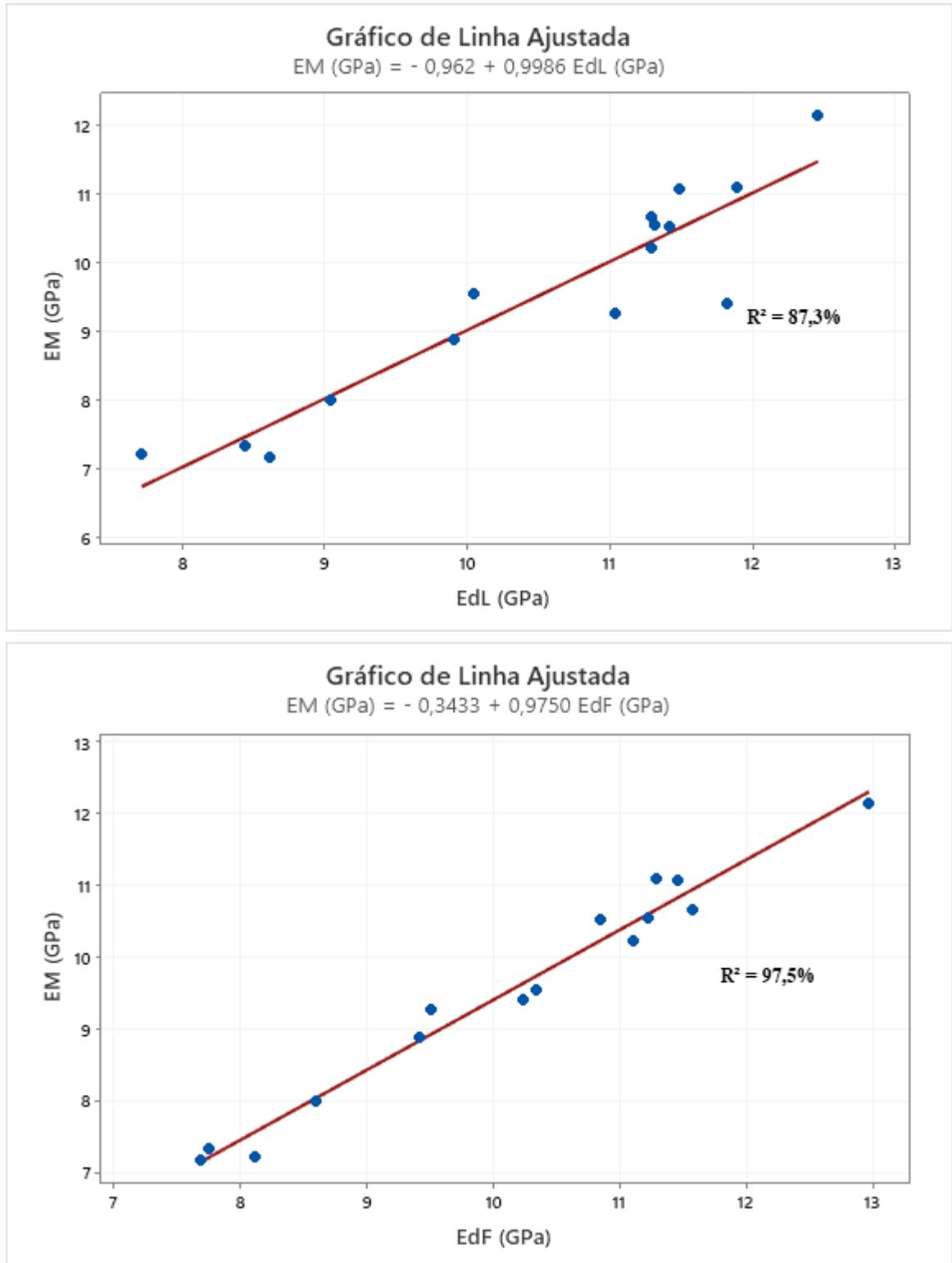
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 48 – Regressão linear - Classe 1 (Eucalipto Grandis)



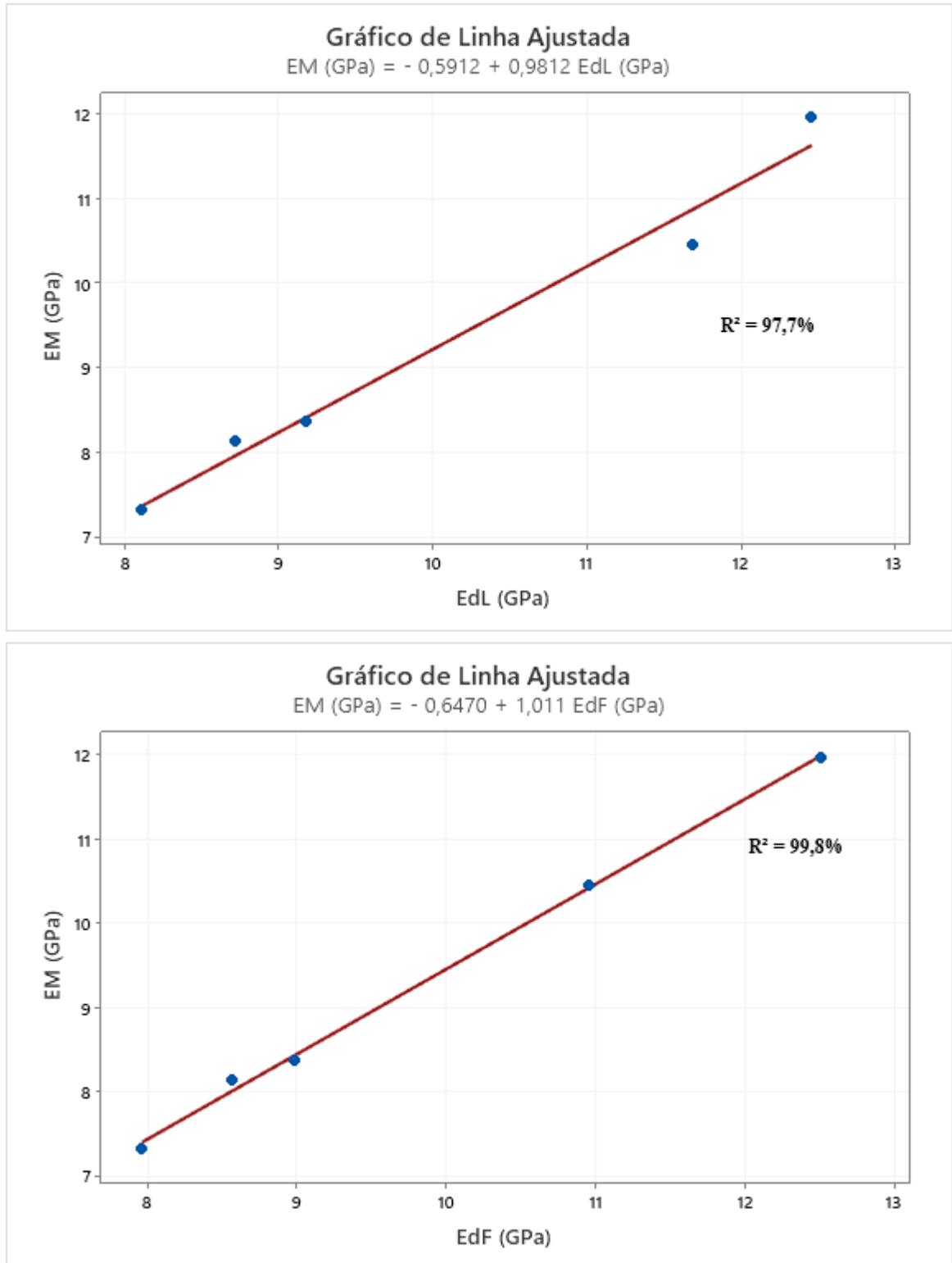
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 49 – Regressão linear - Classe 2 (Eucalipto Grandis)



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 50 – Regressão linear - Classe 3 (Eucalipto Grandis)



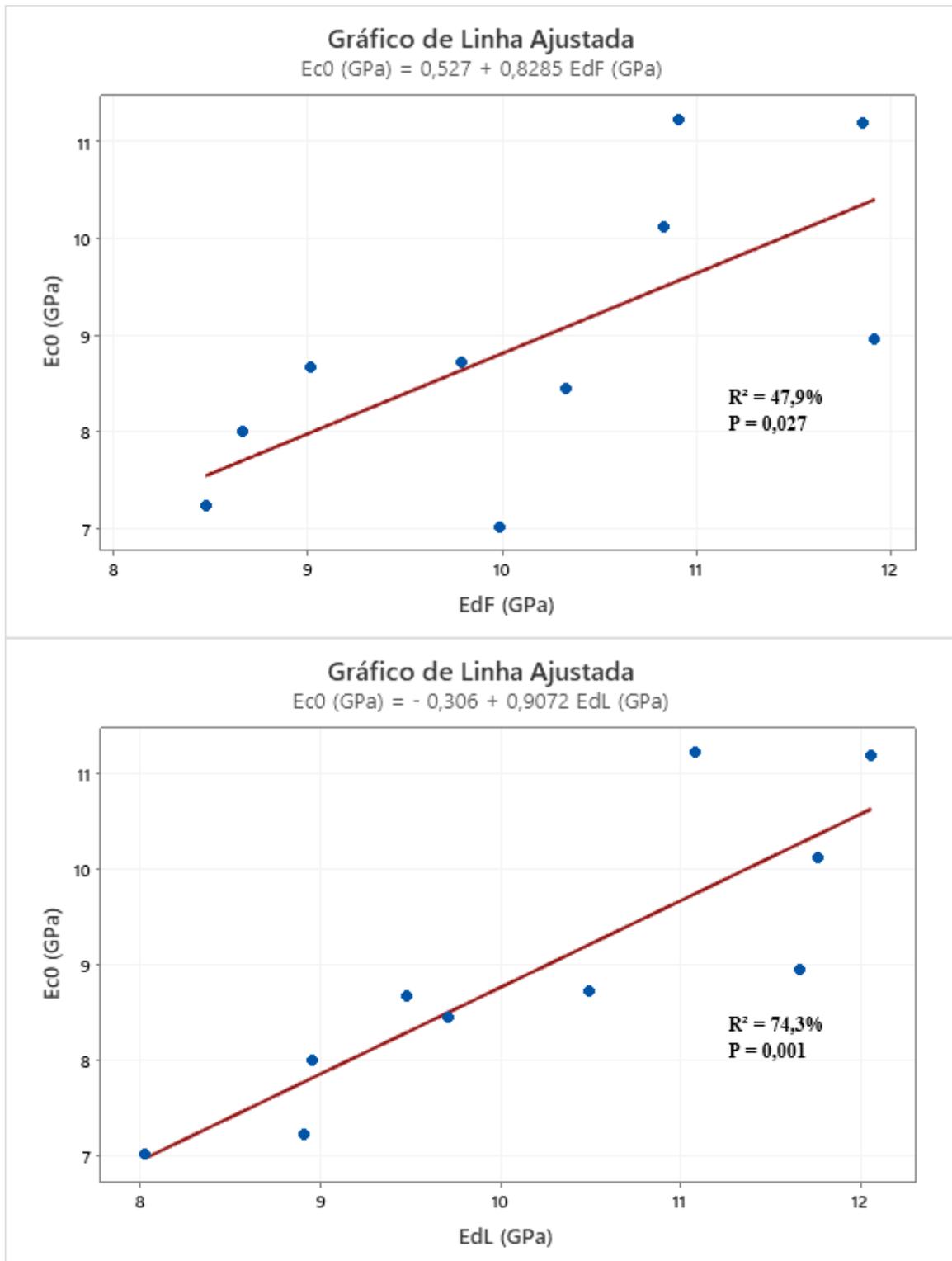
Fonte: Autoria própria (2021).

O valor de P para todas as combinações foi menor do que 0,05. Analisando os R^2 obtidos nota-se que todas as regressões lineares para o Eucalipto Grandis, apresentaram R^2 maiores do que 75 % (Forte). Destaca-se que a correlação entre E_M e E_{dF} , apresenta um R^2 maior se comparado com o R^2 obtido na correlação entre E_M e E_{dL} . Para os resultados obtidos entre Classes Visuais, nota-se que o R^2 da Classe 1 se eleva na Classe 2 e o mesmo se repete para a Classe 3, devido a diminuição dos Corpos causa uma interação maior entre os resultados.

6.4.6 Eucalipto Grandis - Ensaio de compressão destrutivo (EMIC) x Ensaio não destrutivo (Sonelastic)

- Análise de Regressão Linear entre E_{c0} x E_{dL} e E_{c0} x E_{dF} .

Tratando-se do ensaio destrutivo de compressão (E_{c0}), para o Cedro Indiano. Na Figura 51 apresenta-se a comparação da Rigidez, sem considerar as classes visuais, comparando E_{c0} com E_{dL} e E_{c0} com E_{dF} .

Figura 51 – Regressão linear para E_{c0} – (Eucalipto Grandis)

Fonte: Autoria própria (2021).

Notou-se que com a determinação R^2 obtidos, observou-se que para o Eucalipto Grandis, a correlação entre E_{c0} e E_{dL} , que apresentou um R^2 de 74,3%, indicando uma correlação forte e possuindo um R^2 maior do que a correlação entre E_{c0} e E_{dF} . Esses resultados indicam o fato de que o módulo dinâmico (E_{dL}) fornecido pelo Sonelastic corresponde ao módulo de elasticidade obtido com o ensaio de compressão paralela às fibras (E_{c0}).

7 CONCLUSÕES

A partir da análise visual realizada com base no método de PN 02.126.010-001, obteve-se as seguintes quantidades de lamelas em cada classe:

- Para o Cedro Australiano, de um total de 69 lamelas, 84,06 % classificadas na Classe 1 e 15,94 % na Classe 3. Para essa espécie de madeira, nenhuma lamela foi classificada na Classe 2;
- Para a madeira de Cedro Indiano, de 72 lamelas, 73,61 % foram classificadas na Classe 1, 1,39 % na Classe 2 e 25 % na Classe 3;
- No caso do Eucalipto Grandis, de um total de 80 lamelas, 75 % foram classificadas na Classe 1, 18,75 % na Classe 2 e 6,25 % na Classe 3.

As condições de apoio das lamelas tiveram influência dependendo do tipo de ensaio realizado.

- No caso do ensaio de excitação por impulso longitudinal (para determinação de E_{dL}), a variação das condições de apoio para as lamelas (com e sem o uso de apoios), não apresentou diferenças significativas.
- No caso do ensaio de excitação por impulso, para a condição de flexão (determinação de E_{dF}), a variação das condições de apoio comprometeu os resultados obtidos, sendo verificado, neste caso, resultados de rigidez mais precisos quando o ensaio foi executado com o microfone posicionado na parte central inferior, com impacto na lamela efetuado na parte superior, ao lado oposto de onde encontrava-se posicionado o microfone.

Notou-se também, através das análises estatísticas, que o módulo flexional E_{dF} apresentou melhor correlação com o módulo E_M para as três espécies de madeira estudadas, mostrando que a rigidez na flexão é equivalente ao ensaio não destrutivo flexional de excitação por impulso. No caso do módulo longitudinal E_{dL} observou-se melhor correlação com o módulo E_{c0} .

A análise de regressão linear, para maioria das madeiras estudadas, mostrou que quanto menor a classe de resistência menor foi coeficiente R^2 :

- No caso do Cedro Australiano, na relação entre E_M e E_{dL} , os valores de R^2 foram de 91,4% (Classe 1) para 88,2% (Classe 3), mostrando um decréscimo; para E_M e E_{dF} , os valores de R^2 foram de 96,2% (Classe 1) para 97,8% (Classe 3).
- No caso do Cedro Indiano em E_M e E_{dL} , os valores de R^2 foram de 96,7% (Classe 1) para 94,5% (Classe 3) mostrando um decréscimo, para E_M e E_{dF} , os valores de R^2 foram de 97,9% (Classe 1) para 74,3% (Classe 3).

- Tratando-se do Eucalipto Grandis na correlação de E_M e E_{dL} , os valores de R^2 foram de 75,4 %, 87,3 % e 97,7 %, respectivamente para Classe 1, 2 e 3, apresentando um incremento no R^2 , para E_M e E_{dF} , os valores de R^2 foram respectivamente de 96,5 %, 97,5 % e 99,8% (Classe 1, 2 e 3).

Com o decréscimo no número de amostras, torna-se necessária a realização de uma regressão linear com uma amostra maior do que a estudada neste trabalho (obtida em função da disponibilidade de madeira no laboratório) para a Classe 2 e 3 do Eucalipto Grandis.

A análise visual mostrou-se uma etapa importante para realização de ensaios não destrutivos, pois quanto menor foi o número de defeitos de uma peça, maior foi o coeficiente R^2 obtido, para o Cedro Indiano e Australiano.

De forma geral, os resultados fornecidos para os módulos de elasticidade flexional e longitudinal utilizando a TEI não diferiram estatisticamente do módulo elástico obtido através do ensaio de flexão estática de três pontos segundo o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997. Nesse sentido, conclui-se que o módulo de flexão estática (E_M) do ensaio de três pontos equivaleu ao módulo flexional (E_{dF}) obtido no ensaio de excitação por impulso flexional no Sonelastic, e o módulo longitudinal (E_{dL}), apresentou maior afinidade com o E_{c0} , obtido através do ensaio de compressão paralela às fibras.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, C. E. C. de; IWAKIRI, S.; KEINERT, S. J. “Adesão e adesivos”. In: IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005.

ALMEIDA, D. H. de *et al.* Caracterização completa da madeira da espécie amazônica Paricá (*Schizolobium amazonicum HERB*) em peças de dimensões estruturais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1175-1181, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000600019>. Acesso em: 26 out. 2020

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 1876**: standard test method for dynamic Young’s modulus, shear modulus and Poisson’s ratio by impulse excitation of vibration. Pennsylvania: ASTM, 2015.

AQUINO, V. B. M. **Análise das relações entre propriedades físicas e mecânicas em diferentes regiões de extração da madeira de Cambará (*Erismia Uncinatum Warm*)**. 2019. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/11088?show=full>. Acesso em: 20 out. 2020.

ARES, A.; FOWNES, J. H. Productivity, nutrient and water-use efficiency of *Eucalyptus saligna* and *Toona ciliata* in Hawaii. **Forest Ecology and Management**, Netherlands, v. 139, n. 1-3, p. 227-236, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037811270000270X?via%3Dihub>. Acesso em: 02 nov. 2020.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. CB-02 2º PN revisão ABNT **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PN 02:126.10-001-1**: madeiras: Critérios de classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira de florestas plantadas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

AS, N. *et al.* **Nondestructive evaluation of the tensile properties of structural lumber from the spruce-pine-fir species grouping**: relationship between grain angle and energy loss. Res. Note. FPL-RN-0382. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2020. v. 382, p. 1-14. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/59359>. Acesso em: 15 out. 2020.

ATCP ENGENHARIA FÍSICA. **Manual de instalação e operação**: software Sonelastic. Ribeirão Preto: ATCP E.F., 2011.

BALLARIN, A. W.; LARA PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda L.* **Revista Árvore**, Viçosa, p. 371- 380, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000300014>. Acesso em: 03 abr. 2021.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **O setor florestal no Brasil e a importância do reflorestamento**. Rio de Janeiro: BNDES, [2002]. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/3142>. Acesso em: 12 jan. 2021.

BENIN, C. C.; WATZLAWICK, L. F.; HILLIG, E. Physical and mechanical properties of *Eucalyptus benthamii* wood under the effect of the planting spacing. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 4, p. 1375-1384, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509830219>. Acesso em: 15 nov. 2020.

BIANCHI, N. A. **Avaliação da delaminação e da resistência da linha de cola de elementos de MLC com base no projeto de revisão da norma ABNT NBR 7190: 2013 considerando madeiras de reflorestamento tratadas com CCA e sem tratamento preservativo**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual de São Paulo, Guaratinguetá, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/192157>. Acesso em: 17 out. 2020.

BODIG, J. The process of NDE research for wood and wood composites. **The e-journal of nondestructive testing**, v. 6, n. 3, 2001.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. Estudo de algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus merkusii*. **Scientia forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 79, p. 237-243, 2008. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr79/cap08.pdf>. Acesso em: 17 out. 2020.

CALIL JÚNIOR, C.; MINÁ, A. J. S. Vibração transversal: um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 335-338, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662003000200025>. Acesso em: 03 abr. 2021.

CALIL NETO, C. **Madeira laminada colada (MLC): Controle de qualidade em combinações espécie – adesivo – tratamento preservativo**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-19042011-171909/pt-br.php>. Acesso em: 12 jan. 2021.

CALIL NETO, C. *et al.* Modelagem numérica do comportamento de ligações com parafusos auto-atarraxantes em X em corpos de prova de MLC com madeiras do tipo *Eucalypto urograndis*. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316705414_Modelagem_numerica_do_comportamento_de_ligacoes_com_parafusos_auto-atarraxantes_em_X_em_corpos_de_prova_de_MLC_com_madeiras_do_tipo_Eucalypto_urograndis. Acesso em: 02 nov. 2020.

CARRASCO, E.V. M. *et al.* Avaliação das características mecânicas da madeira por meio de excitação por impulso. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0272>. Acesso em: 17 out. 2020.

CARREIRA, M. R. **Crêterios para classifica o visual de peças estruturais de *Pinus sp.*** 2003. Disserta o (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-02082003-215557/pt-br.php>. Acesso em: 02 nov. 2020.

CARREIRA, M. R.; CANDIAN, M. Teste de um equipamento para classifica o de peças estruturais de madeira pela técnica da vibra o transversal. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 29, n. 1, p. 3-14, 2008. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/3bd8/996880baadbca183fa9298ffc580b3df95c7.pdf>. Acesso em: 26 out. 2020.

CARREIRA, M. R.; ALC NTARA SEGUNDINHO, P. G.; DIAS, A. A. Estimativa do módulo de elasticidade   flexão de toras de madeira por meio de vibra o transversal livre. **Construindo**, Belo Horizonte, v. 3, n. 1, 2011. Disponível em: <http://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/1755/1122>. Acesso em: 26 out. 2020.

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Metodologia para o cálculo dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal em vigas de madeira de dimensões estruturais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 4, p. 610-615, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/YHYBxYfS4N7P4P9wSKcDnDh/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 12 jan. 2021.

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Módulo de elasticidade em vigas de madeira de dimensões estruturais pelo método dos mínimos quadrados. **Revista  rvore**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 981-988, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/F6CP3FgbcQ8pCccRKcDzwWw/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 16 out. 2020.

COSSOLINO, L. C. *et al.* Avalia o da coerência entre três métodos de determina o do módulo de elasticidade da madeira de *Pinus Oocarpa*. **Madeira: arquitetura e engenharia**, São Carlos, v. 10, n. 25, p. 33-42, 2009. Disponível em: <http://madeira.set.eesc.usp.br/article/view/85>. Acesso em: 15 out. 2020.

COUTINHO, L. S. de A. L. *et al.* Modelagem do tempo de execu o de obras civis: estudo de caso na Universidade Federal do Pará. **Ambiente Construido**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 243-256, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/ctpQVqGTx5ZMgstmBjn3fkp/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 nov. 2020.

COUTO, H. D. Manejo de florestas e sua utiliza o em serraria. *In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZA O DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA*, 1., 1995, Piracicaba. **Anais [...]**. Piracicaba, SP: IPEF, 1995. p. 21-30. Disponível em: <https://docplayer.com.br/72240158-Manejo-de-florestas-e-sua-utilizacao-em-serraria.html>. Acesso em: 12 jan. 2020.

COSTA, E. M. A madeira de eucalipto na indústria moveleira. *In: SEMINÁRIO SOBRE PROCESSAMENTO E UTILIZA O DA MADEIRA DE REFLORESTAMENTO*, 1., 1996, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba, PR: ABPM/ SBS, 1996. p. 75-89. Disponível em:

https://www.ipef.br/publicacoes/anais/anais_seminario_internacional_utilizacao_madeira_eucalipto_serraria.pdf. Acesso em: 03 nov. 2020.

DERIKVAND, M.; PANGH, H. A modified method for shear strength measurement of adhesive bonds in solid wood. **BioResources**, Raleigh, v. 11, n. 1, p. 354-364, 2016. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/a-modified-method-for-shear-strength-measurement-of-adhesive-bonds-in-solid-wood/>. Acesso em: 12 jan. 2020.

DIAS, F. M. **A densidade aparente como estimador de propriedades de resistência e rigidez da madeira**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-24072009-145333/pt-br.php>. Acesso em: 16 out. 2020.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. A densidade aparente como estimador de propriedades de resistência e rigidez da madeira. **Madeira: arquitetura e engenharia**, São Carlos, v. 3, n. 8, p. 1-54, 2002. Disponível em: <http://madeira.set.eesc.usp.br/article/viewFile/407/pdf>. Acesso em: 15 out. 2020.

DUGMORE, M. *et al.* Bonding quality of cross-laminated timber: evaluation of test methods on *Eucalyptus grandis* panels. **Construction and Building Materials**, Edinburgh, v. 211, p. 217-227, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/331895314_Bonding_quality_of_cross-laminated_timber_Evaluation_of_test_methods_on_Eucalyptus_grandis_panels. Acesso em: 03 fev. 2021.

FARIA, D. L. *et al.* Estudo do comportamento mecânico de vigas de madeira laminada colada tratada de seringueira (*Hevea brasiliensis*). **Construindo**, Belo Horizonte, v. 12, n. 2, p. 38-47, 2020. Disponível em: <http://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/7390/3941>. Acesso em: 13 jan. 2021.

FARIA, D. L. *et al.* Influência do número de lâminas na resistência à compressão de madeira laminada colada (MLC) de *Toona ciliata* produzida com adesivo poliuretano vegetal. **Construindo**, Belo Horizonte, v. 11, n. 1, p. 33- 40, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338109001_INFLUENCIA_DO_NUMERO_DE_LAMINAS_NA_RESISTENCIA_A_COMPRESSAO_DE_MADEIRA_LAMINADA_COLADA_MLC_DE_TOONA_CILIATA_PRODUZIDA_COM_ADESIVO_POLIURETANO_VEGETAL. Acesso em: 17 nov. 2020.

FIRMINO, A. C.; MORAES, W. B. de; FURTADO, E. L. Primeiro relato de *Ceratocystis fimbriata* causando seca em *Acrocarpus fraxinifolius* no Brasil. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 41, n. 2, p. 160-160, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sp/a/PrBmC6y3g5b6g9VZkjbvVMv/?lang=pt>. Acesso em: 03 fev. 2021.

GREEN, D. W. *et al.* Improved grading system for structural logs for log homes. **Forest products jornal**, LaGrange, v. 54, n. 9, p. 52-62, 2004. Disponível em: https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2004/fpl_2004_green002.pdf. Acesso em 24 jan. 2021.

GOMES, N. B. **Análise de elementos estruturais de MLC na flexão com base na versão de revisão da norma ABNT NBR 7190: 2013**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual de São Paulo, Guaratinguetá, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/153503>. Acesso em: 17 out. 2020.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; CERRI, D. G. P. Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression test. **Wood and Fiber Science**, Pennsylvania, v. 43, n. 1, p. 64 - 75, 2011. Disponível em: 24 jan. 2021.

HILLIS, W. E. Wood quality and growing to meet market requirements. *In: THE FUTURE OF EUCALYPTUS FOR WOOD PRODUCTS*, 1., 2000, Launceston, Tasmania. **Proceedings** [...]. Launceston: IUFRO, 2000. p. 256 - 264. Disponível em: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2013000200006&lng=en&tlng=en. Acesso em 19 jan. 2021.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2019**. Brasília, [2019]. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**. Rio de Janeiro, [2014]. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2014_v29.pdf. Acesso em: 19 jan. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**. Rio de Janeiro, [2018]. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2018_v33_informativo.pdf. Acesso em: 19 jan. 2021.

JUNIOR, L. **Uso da técnica de excitação por impulso (TEI) para a caracterização da rigidez da madeira de *Eucalyptus grandis* de 10 anos da região de Itapeva/SP**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/157040>. Acesso em: 02 fev. 2021.

LI, X. *et al.* A coupling model based on grey relational analysis and stepwise discriminant analysis for wood defect area identification by stress wave. **BioResources**, Raleigh, v. 15, n. 1, p. 1171-1186, 2020. Disponível em: https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_15_1_1171_Li_Coupling_Model_Grey_Relational_Analysis. Acesso em; 23 mar. 2021.

LORENZI, H. *et al.* **Árvores exóticas no Brasil: madeiras, ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2003. Disponível em: <https://docero.com.br/doc/811sn5>. Acesso em: 08 mar. 2021.

MANGIALAVORI, A. *et al.* Dasometria en plantaciones comerciales de toona (*Toona ciliata* var. *australis*) em la Provincia de Salta. **Jornadas técnicas Forestales y Ambientales**,

Eldorado, v. 10, 2003. Disponível em: <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-toona.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2021.

MATOS, G. da S.; MOLINA, J. C. Resistência da madeira ao cisalhamento paralelo às fibras segundo as normas ABNT NBR 7190: 1997 e ISO 13910: 2005. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, p. 1069-1079, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/bMWCzwVJDSN8DYTKqjbH4xp/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 08 mar. 2021.

MODES, K. S. *et al.* Qualidade da madeira de *Pinus patula* Schltdl & Cham para produção de celulose. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 43, n. 2, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/8Cmx7R8RRNBjmXsqMN7F3hC/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 19 jan. 2021.

MOLINA, J. C. **Novas edições acadêmicas: a madeira na engenharia: teoria, experimentação e simulação**. São Paulo, 2017.

MOLINA, J. C. *et al.* Evaluation of C40 eucalyptus wood from static bending tests and by impulse excitation technique. In: INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 21., 2019, Freiburg - Germany. **Proceedings** [...]. Freiburg: USDA, 2019.

NASSUR, O. A. C. **Variabilidade das propriedades tecnológicas da madeira de *Toona ciliata m. roem.* com dezoito anos de idade**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/2455/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Variabilidade%20das%20propriedades%20tecnol%C3%B3gicas%20da%20madeira%20de%20Toona%20ciliata%20M.%20Roem.....pdf. Acesso em: 08 fev. 2021.

NAVICKAS, P. Effect of heat treatment on wettability and MOE of pine and spruce wood. **Materials Science**, Switzerland, v. 21, n. 3, p. 400-404, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/282178793_Effect_of_heat_treatment_on_wettability_and_MOE_of_pine_and_spruce_wood. Acesso em: 03 mar. 2021.

NAVROSKI, M. C. *et al.* Tolerância ao frio e características silviculturais do cedro-australiano no sul do Brasil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 37, n. 89, p. 47-54, 2017. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1257>. Acesso em: 26 abr. 2021.

NISGOSKI, S. *et al.* Anatomia da madeira de *Toona ciliata* características das fibras para produção de papel. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 4, 2011. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/25337>. Acesso em: 04 mar. 2021.

NOGUEIRA, R. **Proposta de um método de ensaio para controle de qualidade na produção de elementos estruturais de MLC e de LVL**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-22062017-102209/pt-br.php>. Acesso em: 13 jan. 2021.

OLIVEIRA, V. M. de. *et al.* Adequação às normas e qualidade da madeira serrada para fins estruturais comercializada no Distrito Federal. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, 2008.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/271144585_ADEQUACAO_AS_NORMAS_E_QUALIDADE_DA_MADEIRA_SERRADA_PARA_FINS ESTRUTURAIIS_COMERCIALIZADA_NO_DISTRITO_FEDERAL. Acesso em: 23 mar. 2021.

PAES, J. B. Resistência natural da madeira de *Corymbia maculata* (Hook.) K.D.Hill e L.A.S. Johnson a fungos e cupins xilófagos, em condições de laboratório. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 6, p. 761-767, 2002. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/260769083_Wood_natural_resistance_of_Corymbia_maculata_Hook_KDHill_LAS_Johnson_to_wood_destroying_fungi_and_termites_under_laboratory_tests. Acesso em: 07 mar. 2021.

PEREYRA, O. *et al.* Estudio de las propiedades físico-mecánicas y comportamiento en procesos industriales de la madera de kiri, grevílea, paraíso y toona. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 2, p. 213-223, 2006. Disponível em: . Acesso em: .

PINHEIRO, A. L.; LANI, J. L.; COUTO, L. Cedro australiano: cultivo e utilização (*Toona ciliata* M. Roem. Var. *australis* (F. Muell) Bahadur). **UFV**, Viçosa, 2006.

PINHEIRO, A. L.; LANI, J. L.; COUTO, L. Cedro australiano cultivo e utilização. **UFV**, Viçosa, 2003.

PIZZO, B. *et al.* Comparison of thermal expansion of wood and epoxy adhesives. **Holz als Roh - und Werkstoff**, Verlag, v. 60, p. 285-290, 2002. Disponível em:

[researchgate.net/publication/226166984_Comparison_of_thermal_expansion_of_wood_and_epoxy_adhesives](https://www.researchgate.net/publication/226166984_Comparison_of_thermal_expansion_of_wood_and_epoxy_adhesives). Acesso em: 15 out. 2020.

PONCE, R. H. Madeira serrada de eucalipto: desafios e perspectivas. *In*: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1., 1995, Piracicaba. **Anais** [...]. Piracicaba, SP: IPEF, 1995. p. 50-58.

Disponível em:

https://www.ipef.br/publicacoes/anais/anais_seminario_internacional_utilizacao_madeira_eucalipto_serraria.pdf. Acesso em: 16 out.2021.

PRADO, C. A. *et al.* Características físicas e químicas da madeira de *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn. **Embrapa Florestas**, Colombo, n. 14, 2003. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/281002>. Acesso em: 04 nov. 2020.

RITTER, M. A. **Timber bridges**: design, construction, inspection, and maintenance.

Washington: US Department of Agriculture, 1990. Disponível em:

<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.370.9189&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 14 dez. 2020.

ROSS, R. J. *et al.* **Transverse vibration nondestructive testing using a personal computer**. Madison: US Department of Agriculture, 1991. Disponível em:

<https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrp/fplrp502.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2020.

- ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. Nondestructive testing for assessing wood members in structures. **General Technical Report FPL-GTR**, Fort Collins, v. 70, p. 24061-0503, 1994. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/treeearch/pubs/5884>. Acesso em: 12 jan. 2021.
- SANTOS, L. L. **Estabelecimento de classes de resistência para a madeira serrada de *Pinus spp.*** 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-26112019-124533/publico/DO2019_LorenzoLubeSantos.pdf. Acesso em: 13 jan. 2021.
- SCHILLING, A. C. *et al.* Influência de diferentes intensidades de desrama sobre a porcentagem de lenho tardio e quantidade de nós da madeira de primeiro desbaste de *Pinus elliottii* Engelman. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 115-127, 1998. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/356>. Acesso em: 19 jan. 2021.
- SEGUNDINHO, P. G. de A. *et al.* Avaliação de vigas de madeira laminada colada de cedrinho (*Erismia uncinatum* Warm.). **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 441-449, 2013. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002433833>. Acesso em: 22 mar. 2021.
- SEGUNDINHO, P. G. de A. *et al.* Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1155-1162, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/hKMCNvL9ffvTfVHpYNhzGSG/?lang=pt>. Acesso em: 08 fev. 2021.
- SEGUNDINHO, P. G. de A. *et al.* Influência do teor de umidade na determinação do módulo de elasticidade de vigas de *Pinus sp.* **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 319-329, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/4ZnQykdhYCdCfZBcbWBtksm/?lang=pt>. Acesso em: 23 mar. 2021.
- SENA, C. *et al.* Determinação do módulo de elasticidade da madeira de *Eucalyptus pellita* por método não destrutivo. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADERA, 4., 2019, Montevideu. **Abstracts [...]**. Montevideu: ICIAM, 2019. Disponível em: <https://www.clem2019.uy/admin/files/clem2019/upload/files/FGRUPOELI-CLEM2019-4611012.pdf>. Acesso em: 16 out. 2020.
- SERPA, P. N. *et al.* Evaluation of some properties of *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* and *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 723-733, 2003. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/488/48827515.pdf>. Acesso em: 17 out. 2020.
- SILVA, J. B.; ROCHA, M. P.; I. JUNIOR, K. Metodologia de análise e diagnóstico da madeira na preservação do patrimônio histórico. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 2, 2010. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/17835>. Acesso em: 03 nov. 2020.
- SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira.** 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/26774/T%20>

%20SILVA%2C%20JOSE%20DE%20CASTRO.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 02 nov. 2020.

SOMAVILLA, A. *et al.* Avaliações morfológicas de mudas de Cedro australiano submetidas a diferentes doses do fertilizante Osmocote Plus®. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v. 5, n. 4, p. 493-498, 2014. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5000805.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2021.

SOUZA, J. C. A. V. de *et al.* Propagação vegetativa de cedro-australiano (*Toona ciliata M. Roemer*) por miniestaquia. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, p. 205-213, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/gbK7n5KJV6Kzzb5FbgCprZq/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 17 nov. 2020.

THEBALDI, M. S. *et al.* Dinâmica das características químicas de um substrato florestal exposto à irrigação. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 2, p. 375-384, 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/18456>. Acesso em: 14 out. 2020.

TREVISAN, R. *et al.* Dimensões das fibras e sua relação com a idade de transição entre lenho juvenil e adulto de *Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 4, p. 1385-1393, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/30220/0>. Acesso em: 16 nov. 2020.

TRIANOSKI, R. *et al.* Viabilidade da utilização de *Acrocarpus fraxinifolius* em diferentes proporções com *Pinus* spp. para produção de painéis aglomerados. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 343-350, 2011. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr91/cap06.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2020.

TRIANOSKI, R.; DE MATOS, J. L. M.; IWAKIRI, S. Propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira de cedro australiano cultivado em Corupá, SC. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 80, p. 435-441, 2014. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/523>. Acesso em: 09 fev. 2021.

VENTURIN, N. *et al.* Desempenho silvicultural de *Acrocarpus fraxinifolius* Wight em função de diferentes espaçamentos e idades. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 4, p. 629-636, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cerne/a/5cHtYFFd6SHB3L7grq7xFsw/?lang=pt>. Acesso em: 23 mar. 2020.

ZIECH, R. Q. S. **Características tecnológicas da madeira de cedro australiano (*Toona ciliata M. Roem*) produzida no sul do Estado de Minas Gerais**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/2773>. Acesso em: 08 fev. 2021.

ZENID, G. J. *et al.* **Madeira: uso sustentável na construção civil**. São Paulo, SP: SVMA, 2009. Disponível em: https://www.ipt.br/download.php?filename=6-Madeiras:_uso_sustentavel_na_construcao_civil.pdf. Acesso em: 25 jan. 2021