



Universidade Estadual Paulista

“Júlio de Mesquita Filho”



FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

MAURI PEDROSO DE LIMA JUNIOR

**UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO PARA
CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE PAINÉIS DE PARTÍCULAS
COM ADIÇÃO DE CASCA DE EUCALYPTUS SSP**

Bauru, SP
Julho – 2019

MAURI PEDROSO DE LIMA JUNIOR

**UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO PARA
CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE PAINÉIS DE PARTÍCULAS
COM ADIÇÃO DE CASCA DE EUCALYPTUS SSP**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru, programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na Área Processos de Fabricação, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ivaldo De Domenico Valarelli
Coorientadora: Prof. Dra. Elen Aparecida Martines Morales

Bauru, SP
Julho – 2019

L732u

Lima Junior, Mauri Pedroso de

Utilização da Técnica de Excitação por Impulso para
Caracterização mecânica de painéis de partículas com adição de casca
de Eucalyptus ssp / Mauri Pedroso de Lima Junior. -- Bauru, 2019
106 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Ivaldo De Domenico Valarelli

Coorientadora: Elen Aparecida Martines Morales

1. Técnica de Excitação por Impulso. 2. Aglomerado. 3. Resíduos.
4. Madeira. 5. Técnica não destrutiva. I. Título.

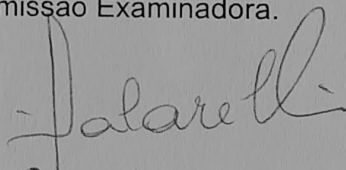
Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

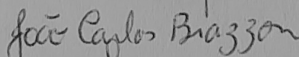
ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MAURI PEDROSO DE LIMA JUNIOR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 23 dias do mês de agosto do ano de 2019, às 13:30 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. IVALDO DE DOMENICO VALARELLI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. JOÃO CARLOS BIAZZON do(a) Engenharias / Faculdade Anhanguera de Itapeva, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MAURI PEDROSO DE LIMA JUNIOR, intitulada **UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO PARA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE PAINÉIS DE PARTÍCULAS COM ADIÇÃO DE CASCA DE EUCALYPTUS SSP**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

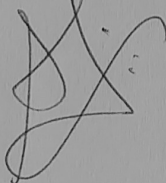
Prof. Dr. IVALDO DE DOMENICO VALARELLI



Prof. Dr. JOÃO CARLOS BIAZZON



Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI



Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por dar a possibilidade de realizar este mestrado, e me dar a dádiva de acordar todos os dias para correr atrás dos meus sonhos.

Agradeço aos meus pais Mauri Pedroso de Lima e Carla Rierica Camargo Pedroso de Lima por me proporcionarem a estrutura e me apoiarem sempre durante toda a minha vida, e também por me proporcionarem a alegria de realizar um sonho de concluir meu mestrado.

Agradeço à minha noiva Polyana Ferreira Salles, a qual eu amo muito, por ter sido uma pessoa mais que especial em minha vida, me ajudando durante os momentos difíceis e vibrando nos momentos felizes, e durante todo o mestrado sempre me apoiando em todas as minhas decisões, nunca deixando de me ajudar.

Agradeço a toda minha família por fazer parte da minha formação, sempre me apoiando e incentivando a dar o meu melhor.

Agradeço a meu grande amigo e mentor Paulo Salomão, por todos os ensinamentos e apoios durante meu mestrado, e por ser um grande exemplo pra mim.

Agradeço meu orientador Ivaldo de Domenico Vallareli, por todo o conhecimento que me passou, conhecimento estes sendo profissional e pessoal, e por me orientar e ajudar durante todos os trabalhos realizados juntos.

Agradeço minha co-orientadora Elen Aparecida Martines Morales, que me orienta desde a graduação com magnificência.

Agradeço a Marcus, Fábio, Silvia, Andreia, Vitor, João Carlos, todo o grupo de estudo de madeira, por me ajudarem e colaborarem neste trabalho.

Agradeço a todos meus amigos, por me ajudarem durante toda o mestrado e por sempre estarem ao meu lado.

Agradeço aos meus professores com os quais pude aprender e colher o máximo de conhecimento possível.

Agradeço a Faidiga madeiras, pela doação dos resíduos, que foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço a Kehl, pela doação dos adesivos, que foram fundamentais para a fabricação dos painéis.

Agradeço a CAPES pelo financiamento da pesquisa.

Dedico este trabalho:

Dedico este trabalho com muito amor à uma pessoa que eu sinto muita saudade e que eu amo muito, minha querida e amada Mãe Adriana Alves Ferreira Lima, uma vencedora, que me ensinou a lutar e dar o meu melhor durante a minha vida, e que é um exemplo para mim eternamente. Eu sei que está no céu junto à Deus, mas aproveito para agradecer por tudo que fez por mim, por me amar tanto e cuidar de mim com tanto carinho e amor. Te amo mamãe.

“Cada sonho que você deixa para trás, é um pedaço do seu futuro que deixa de existir”

Steve Jobs

RESUMO

Dentre as aplicações da madeira, está o setor de painéis, este explora melhorar as propriedades físicas e mecânicas com relação a madeira maciça, diminuindo a variabilidade dessas propriedades, tornando-se um material mais homogêneo. Para o estudo da qualidade destes painéis, são feitas as caracterizações físicas e mecânicas. Com o avanço tecnológico, surgiram novos métodos para caracterização mecânica dos materiais, estes visando técnicas não destrutivas, onde determinam-se as propriedades mecânicas sem a ruptura do material. A Técnica de Excitação por Impulso (TEI), que constitui-se de uma impacto mecânico na extremidade de um corpo de prova, seguido da captação acústica por um sensor localizado em sua outra extremidade, propicia a determinação da frequência natural do material e consequente cálculo do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico. O objetivo deste estudo é a caracterização físico-mecânica por meio de técnicas destrutivas e não destrutivas painéis aglomerados produzidos por meio de resíduos de indústrias madeireiras, com adição de casca de *Eucalyptus ssp*. Com os dados obtidos para módulo de elasticidade por meio da TEI, nos quatro traços estudados, concluiu-se que a variação de porcentagem de casca de 0 à 15%, não afetaram na rigidez dos painéis. Os dados obtidos para resistência à tração superficial e força máxima resistente ao arrancamento de parafuso de topo e face, para os quatro traços estudados, não apresentaram diferenças estatísticas com a variação de casca de 0 a 15%. Com os valores encontrados para módulo de elasticidade dinâmico e estático, e por meio de uma análise de regressão, encontrou-se o coeficiente de diferenciação $R^2 = 0,97$, sendo superior aos estudos realizados para madeira maciça, demonstrando que o ótimo comportamento homogêneo do material proporcionou pouca variação nas frequências de ressonância.

Palavra-chave: Técnica de Excitação por Impulso, Aglomerado, Resíduos.

ABSTRACT

Among the applications of wood is the panel sector, this one explores improving the physical and mechanical properties with respect to solid wood, reducing the variability of these properties, becoming a more homogeneous material. For the study of the quality of these panels, the physical and mechanical characterizations are made. With the technological advance, new methods for the mechanical characterization of the materials appeared, aiming at non-destructive techniques, where the mechanical properties were determined without material rupture. The Impulse Excitation Technique (TEI), which consists of a mechanical impact at the end of a test piece, followed by acoustic pickup by a sensor located at its other end, allows the determination of the natural frequency of the material and consequent calculation of the dynamic longitudinal modulus of elasticity. The objective of this study is the physical-mechanical characterization by means of destructive and non destructive techniques agglomerated panels produced by means of residues from logging industries, with the addition of *Eucalyptus* spp. With the data obtained for modulus of elasticity through the TEI, in the four traits studied, it was concluded that the percentage variation of bark from 0 to 15%, did not affect the rigidity of the panels. The data obtained for surface tensile strength and maximum strength resistant to the top and face screw plucking, for the four traits studied, did not present statistical differences with the bark variation of 0 to 15%. With the values found for dynamic and static elastic modulus, and through a regression analysis, the coefficient of differentiation $R^2 = 0.97$ was found, being superior to the studies carried out for solid wood, demonstrating that the homogeneous good behavior of the material provided little variation in the resonance frequencies.

Keywords: Impulse Excitation Technique, Agglomerate, Residues.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS – Acrilonitrilo-butadieno-estireno
ANOVA – Análise de Variância
BING – *Beam Identification by Nondestructive Grading*
BOF – Bio-óleo-fenol-formaldeído
CL – *Cupressus lusitanica*
CLT – Madeira Laminada Cruzada
 E_d – Módulo de elasticidade dinâmico
 E_e – Módulo de elasticidade estático
MDP – Painéis de fibras de densidade média
MEF – Método dos elementos finitos
MNFFP – Perceptron Multicamadas de Avanço Normal
MOE – Módulo de elasticidade
MOR – Módulo de ruptura
NDT – *Nondestructive Techniques*
OBS – Painéis de lascas orientadas
PC – *Populos x Canadian*
PF – Fenol-formaldeído
PMBE- Estrato de casca de *Pinus massoniana*
PS – Poliestireno
RNA – Redes Neurais Artificiais
TEI – Técnica de Excitação por Impulso
UF – Ureia-formaldeído
W/C – Madeira/Cimento
WPC – Compósitos de madeira-plástica

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico representativo do número de publicações na área dos métodos não destrutivos nas últimas décadas.....	28
Figura 2 – Gráficos da relação linear entre o pH e as capacidades de tamponamento absoluto e relativo.....	33
Figura 3 – Módulo de elasticidade para tratamentos com baixa, media e alta densidade.....	34
Figura 4 – Módulo de elasticidade do PS-WPC.....	36
Figura 5 – Módulo de elasticidades dos painéis fabricados.....	38
Figura 6 – Demonstração do teste não destrutivo de flexão.....	42
Figura 7 – Equipamentos utilizados na técnica de excitação por impulso.....	44
Figura 8– Ilustração da Técnica de Excitação por Impulso.....	44
Figura 9 – Análise de regressão entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico para 29 espécies.....	45
Figura 10 – Análise de regressão entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico de componentes de forma para concreto.....	46
Figura 11 – Análise de regressão entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico de <i>Eucalyptus grandis</i> em três alturas.....	47
Figura 12 – Pilha de cavacos da empresa Faidiga.....	48
Figura 13 – Pilha de casca da empresa Faidiga.....	48
Figura 14 – Adesivo poliuretano à base de mamona.....	49
Figura 15 – Picador Marconi MA680/3.....	50
Figura 16 – Agitador elétrico Bertel.....	50
Figura 17 – Estufa com circulação e renovação de ar SOLAB.....	51
Figura 18 – Pré-prensa laboratorial.....	52
Figura 19 – Processo de prensagem em execução.....	53
Figura 20 – Prensa hidráulica.....	53
Figura 21 – Painel produzido.....	53
Figura 22 – Processo de usinagem.....	54
Figura 23 – Corpos de prova usinados.....	54
Figura 24 – Balança digital Marte.....	55
Figura 25– Paquímetro digital Mitutoyo.....	56
Figura 26 – Micrômetro Mitutoyo.....	56

Figura 27 – Corpos de prova submersos em água.....	57
Figura 28 – Ensaio de Flexão Estática.....	59
Figura 29 – Ensaio de arranchamento de parafuso.....	60
Figura 30 – Ensaio de resistência superficial.....	61
Figura 31 – Entrada do Sonelastic® Tecnologia PC Based.....	62
Figura 32 – Saída do Sonelastic® Tecnologia PC Based.....	63
Figura 33 – Ensaio não destrutivo: Técnica de Excitação por Impulso.....	63
Figura 34 – Boxplot massa específica para os quatro traços.....	66
Figura 35 – Boxplot inchamento em espessura 24 horas para os quatro traços.....	67
Figura 36 – Boxplot absorção de água para os quatro traços.....	69
Figura 37 – Boxplot umidade específica para os quatro traços.....	71
Figura 38 – Boxplot módulo de ruptura para os quatro traços – Unesp Itapeva.....	77
Figura 39 – Boxplot módulo de elasticidade para os quatro traços – Unesp Itapeva...74	
Figura 40 – Boxplot resistência a tração perpendicular para os quatro traços.....	76
Figura 41 – Boxplot resistência à tração superficial para os quatro traços.....	77
Figura 42 – Boxplot força máxima resistente de arrancamento de parafuso da face para os quatro traços.....	79
Figura 43 – Boxplot força máxima resistente de arrancamento de parafuso de topo para os quatro traços.....	80
Figura 44 – Boxplot frequência para os quatro traços.....	82
Figura 45 – Boxplot módulo de elasticidade dinâmico para os quatro traços.....	83
Figura 46 – Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e estático.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores médios mensais dos resíduos gerados na manufatura de painéis.....	30
Tabela 2 – Resultados dos testes realizados nos painéis particulados.....	31
Tabela 3 – Propriedades do painel de partículas de <i>Rhizophora</i>	32
Tabela 4 – Composição estimada dos resíduos.....	35
Tabela 5 – Valores médio das propriedades mecânicas dos painéis particulados.....	39
Tabela 6 – Valores médios de estabilidade dimensional e resistência a decomposição dos painéis particulados.....	39
Tabela 7 – Distribuição de materiais por traços.....	52
Tabela 8 – Massa específica (g/cm ³) para os quatro traços.....	65
Tabela 9 – Inchamento e espessura 24 horas (%) para os quatro traços.....	67
Tabela 10 – Absorção de água 24 horas (%) para os quatro traços.....	68
Tabela 11 – Umidade específica (%) para os quatro traços.....	70
Tabela 12 – MOR e MOE para os quatro traços.....	72
Tabela 13 – Resistência à tração perpendicular (MPa) para os quatro traços.....	75
Tabela 14 – Resistência à tração superficial (MPa) para os quatro traços.....	77
Tabela 15 – Força máxima resistente ao arrancamento de parafusos (kgf) para os quatro traços.....	78
Tabela 16 – Frequência (Hz) para os quatro traços.....	81
Tabela 17 – Módulo de elasticidade dinâmico (GPa) para os quatro traços.....	83
Tabela 18 – E _d e E _e (GPa) para os quatro traços.....	84

Sumário

1. Introdução	27
1.1 <i>Objetivos</i>	29
2. Revisão bibliográfica	30
2.1 <i>Painéis de partículas</i>	30
2.2 <i>Resíduos de madeira</i>	35
2.3 <i>Casca</i>	37
2.4 <i>Caracterização mecânica por método não destrutivo</i>	40
2.5 <i>Técnica de Excitação por impulso</i>	43
3. Materiais e métodos	48
3.1 <i>Materiais</i>	48
3.2 <i>Fabricação</i>	49
3.3 <i>Ensaaios físicos</i>	55
3.3.1 <i>Massa específica</i>	55
3.3.2 <i>Inchamento em espessura 24 horas</i>	56
3.3.3 <i>Absorção de água 24 horas</i>	57
3.3.4 <i>Umidade específica</i>	57
3.4 <i>Ensaaios mecânicos</i>	58
3.4.1 <i>Ensaio de flexão estática</i>	58
3.4.2 <i>Ensaio de tração perpendicular às faces</i>	59
3.4.3 <i>Ensaio de arrancamento de parafuso</i>	60
3.4.4 <i>Ensaio de resistência superficial</i>	60
3.4.5 <i>Ensaio não destrutivo</i>	61
3.5 <i>Análises estatísticas</i>	64
4. Resultados e Discussão	65
4.1 <i>Ensaaios Físicos</i>	65
4.1.1 <i>Massa específica</i>	65
4.1.2 <i>Inchamento em espessura 24 horas</i>	66
4.1.3 <i>Absorção de água 24 horas</i>	68
4.1.4 <i>Umidade específica</i>	70
4.2 <i>Ensaaios mecânicos</i>	72
4.2.1 <i>Flexão estática</i>	72
4.2.2 <i>Tração perpendicular</i>	75

4.2.3 Tração superficial.....	77
4.2.4 Arrancamento de parafuso.....	78
4.3 <i>Técnica de Excitação por Impulso</i>	81
4.3.1 Frequências naturais de vibração.....	81
4.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico.....	83
4.3.3 Eficiência da Técnica de Excitação por Impulso.....	84
4.4 <i>Quantidade de casca gerada por mês</i>	86
5. Conclusões	87
5.1 <i>Sugestões para pesquisas futuras</i>	88
6. Referências bibliográficas	89

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a tradicional madeira maciça está sendo substituída por diferentes modelos de painéis de partículas aglomeradas, em virtude da relação custo/benefício e da crescente conscientização da sociedade a respeito da exploração indiscriminada de reservas florestais (Tomaselli e Delespinasse, 1997). O aumento da disponibilidade de resíduos gerados pelas indústrias madeireiras cresce há algumas décadas e, na maioria das vezes, não tem um descarte ou reaproveitamento adequado, sendo incinerados ou descartados em locais impróprios (BRAND *et al.*, 2004).

A carbonização e a combustão da madeira é uma das alternativas de redução dos resíduos de indústrias madeireiras, contudo, o processo, apesar de reduzi-los, provoca impactos negativos ao meio ambiente, causados pela liberação de gases e derivados nocivos à natureza, sendo assim, a utilização dos resíduos em artefatos é uma das soluções menos prejudiciais ao meio (FONTES, 1994).

Segundo Iwakiri *et al.* (2005) o painel de partículas aglomeradas tem uma série de vantagens em relação à madeira serrada, sendo algumas delas: minimização dos efeitos da anisotropia; maior uniformidade de propriedades físico-mecânicas em diferentes pontos do painel; eliminação de defeitos naturais como nós, inclinação da grã e tensões de crescimento; possibilidade de controle das propriedades físico-mecânicas do painel por meio das variáveis do processo produtivo.

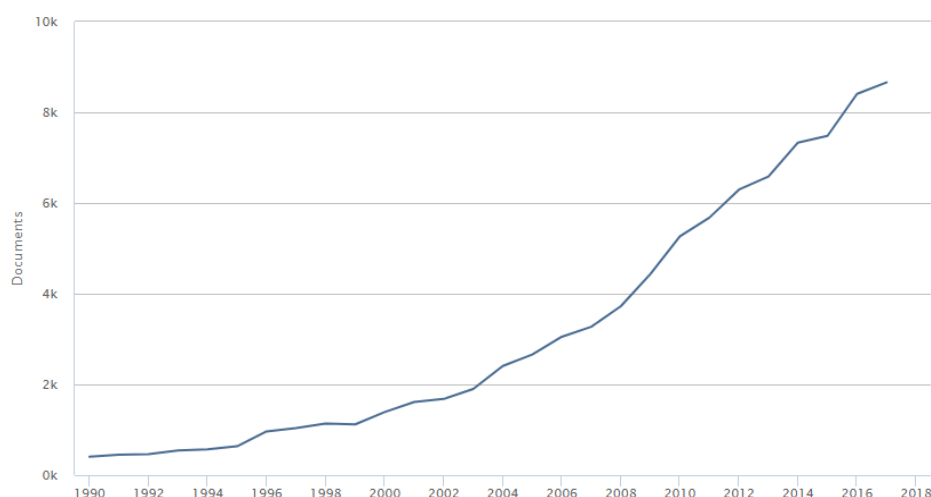
Geralmente as propriedades tecnológicas da madeira e seus compósitos são avaliadas por meio de métodos destrutivos que, por vezes, são onerosos em razão do tempo consumido com a confecção dos corpos de prova e custo dos equipamentos, onde obtém-se apenas uma estimativa de valores, porque os ensaios são realizados por meio de amostragem e não da peça real em uso. Os métodos não destrutivos foram propostos internacionalmente por Jayne (1959) e no Brasil essa técnica começou a ser estudada apenas no final da década de 1980 (STANGERLIN *et al.*, 2010).

Distintos métodos são empregados para a classificação das propriedades mecânicas da madeira, com enfoque na rigidez da madeira, que é determinado por meio do cálculo do módulo de elasticidade longitudinal, utilizando ensaios destrutivos e não destrutivos, tais como os métodos de vibração transversal, de ondas de tensão e de ondas de ultrassom.

Métodos não destrutivos possuem vantagens de aplicação quando comparados aos métodos destrutivos, uma vez que não exigem a extração de corpo de prova, a avaliação é feita na própria peça ou estrutura, têm custo/benefício favorável e, em especial, possibilitam a caracterização eficaz da madeira, promovendo melhor escolha e utilização do material.

O estudo dos métodos não destrutivos para caracterização mecânica dos materiais encontra-se em ascensão. Nas últimas décadas, baseado em uma pesquisa feita na plataforma Scopus, representado na Figura 1, pode-se ver o grande salto nas publicações relacionados a este tema.

Figura 1 – Gráfico representativo do número de publicações na área dos métodos não destrutivos nas últimas décadas.



Fonte: Scopus (2018).

Este estudo propõe a utilização do método não destrutivo “Técnica de Excitação por Impulso” para caracterização de painéis desenvolvidos a partir do aproveitamento de resíduos de indústrias madeireiras, proporcionando aumento do lucro, e, garantindo a sustentabilidade econômica e ambiental.

1.1 Objetivos

Objetivo geral:

Analisar a eficácia da técnica de excitação por impulso (TEI) para caracterização da rigidez de painéis particulados produzidos com resíduos de indústrias madeireiras com adição de casca de *Eucalyptus ssp.*

Objetivos específicos:

- Fabricar e avaliar a variação das propriedades mecânicas entre painéis particulados produzidos, nas proporções de casca de cada traço;
- Fabricar e avaliar a variação das propriedades físicas entre painéis particulados produzidos, nas proporções de casca de cada traço;
- Realizar a caracterização de módulo de elasticidade na flexão estática de painéis particulados produzidos com resíduos de indústrias madeireiras com adição de casca de *Eucalyptus ssp.*;
- Realizar a caracterização de módulo de elasticidade longitudinal dinâmico de painéis particulados produzidos com resíduos de indústrias madeireiras com adição de casca de *Eucalyptus ssp.*, por meio da aplicação da TEI;
- Estudar a correlação entre o módulo de elasticidade na flexão estática, obtido no ensaio destrutivo, com o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico, obtido na TEI, visando analisar a eficácia do método não destrutivo;
- Contribuir para a classificação de compósitos com dados científicos sobre as propriedades físico/mecânicas, para o incentivo de utilização dos resíduos industriais madeireiros, visando a sustentabilidade econômica e ambiental.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Painéis de partículas

Seifert (1958), um dos primeiros pesquisadores a estudar os painéis de partículas e fibras, estudou as porcentagens dos componentes químicos presentes na madeira e na resina fenólica, e descreveu um método para analisar e determinar a quantidade e o tipo de adesivo para a produção dos painéis à base de madeira, método este que permitiu a determinação dos componentes mais importantes do adesivo.

Na atualidade, a tradicional madeira maciça está sendo substituída por vários tipos de painéis, em virtude da relação custo/benefício e da crescente conscientização da sociedade a respeito da exploração indiscriminada de reservas florestais (TOMASELLI e DELESPINASSE, 1997).

Brand *et al.* (2004) desenvolveram um trabalho no setor de manufatura de painéis e avaliaram o processo produtivo de painéis por meio do balanço de material e do rendimento da matéria prima. Com os dados obtidos (Tabela 1), os autores concluíram que ocorreu um aumento da disponibilidade de resíduos gerados pelas indústrias madeireiras, que, na maioria das vezes, incineram-nos ou descartam em locais impróprios, e apenas uma parte do resíduo gerado era destinada à venda, representando 18,66% do total gerado mensalmente na empresa.

Tabela 1 – Valores médios mensais dos resíduos gerados na manufatura de painéis.

Atividade	Volume de resíduo gerado		Participação do total de resíduo gerado (%)		Volume vendido	Volume queimado
	Média	DP	Média	DP		
Classificação de madeira	1667,79	774,65	36,34	11,15		1667,79
Prep. sarrafos madeira p/ coladeira	2557,17	784,10	55,71	12,14		
Prep. sarrafos de painel multilam. p/ coladeira	125,88	156,54	2,74	4,43		
Esquadrejadeira	119,74	26,10	2,61	1,05		
Lixadeira	107,11	49,59	2,33	1,45	107,11	
Seccionadora	12,28	11,56	0,27	0,34		
TOTAL	4589,96		100		808,58	3781,39

Fonte: Brand *et al.*, 2004.

O painel aglomerado é produzido a partir de pequenas partículas de madeira impregnadas com resina, e consolidado por meio da aplicação de calor e pressão. É um produto amplamente empregado na fabricação de móveis, em razão de suas

características tecnológicas, custo competitivo e escala de produção (IWAKIRI et al., 1995).

Segundo Iwakiri *et al.* (2005), os aglomerados possuem uma série de vantagens em relação à madeira serrada: minimização dos efeitos da anisotropia; maior uniformidade de propriedades físico-mecânicas em diferentes pontos do painel; eliminação de defeitos naturais, como nós, inclinação da grã e tensões de crescimento; possibilidade de controle das propriedades físico-mecânicas do painel por meio das variáveis do processo produtivo, como tipo e quantidade de resina, geometria de partículas, grau de densificação, entre outras; menor exigência em termos da qualidade da madeira, possibilitando o uso de resíduos provenientes de outras fontes de processamento; maior produção devido à tecnologia empregada e ao menor custo de produção.

Moubarik *et al.* (2013) determinaram o efeito do teor de farinha de milho da resina ureia-formaldeído (UF) nas propriedades do painel de aglomerado. Os autores avaliaram as propriedades físicas, mecânicas e a emissão de formaldeído dos painéis, e os resultados (Tabela 2) mostraram que a introdução de pequenas proporções de farinha de milho em resinas UF contribui para melhorias das propriedades mecânicas e físicas dos painéis e reduz suas emissões de formaldeído.

Tabela 2 – Resultados dos testes realizados nos painéis particulados.

Resins	Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Dry IB (N/ mm ²)	MOR (N/mm ²)		MOE (N/mm ²)		TS (%) after 24 h	Formaldehyde emission (mg/l)
				Length direction	Width direction	Length direction	Width direction		
				Mean $\pm$ S.D	Mean $\pm$ S.D	Mean $\pm$ S.D	Mean $\pm$ S.D	Mean $\pm$ S.D	
Control UF	19.24	680	0.54 $\pm$ 0.03	13.8 $\pm$ 1.0	14.3 $\pm$ 0.8	2754 $\pm$ 144	2651 $\pm$ 97	13.1 $\pm$ 1.3	0.81
Corn flour/UF (7:93)	19.02	680	0.57 $\pm$ 0.02	18.6 $\pm$ 0.8	17.2 $\pm$ 0.5	3171 $\pm$ 72	2904 $\pm$ 29	9.2 $\pm$ 0.5	0.72
Requirements EN 312 (P4 boards)	*	*	>0.35	>15	>15	>2300	>2300	<15	*
Requirements EN 312 (P2 boards)	*	*	>0.35	>13	>13	>1600	>1600	<15	*

Fonte: Moubarik et al, 2013.

Segundo Omar *et al.* (2017) as resinas de fenol-formaldeído têm sido extensivamente utilizadas em vários ramos da indústria, como especialmente na produção de painéis à base de madeira. A seleção deste tipo de resina é principalmente devido à sua capacidade de proporcionar boa resistência à absorção de água, resistência exterior e durabilidade, bem como excelente estabilidade térmica. O fenol-formaldeído possui custo elevado e é limitado à base de petróleo na sua

formulação, partindo desse pressuposto os autores criaram um material de biomassa renovável para substituir a base de petróleo. Por meio de pirólise lenta, os pesquisadores converteram a madeira de *Rhizophora* em bio-óleo, e consequentemente adicionaram a nova base à formulação de resina fenol-formaldeído (PF) para produzir um tipo econômico e ambientalmente melhorado de resina PF, conhecida como resina de bio-óleo-fenol-formaldeído (BPF). Com este novo adesivo os autores fabricaram um painel de partículas de madeira utilizando a espécie *Rhizophora*, que apresentou excelentes propriedades mecânicas e físicas, e emissão de formaldeído satisfatória. Os dados obtidos pelos autores seguem na tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades do painel de partículas de *Rhizophora*.

Type of resin	IB (MPa)	MOR (MPa)	Thickness swelling (%)	Water absorption (%)	Formaldehyde emission (mg l ⁻¹)
PF	1.61 ± 0.13	16.2 ± 1.9	12.0 ± 2.5	33.3 ± 3.5	0.15 ± 0.08
BPF (RS25)	1.37 ± 0.13	14.6 ± 2.1	12.9 ± 2.8	40.3 ± 0.08	0.24 ± 0.08
BPF (RS75)	1.51 ± 0.02	15.8 ± 1.3	12.6 ± 4.9	34.1 ± 7.2	0.41 ± 0.17
Standard limit ¹	> 0.15	> 8	< 12	NA	< 0.5

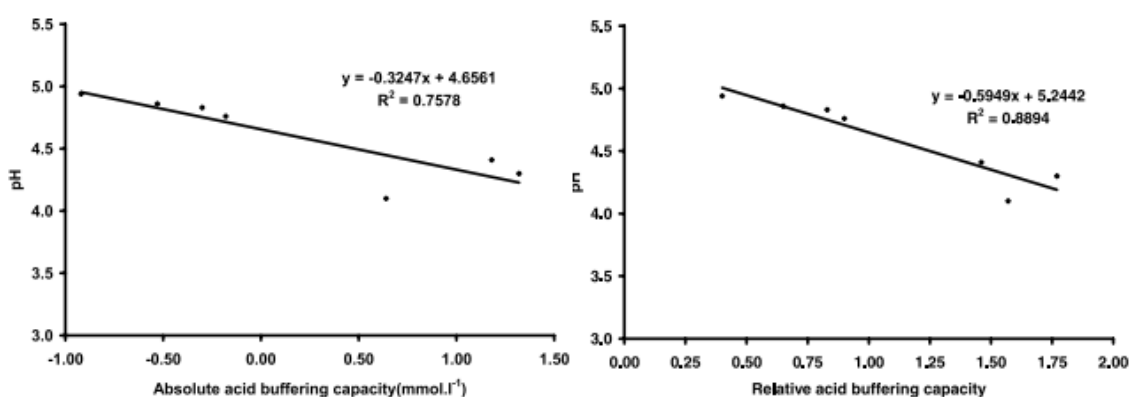
Adaptado de: Omar *et al*, 2017, p. 119.

Shulga *et al.* (2016) utilizaram resíduos de madeira da espécie *Populus tremula* de indústrias madeireiras de Aspen, para obter um material de enchimento de fibra curta, sob a forma de micropartículas modificadas <250µm, para produzir compósitos poliméricos. Os autores realizaram uma hidrólise ácida à baixa temperatura do resíduo, sob condições suaves, para reduzir a entrada de energia, assim reduzindo o tamanho da partícula de madeira e ativando a matriz lenho celulósica para a modificação. Com a comparação das propriedades mecânicas dos compósitos com partículas de madeira e micropartículas hidrolisadas modificadas, os pesquisadores concluíram que houve uma melhora acentuada das propriedades mecânicas dos compósitos com micropartículas de madeira modificada.

Na produção de painéis, o valor de pH é uma propriedade importante a se levar em consideração, Pedieu *et al.* (2008) realizaram o estudo e provaram que a resina

ureia-formaldeído cura melhor e mais rápido em um ambiente ácido. Neste estudo foi medida a acidez das partículas de casca de bétula branca e das partículas de madeira. Os resultados obtidos demonstraram uma diferença significativa entre a acidez da casca de bétula branca e da madeira, as cascas têm um pH mais baixo, bem como capacidades de tamponamento ácido e alcalino superiores. Verificou-se que o valor de pH da casca de bétula branca interna é inferior ao da parte externa, com isso os autores concluíram que a casca interna deve ser separada da casca externa e usada separadamente na fabricação de painéis mistos, e a temperatura da placa deve ser reduzida quando a casca externa é utilizada na superfície dos painéis mistos, para evitar a pré-cura ou sobre-cura. Os pesquisadores confirmaram a relação linear entre o pH e as capacidades de tamponamento absoluto e relativo, correlação demonstrada nos gráficos da Figura 2.

Figura 2 – Gráficos da relação linear entre o pH e as capacidades de tamponamento absoluto e relativo.



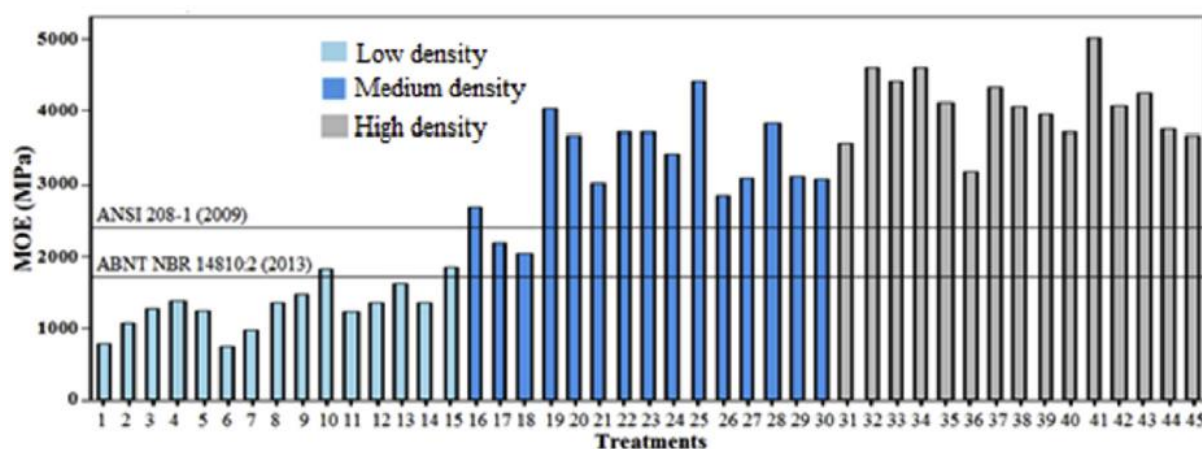
Adaptado de: Pedieu *et al*, 2008.

Atoyebi *et al.* (2018) estudaram as propriedades físicas e mecânicas de painéis de partículas produzidas a partir de serragem de madeira (*Lophira alata*) e casca de palmiste (PKS), que foram avaliadas por redes neurais artificiais (RNA). A produção destes painéis de partículas envolveu a combinação sinérgica de parâmetros eficazes, tais como composição percentual de cimento, serradura e casca de palmiste variaram entre 25-40, 20-50 e 20-50, respectivamente. Os painéis foram testados quanto a propriedades físicas, como absorção de água, aumento de espessura, densidade e propriedades mecânicas como módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE). As redes foram treinadas e testadas pelo Perceptron Multicamadas de Avanço Normal (MNFFP), com um algoritmo de aprendizado de propagação rápida. O

desempenho da rede RNA mostrou um alto potencial de previsão das propriedades do aglomerado.

Souza *et al.* (2018) estudaram a viabilidade técnica e os aspectos ambientais da fabricação de um aglomerado feito com resíduos de madeira e resíduos de tinta à base de epóxi como adesivo. A fase de reforço do aglomerado foi composta por partículas de resíduos de madeira de *Pinus sp.* e Teak (*Tectona grandis*), enquanto resina epóxi à base de resina residual foi usada como adesivo alternativo para reduzir a demanda por resina de formaldeído de ureia. Aglomerados foram fabricados e testados variando alguns parâmetros de produção, a saber: classificações de painéis de baixa, média e alta densidade; 20, 30 e 40% de resina epóxi; e mistura de partículas de resíduos de madeira de Pinus e Teca de 0, 25, 50, 75, 100%. O desempenho físico-mecânico dos painéis de partículas fabricados foi avaliado de acordo com os códigos padrão da ABNT NBR 14810 (2013) e ANSI A-208.1 (2009). Análises estatísticas baseadas na Análise de Variância (ANOVA) foram usadas para testar a influência de cada fator individual (densidade, porcentagem de adesivo e fração de partículas de Pinus / Teca) e suas interações sob as propriedades físico-mecânicas. Os resultados mostraram um desempenho satisfatório em termos de propriedades físicas e mecânicas (Figura 3) para tratamentos com alta densidade (até 0,80g / cm³), 30-40% de adesivo à base de epóxi e 50 a 100% de partículas de madeira de teca

Figura 3 – Módulo de elasticidade para tratamentos com baixa, media e alta densidade.



Souza et al., 2018.

2.2 Resíduos de madeira

A carbonização e a combustão da madeira é uma das alternativas de redução dos resíduos de indústrias madeireiras, porém o processo, apesar de reduzi-los, gera impactos ao meio ambiente através da liberação de gases e derivados, com isso, a utilização desses resíduos em artefatos torna-se a solução menos impactante ao meio (FONTES, 1994).

Yang e Jenkins (2008) estimaram os resíduos de madeira gerados por serrarias no estado da Califórnia por dois métodos, o primeiro utilizando a produção de madeira serrada e um fator de volume de resíduos, e o segundo usando o consumo total de madeira por serrarias e um fator de peso do resíduo. A geração estimada de resíduos na Califórnia variou de 2,2 a 2,6 Mt em 2002 e de 2,2 a 2,5 Mt em 2003, essa quantidade com grande potencial para produção de bioenergia e produtos renováveis. Os Resíduos cavaco, pó de serra e casca, por meio de estimativa, representaram respectivamente 45%, 32% e 23% do total de resíduos gerados por serrarias, como demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição estimada dos resíduos.

Reference	Residue composition, % of total			Remarks
	Coarse	Fine	Bark	
[34]	42	33	25	Based on total lumber and plywood production in 1976 in Montana
[30]	47	36	17	Based on lumber production in 1987 in Idaho
[15,14]	51	27	22	Based on lumber production from redwood and incense-cedar in 1967
[15,14]	42	36	22	Based on lumber production from white wood in 1967
[11]	43	30	27	Based on primary mill residues in the US
[21]	45	30	25	California's sawmill residual factors for 2000
Average	45	32	23	Used for estimation in this study

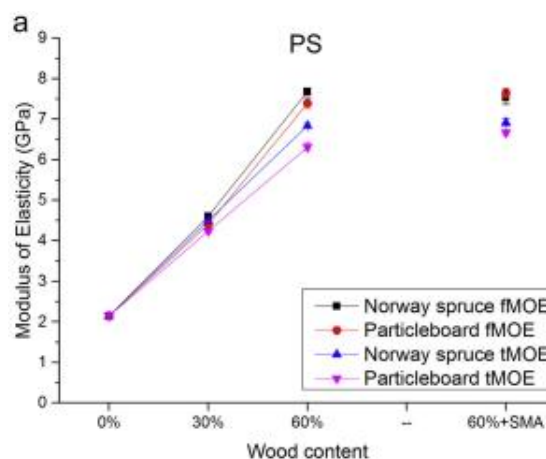
Yang e Jenkins, 2008.

Eshun *et al.* (2012) estudaram o potencial de minimizar os resíduos de madeira para reduzir o impacto ambiental no setor madeireiro de Gana. Foram analisados resíduos gerados na fabricação de 5 produtos de madeira: Madeira seca ao ar livre, madeira seca em estufa, madeira compensada, laminas de madeira e peças de mobiliário. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que a combinação de mudanças tecnológicas, boas práticas operacionais e medidas de reciclagem poderiam reduzir os resíduos de madeira em aproximadamente 50%.

Nasser *et al.* (2016) fabricaram compósitos de madeira reforçado com cimento, utilizando como matéria-prima poda de árvores de seis espécies lenhosas: *Acacia salicina*, *Conocarpus erectus*, *Ficus altíssima*, *Leucaena glauca*, *Pithecellobium Dulce* e *Tamarix aphylla*. Os resultados indicaram que tanto a densidade do painel, quanto a relação madeira/cimento (W/C) tiveram efeitos significativos nas propriedades, produzindo propriedades de resistência ótimas, com uma relação W/C de 1/2. Com o estudo os pesquisadores concluíram que após pré-tratamento das partículas de madeira com água fria ou quente e com adição de 3% de CaCl_2 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ou MgCl_2 , os resíduos de poda de árvores são adequados para utilização como matérias-primas na fabricação de compósitos de madeira reforçado com cimento.

Sommerhuber *et al.* (2016) elaboraram dois compósitos de madeira-plástico (WPC), utilizando aglomerado de partículas reciclado e madeira da espécie *Picea abies*, moldados por injeção a partir de acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) reciclado e poliestireno (PS) dos resíduos eletrônicos. O desempenho do WPC de aglomerado com partículas reciclado foi comparado com o WPC com partículas de *Picea abies*. O teor de madeira foi elevado em duas etapas, de 0% para 30% e 60%. Os compósitos foram caracterizados pelo uso de métodos de teste padrão físicos e mecânicos. Os resultados obtidos pelos autores mostraram maior rigidez, absorção de água e maior densidade com a incorporação de partículas de madeira nas matrizes plásticas (Figura 4). O WPC com *Picea abies* demonstrou maior reforço em termos de resistência e rigidez, os mesmo resultados foram obtidos com partículas de aglomerado em termo de rigidez, mas a resistência dos compósitos foi negativamente afetada.

Figura 4 – Módulo de elasticidade do PS-WPC.



Adaptado de: Sommerhuber *et al.*, 2016.

Wang *et al.* (2016) desenvolveu um painel aglomerado de resíduos de madeira de construção, com cimento. A microestrutura dos painéis de partículas foram caracterizadas por difração de raios X, análise termogravimétrica e porosimetria por intrusão de mercúrio. Os autores utilizaram CaCl_2 à 2% que provou ser suficiente para melhorar a compatibilidade madeira-cimento. Os painéis apresentaram uma notável redução de ruído na estrutura, e uma baixa condutividade térmica, sugerindo uma aplicação potencial como isolantes acústicos e térmicos.

A busca por materiais feitos a partir de fontes renováveis e livres de substâncias tóxicas é uma tendência mundial para uma produção mais limpa, e isso pode ser estendido ao desenvolvimento de painéis à base de madeira. A produção mundial de painéis derivados de madeira em 2014 foi de 388 milhões de metros cúbicos, o que representa um aumento de 34% em relação a 2010. No entanto, o setor industrial de painéis à base de madeira tem enfrentado algumas lacunas e desafios em relação às emissões tóxicas adesivos aplicados na fabricação de painéis (SOUZA *et al.*, 2018).

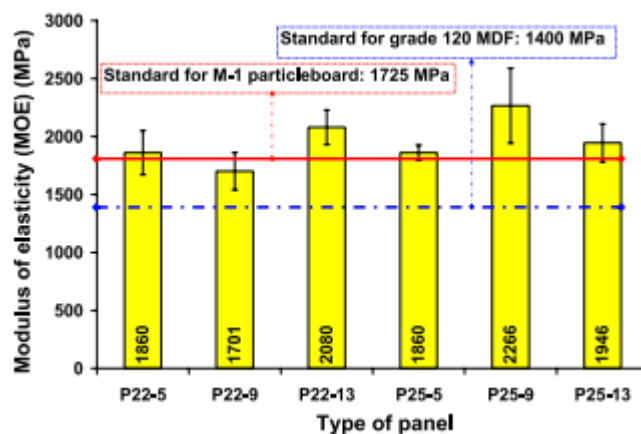
Astari *et al.* (2018) investigaram as propriedades físicas e mecânicas de aglomerado fabricado a partir de resíduos de madeira com vários tamanhos: grosso (3,360 mm), fino (2,00 mm) e misto. Os autores utilizaram como adesivo neste estudo o formaldeído de ureia e o formaldeído fenol com várias concentrações: 8%, 10% e 12%. Os painéis de partículas produzidos foram testados quanto às suas propriedades mecânicas e físicas. A norma utilizada no estudo foi o Japan Industrial Standard (JIS A 5908: 2003). Os autores concluíram por meio dos resultados da pesquisa, que mais quantidade de adesivo aumenta as propriedades mecânicas e físicas.

2.3 Casca

Pedieu *et al.* (2009) utilizaram partículas de casca de bétula branca (*Betula papyrifera*) como matéria-prima para fabricação de painéis. Os painéis foram fabricados em três camadas com base em partículas de casca interna de bétula branca no núcleo e reforçadas com fibras de madeira na face, com variações de porcentagem de fibras na superfície de 22 e 25% e de fibras de 5, 9 e 13 %, adicionados às partículas de casca interna de bétula branca no núcleo. Os resultados obtidos mostraram que o painel com 25% de fibras na superfície e 9% de fibras adicionados às partículas de casca interna tiveram melhores propriedades mecânicas

(Figura 5), e somente o painel com 22% de fibras na superfície e 5% de fibras adicionados às partículas de casca interna passou o padrão para a expansão linear.

Figura 5 – Módulo de elasticidades dos painéis fabricados.



Pedieu *et al*, 2009.

Nemli *et al.* (2006) produziram painéis de partículas impregnados com extrativos de casca de *Pinus brutia*, e examinaram as propriedades mecânicas, propriedades físicas e resistências de decomposição. A metodologia realizada pelos pesquisadores foram baseadas em 4 tratamentos, estes nomeados 1, 2, 3 e 4, com 0, 1.0, 2.5 e 5 % de concentração de extrativos. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que os painéis feitos a partir de partículas impregnadas com extrativos de casca possuem valores mecânicos menores do que os feitos a partir de partículas não impregnadas, porém os painéis com impregnação demonstraram melhores valores de resistência à decomposição e o espessamento do painel de partículas. Os pesquisadores concluíram que a concentração dos extrativos é inversamente proporcional as propriedades mecânicas (Tabela 5), e proporcional a resistência ao inchaço e a decomposição dos painéis (Tabela 6). Os painéis de partículas fabricados a partir de extrativos de casca de *Pinus brutia* a 1% preencheram as especificações de módulo de ruptura e força de ligação interna para fins gerais.

Tabela 5 – Valores médio das propriedades mecânicas dos painéis particulados.

Treatments	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	IB (N/mm ²)
1	13.35 ^A (0.24) ^b	1721.61 ^A (50.42)	0.382 ^A (0.025)
2	11.64 ^B (0.12)	1507.74 ^B (60.33)	0.308 ^B (0.014)
3	10.27 ^C (0.18)	1347.29 ^C (45.84)	0.233 ^C (0.012)
4	8.10 ^D (0.35)	1121.16 ^D (35.28)	0.204 ^D (0.010)
Requirements ^c	11.50	–	0.24
Requirements ^d	13.00	1600	0.35

Adaptado de: Nemli *et al.*, 2006.

Tabela 6 – Valores médios de estabilidade dimensional e resistência a decomposição dos painéis particulados.

Treatments	TS (%)		<i>P. versicolor</i>	
	2 h	24 h	Weight loss (%)	Rating ^e (EN)
1	15.98 ^A (0.12) ^d	28.32 ^A (0.24)	19.54 ^A (0.52)	Moderately durable
2	13.26 ^B (0.09)	26.18 ^B (0.18)	14.78 ^B (0.41)	Moderately durable
3	11.13 ^C (0.15)	22.45 ^C (0.31)	10.84 ^C (0.35)	Moderately durable
4	8.51 ^D (0.23)	17.54 ^D (0.38)	6.16 ^D (0.64)	Durable
Requirement ^e	–	15	–	–
Requirement ^f	–	14	–	–

Adaptado de: Nemli *et al.*, 2006.

Mao *et al.* (2017) estudaram o extrato de casca de *Pinus massoniana* (PMBE) para fins medicinais. O estudo foi direcionado à investigação da hipótese do PMBE ser capaz de inibir a migração de células de câncer de pulmão. A migração de células de câncer do pulmão após a exposição à PMBE, foi quantificada utilizando cicatrização de feridas e ensaios de Transwell, respectivamente. Os resultados obtidos pelos pesquisadores revelaram que o PMBE inibiu significativamente o crescimento das células de câncer do pulmão. Os autores chegaram à conclusão de que o PMBE é capaz de restringir a migração e invasão de células de câncer de

pulmão, e que o mesmo pode servir como um novo agente terapêutico para pacientes com câncer de pulmão metastático no futuro.

2.4 Caracterização mecânica por método não destrutivo

Os métodos utilizados para a caracterização mecânica de materiais podem ser divididos em destrutivos e não destrutivos (NDT). Stangerlin *et al.* (2010) relatam que métodos não destrutivos foram propostos internacionalmente no final da década de 1950 por Bodig e Jayne (1982) e no Brasil no final dos anos 80.

O teste não destrutivo (NDT), segundo Ross (1998), consiste na identificação de propriedades físico-mecânicas de parte do material, sem alterar suas propriedades de uso, a fim de tomar decisões apropriadas quanto às suas aplicações. Para avaliar as propriedades mecânicas e capacidade de carga residual dos membros de madeira existentes, a avaliação não destrutiva (NDT) é eficaz (RIGGIO *et al.* 2014).

Bodig (2001) aponta que quase todos os tipos de ensaios não destrutivos podem ser usados com madeira e derivados de madeira, e a escolha para seu uso depende da aplicação específica. Yin *et al.* (2010) e Cheng e Hu (2011) mostraram em suas pesquisas que diferentes métodos não destrutivos baseados em acústica poderiam fornecer uma boa previsão para o módulo de elasticidade flexionado (MOE), módulo de ruptura e compressão paralela às fibras.

Hansen (2006) relata que a análise da propagação do som em materiais isotrópicos é menos complexa do que na madeira. Moraes (2012) afirma que a resposta acústica consiste no som emitido pelo corpo de prova, que se origina das frequências vibracionais naturais do material, que dependem da massa, dimensões, geometria e rigidez.

Segundo Bucur (2006), as frequências comumente utilizadas em métodos acústicos para estudos de madeiras estão abaixo de 20 kHz. O estado de equilíbrio ou excitação momentânea (impacto) pode ser usado para testes dinâmicos de ressonância de vibração quando o módulo de elasticidade dinâmico é determinado, e a medição precisa de constantes de engenharia é importante para engenharia e projeto de produto.

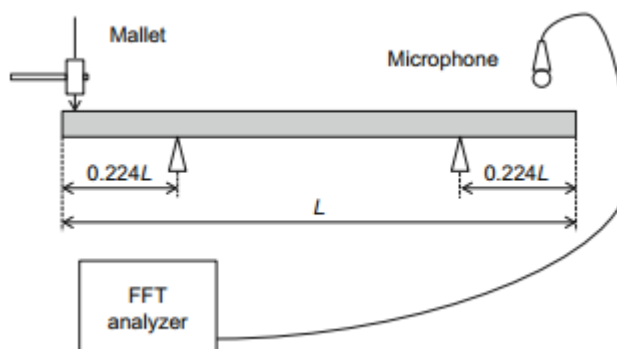
No trabalho realizado por Ballarin e Palma (2009), a madeira de *Eucalyptus grandis* foi caracterizada, utilizando 24 árvores da mesma, com 21 anos de idade e

destas 57 amostras com dimensões nominais de 2 cm x 2 cm x 46 cm. O equipamento utilizado para a análise e medição das frequências de vibração transversal foi o BING (Beam Identification by Nondestructive Grading), produzido pelo CIRAD-Forest. Obtiveram para o módulo dinâmico o valor médio de 16990 MPa e para o módulo de elasticidade estático o valor médio de 15306 MPa. Os coeficientes de correlação encontrados para a análise de regressão entre os módulos de elasticidade dinâmica e estática foram $R^2 = 0,87$.

Os painéis à base de madeira são amplamente utilizados em aplicações estruturais. A medição precisa de suas propriedades elásticas é de grande importância para prever seu comportamento mecânico durante o projeto estrutural. Zhou *et al.* (2016) propuseram um método de ensaio não destrutivo eficiente para medição de constantes elásticas efetivas de painéis de madeira, com base na técnica de teste modal. Um algoritmo foi desenvolvido com base em uma equação de frequência de vibração transversal de placas ortotrópicas, sob condição de contorno, em que dois lados opostos são simplesmente suportados e os outros dois são livres (SFSF). Os autores testaram com o método proposto, painéis à base de madeira, sendo, madeira laminada cruzada (CLT), painéis de lascas orientados (OSB) e painéis de fibras de densidade média (MDP). Os resultados obtidos pelos pesquisadores comprovaram que as constantes elásticas medidas dos três tipos de painéis com base no teste modal concordaram com os valores correspondentes medidos por testes estáticos.

Kojima *et al.* (2016) avaliaram a durabilidade dos painéis à base de madeira comparando o módulo de elasticidade dinâmico (E_d), quando submetidos a tratamentos repetitivos húmidos e secos. Os autores fabricaram 4 painéis, sendo um painel de partículas, um painel compensado, e dois OSB, um com madeira da América do Norte e outro com madeira europeia. Foi utilizado o teste não destrutivo de flexão (Figura 6), baseado nas vibrações transversais, para determinação do módulo de elasticidade. Os pesquisadores calcularam E_d a partir da frequência fundamental, obtida por meio do analisador de transformada rápida de Fourier (Equação 1).

Figura 6 – Demonstração do teste não destrutivo de flexão.



Kojima *et al.*, 2016.

Equação 1 – Equação do módulo de elasticidade dinâmico.

$$E_d \text{ (GPa)} = \frac{48\pi^2 L^4 F^2 \rho}{4.730^4 T^2} \times 10^{-12}$$

Kojima *et al.*, 2016.

Onde:

E_d – Módulo de elasticidade dinâmico;

L – Comprimento do corpo de prova [mm];

F – Frequência natural [Hz];

ρ – Densidade [g/cm³];

T – Largura da seção [mm].

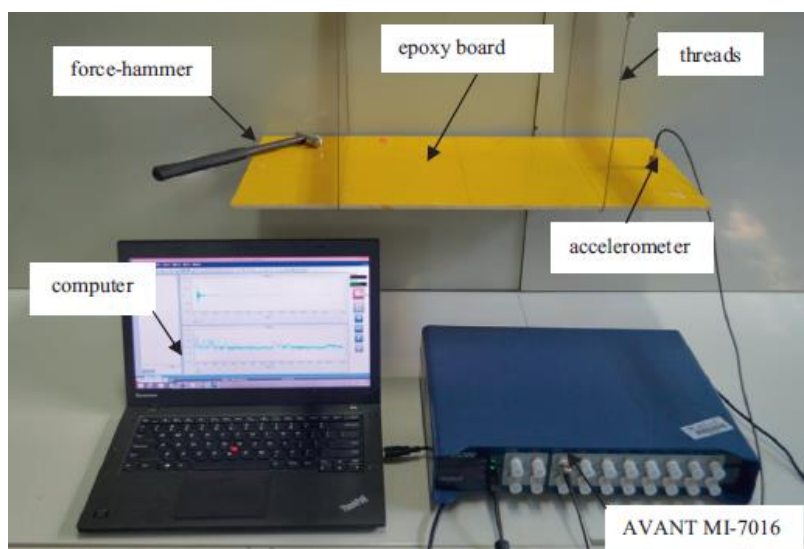
Hodoušek *et al.* (2017) estudaram o módulo de elasticidade (MOE) das espécies *Cupressus lusitanica* (CL) e *Populus x Canadian* (PC) e compararam o método destrutivo e não-destrutivo. O equipamento utilizado para o método de ensaio não destrutivo foi o Timber Grader MTG, que é baseado no princípio da ressonância de frequência, usando as vibrações longitudinais para calcular o MOE. A diferença entre os valores de módulo de elasticidade dinâmico e estático para PC foi entre 1,1% e 2,4% e para CL entre 12,7% e 15,5%. Os coeficientes de correlação encontrados pelos autores para a análise de regressão entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático foram $R^2 = 0,87$ para CL e $R^2 = 0,81$ para PC.

2.5 Técnica de Excitação por Impulso

Segundinho *et al.* (2012) relatam que os métodos de ensaios não destrutivos para vibração transversal e frequência longitudinal estão se tornando cada vez mais relevantes, pois são capazes de fornecer respostas rápidas e altas correlações lineares (R^2 igual a 0,8), e o custo do Equipamento vem diminuindo ao longo dos anos. Em seu trabalho, avaliaram 24 vigas de *Eucalyptus sp.* com dimensões nominais de 4 x 6 x 200 cm e 14 vigas *Pinus oocarpa* com dimensões nominais de 4,5 x 9 x 230 cm, ambas sem tratamento. A madeira foi caracterizada pela Técnica de Excitação por Impulso utilizando o equipamento Sonelastic® Stand Alone e pelo método destrutivo de flexão estática. As análises mostraram que os valores obtidos a partir dos coeficientes angulares das linhas de regressão linear indicam um ajuste médio de 0,91 obtido pelo teste de vibração longitudinal na avaliação não destrutiva de peças de madeira com o ensaio destrutivo.

Song *et al.* (2017) caracterizaram compósitos laminados utilizando apenas a frequência de ressonância fundamental nos modos de flexão e torção, massa e dimensões do material. O método utilizado pelos autores baseia-se na técnica de excitação por impulso (Figura 7) para captar a frequência de ressonância fundamental e, em seguida, as fórmulas correspondentes são aplicadas para avaliar os parâmetros mecânicos. Realizaram também simulações numéricas usando o método dos elementos finitos (MEF) e investigações experimentais de vários casos baseados na TEI foram introduzidas para verificar a precisão das fórmulas. Os resultados mostraram que a TEI é aplicável para identificação de parâmetros mecânicos para compósitos laminados. Os pesquisadores esperam que o método detecte parâmetros mecânicos de outras estruturas mais complicadas futuramente.

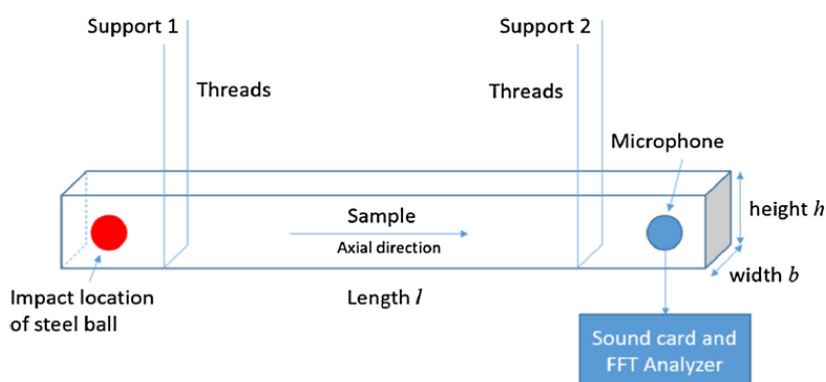
Figura 7 – Equipamentos utilizados na técnica de excitação por impulso.



Song *et al.*, 2017.

No processo de classificação de madeira com foco na detecção de nós de madeira, os métodos de testes não destrutivos baseados na propagação de som e frequências de ressonância podem auxiliar os métodos tradicionais de caracterização para alcançar uma maior eficiência e melhores resultados. Qin *et al.* (2018) utilizaram dois métodos independentes baseados em frequências de ressonância (Figura 8) e medidas de velocidade do som para avaliar o módulo de elasticidade de vigas de madeira contendo diferentes nós. Os autores concluíram que ambos os métodos são confiáveis na determinação das características do nó, e no caso de nós posicionados fora do centro da viga, o método de ressonância funciona melhor para quantificar o tamanho dos nós.

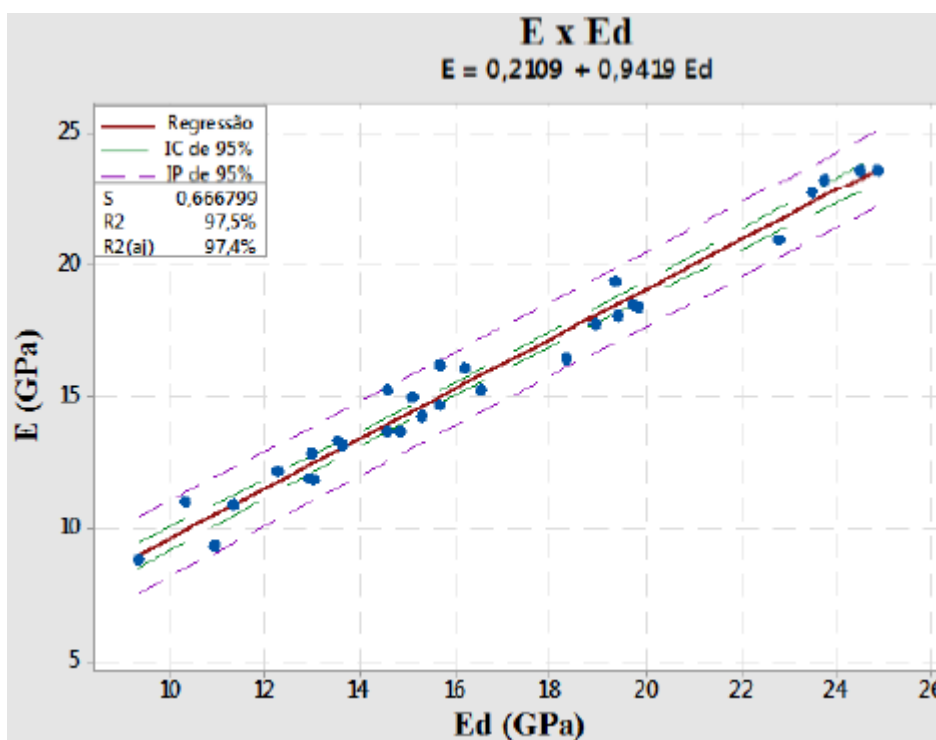
Figura 8 – Ilustração da Técnica de Excitação por Impulso.



Qin *et al.*, 2017.

Carrasco *et al.* (2017) determinaram o módulo de elasticidade de 29 espécies de madeiras brasileiras por meio da técnica de excitação por impulso. Utilizaram o aparelho Sonelastic, que tem como finalidade realizar ensaios não destrutivos utilizando ondas acústicas provocadas por impacto. Por meio de valores de características mecânicas fornecidas pela norma NBR 7190 e pelo IPT, os autores realizaram uma análise de regressão entre os módulos de elasticidades estáticos e dinâmicos, e encontraram uma alta correlação, R^2 em torno de 97,54%, demonstrada na Figura 9 a seguir.

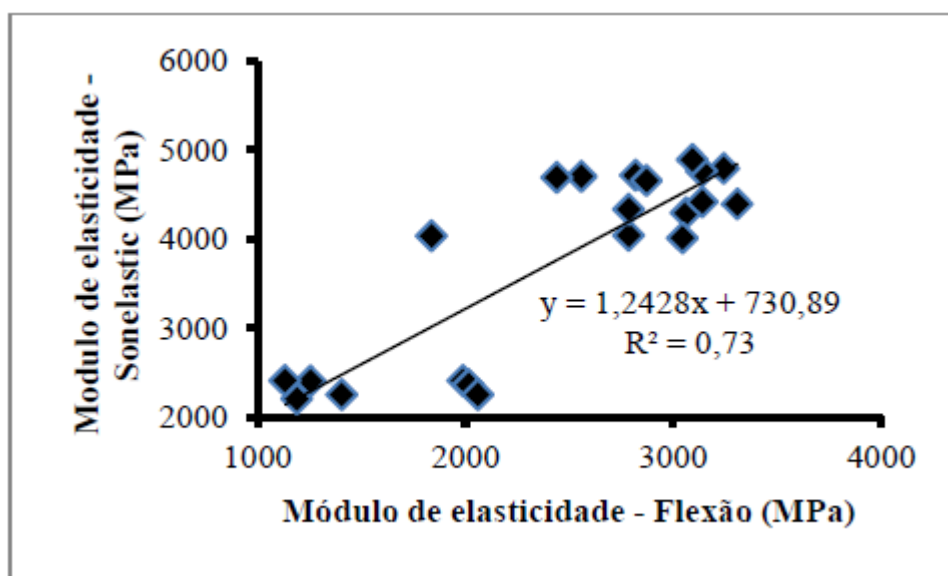
Figura 9 – Análise de regressão entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico para 29 espécies.



Carrasco *et al.*, 2017.

Pizzol *et al.* (2017) determinaram o módulo de elasticidade de compensados de madeira utilizados e reutilizados em formas para concreto por meio da Técnica de Excitação por Impulso. O aparelho utilizado para a caracterização foi o Sonelastic. Por meio dos valores para módulo de elasticidade determinado pela técnica destrutiva por ensaio de flexão, e pelos valores calculados pela TEI, os autores realizaram uma análise de regressão entre os módulos de elasticidades estáticos e dinâmicos, e encontraram uma alta correlação, R^2 em torno de 73% (Figura 10).

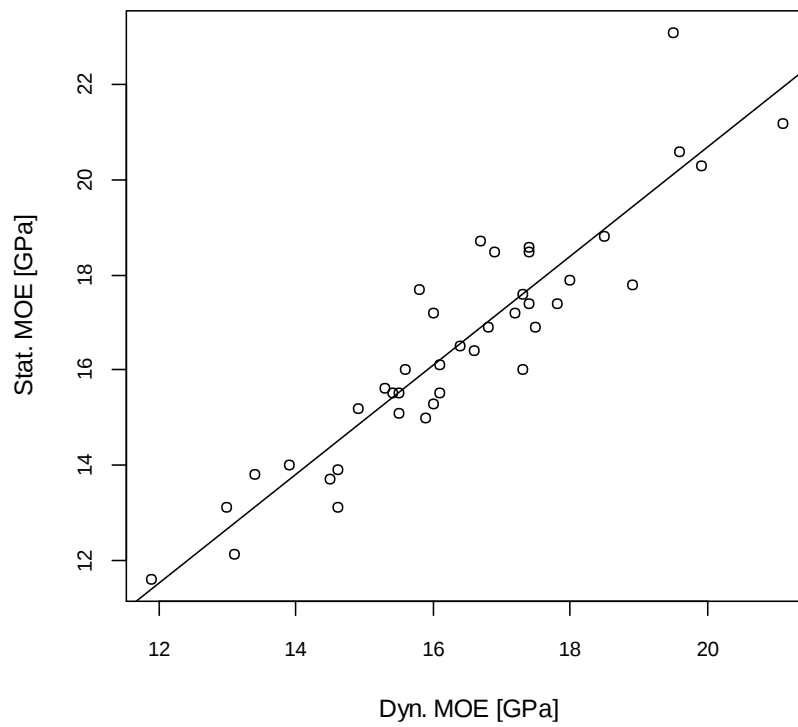
Figura 10 – Análise de regressão entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico de componentes de forma para concreto.



Pizzol *et al.*, 2017.

Lima Jr. *et al.* (2018) estudaram a eficácia da Técnica de Excitação por Impulso na caracterização mecânica do *Eucalyptus grandis* de 10 anos de idade, em três diferentes alturas em relação ao tronco da árvore. Foi utilizado o equipamento Sonelastic PC Based Technology para caracterização não destrutiva e o ensaio de flexão estática para a caracterização destrutiva. O valor médio para o módulo de elasticidade estático foi de 16,4 GPa e para o dinâmico foi de 16,6 GPa. Por meio de análise de regressão entre os dois métodos os autores encontraram uma correlação com $R^2 = 0,85$ (Figura 11). E concluíram que quanto mais alto a posição da madeira na árvore maior será o módulo de elasticidade.

Figura 11 – Análise de regressão entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico de *Eucalyptus grandis* em três alturas.



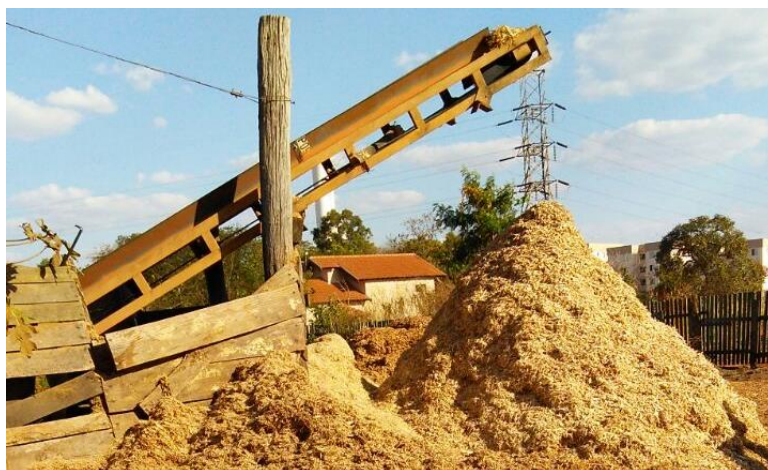
Lima Jr. *et al.*, 2018.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os materiais utilizados para o desenvolvimento da pesquisa foram: resíduos da produção de uma serraria, sendo estes cavaco (Figura 12) e casca (Figura 13) da espécie *Eucalyptus ssp.*, provenientes de doação da empresa Faidiga Madeiras, situado na Rodovia Marechal Rondon, Km 345, Parque City – CEP 17021-080, Bauru, e adesivo poliuretano à base de mamona (Figura 14), bi-componente, teor de sólidos de 100%, onde um dos componentes é o isocianato polifuncional, e o outro componente é um poliol derivado de óleo vegetal, com densidade aparente do sistema de 1,2 g/cm³, proveniente de doação da empresa Kehl.

Figura 12 – Pilha de cavacos da empresa Faidiga.



Fonte: Própria autoria.

Figura 13 – Pilha de casca da empresa Faidiga.



Fonte: Própria autoria.

Figura 14 – Adesivo poliuretano à base de mamona.



Fonte: Própria autoria.

A fabricação e caracterização físico-mecânica dos painéis particulados desenvolvidos foram elaboradas conforme o documento normativo brasileiro para painéis de madeira aglomerada – ABNT NBR 14.810:2013, no Laboratório de Processamento de Madeira pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da FEB – UNESP – Campus de Bauru. As caracterizações físicas e mecânicas foram feitas no Laboratório de Construção Civil – DEC – FEB – UNESP – Campus de Bauru. As caracterizações mecânicas não destrutivas pelo método de excitação por impulso foram executadas com base na norma americana “*American Society for testing and materials*” – ASTM E 1876/01-76, no Laboratório de Propriedades dos Materiais – EIM – UNESP – Campus de Itapeva.

3.2 Fabricação

Na fase de preparação da casca para a confecção dos painéis de partículas, primeiramente passaram por um processo de redução de tamanho por meio de um Picador da marca Marconi, modelo MA680/3 (Figura 15), e as partículas menores produzidas foram classificadas em um Agitador Elétrico da marca Bertel (Figura 16). Para o processo de classificação foram utilizadas cinco peneiras montadas na ordem: 5 mesh, 9 mesh, 16 mesh, 35 mesh, 60 mesh e bandeja de fundo.

Figura 15 – Picador Marconi MA680/3.



Fonte: Própria autoria.

Figura 16 – Agitador elétrico Bertel.



Fonte: Própria autoria.

A preparação do cavaco para confecção dos painéis de partículas passou inicialmente por um período de 24h na estufa à 70°C, para homogeneização da umidade (Figura 17). Após a secagem, o cavaco foi reduzido de tamanho por meio do Picador, e as partículas de tamanhos menores gerados nesse processo foram classificadas por meio de um Agitador Elétrico, utilizando cinco peneiras montadas na ordem: 5 mesh, 9 mesh, 16 mesh, 35 mesh, 60 mesh e bandeja de fundo.

Figura 17 – Estufa com circulação e renovação de ar SOLAB.



Fonte: Própria autoria.

A base do tamanho da forma utilizada foi de 32 mm x 38 mm, este tamanho permite calcular o peso das partículas para um painel de 12,7 mm, e sua densidade desejada de 0,75 g/cm³.

Foram fabricados quatro traços com diferentes variações em relação a porcentagem da casca. O primeiro traço investigado foi composto por 100% de cavaco, o segundo traço com 5 % de casca e 95% de cavaco, o terceiro traço com 10% de casca e 90% de cavaco e o quarto traço com 15% de casca e 85% de cavaco. Esses quatro traços são demonstrados na Tabela 7, com as suas respectivas quantidades (g) de cada material utilizado.

Tabela 7: Distribuição de materiais por traços.

Traços	% casca	Casca (g)	Cavaco (g)	Massa total (g)
1	0	0	1158	1158
2	5	57,9	1100,1	1158
3	10	115,8	1042,2	1158
4	15	173,7	984,3	1158

Com o peso das partículas calculados, foi feito a medição das massas da casca e cavaco, e sistematizado em sacos para facilitar a distribuição das partículas no processo de confecção dos painéis de partículas. A fração de adesivo utilizada foi de 10% com base no peso seco das partículas, com a proporção de 1/1 de pré-polímero para poliol.

O processo de distribuição das partículas nas multicamadas foi feito manualmente, assim como a mistura do adesivo com as partículas. Com o adesivo aderido nas partículas, o próximo passo foi acomodar as partículas, em forma de painel com dimensões de 32 cm x 38 cm. Antes do processo de prensagem, foi feita uma pré-prensagem na pré-prensa laboratorial (Figura 18) para acomodação das partículas e diminuição da espessura inicial. O processo de prensagem (Figura 19) foi conduzido em uma prensa hidráulica com sistema de aquecimento, marca PHS MÁQUINAS HIDRÁULICAS LTDA, modelo PHH 80T (Figura 20) com pratos aquecidos, com um limitador de espessura de 12,7 mm, pelo tempo de 10 minutos, pressão de 190 bar e temperatura de 90°C. A Figura 21 demonstra os painéis fabricados por meio deste processo.

Figura 18 – Pré-prensa laboratorial.



Fonte: Própria autoria.

Figura 19 – Processo de prensagem em execução.



Fonte: Própria autoria.

Figura 20 – Prensa hidráulica.



Fonte: Própria autoria.

Figura 21 – Painei produzido.



Fonte: Própria autoria.

3.3 Ensaios físicos

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Processamento de Madeiras da Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB pertencente a Universidade Estadual Paulista – UNESP, seguindo as prescrições normativas da ABNT NBR 14810-2:2013 – Chapas de madeira aglomerada – Parte 2: Métodos de Ensaio.

3.3.1 Massa Específica

Para a obtenção dos valores de massa específica, foram utilizadas uma balança digital (Figura 24), com resolução de 0,01g, e um paquímetro digital (Figura 25) com resolução de 0,01 mm. Os valores da massa específica da amostra foram calculados por meio da Equação 2.

$$\rho = m / V \quad (2)$$

Onde: ρ = massa específica da amostra [g/cm³]

m = massa do corpo de prova [g]

V = volume do corpo de prova [cm³]

Figura 24 – Balança digital Marte.



Fonte: Própria autoria.

Figura 25: Paquímetro digital Mitutoyo.



Fonte: Própria autoria.

3.3.2 Inchamento em espessura 24 horas

Para obtenção dos valores de inchamento em espessura, foram utilizados um micrômetro (Figura 26) com resolução de 0,001 mm e um balde de água. O ensaio foi conduzido de forma que os corpos-de-prova sejam submetidos à imersão pelo período de 24 horas. Os valores são calculados por meio da Equação 3.

$$I = \frac{E_1 - E_0}{E_0} \times 100 \quad (3)$$

Onde: I = inchamento em espessura [%]

E_1 = espessura da amostra saturada [mm]

E_0 = espessura da amostra em temperatura de 20°C [mm]

Figura 26 – Micrômetro Mitutoyo.



Fonte: Própria autoria.

3.3.3 Absorção de Água 24 horas

Para obtenção dos valores de absorção de água, foram utilizados uma balança digital com resolução de 0,01 g e um balde de água. O ensaio foi conduzido de forma que os corpos-de-prova sejam submetidos à imersão (Figura 27) pelo período de 24 horas. Os valores são calculados por meio da Equação 4.

$$A = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad (4)$$

Onde: A = absorção de água da amostra [%]

M_1 = peso saturado da amostra [g]

M_0 = peso seco da amostra [g]

Figura 27 – Corpos de prova submersos em água.



Fonte: Própria autoria.

3.3.4 Umidade específica

Para obtenção dos valores de umidade específica foi utilizada uma estufa, para a realização do processo de secagem dos corpos de prova, e uma balança digital com resolução de 0,01 g. Os valores de umidade foram calculados por meio Equação 5.

$$U = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100 \quad (5)$$

Onde: U = umidade específica do corpo de prova [%]

P_s = peso seco da amostra [g]

P_u = peso úmido da amostra [g]

3.4 Ensaios mecânicos

3.4.1 Ensaio de flexão estática

Por meio deste ensaio de flexão estática (Figura 28) foram obtidos os valores para o módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) na flexão estática. O ensaio foi conduzido na Máquina Universal de Ensaios EMIC DL – 30 ton do Laboratório de Propriedades dos Materiais, no Campus de Itapeva da UNESP. Os valores de MOR e MOE são calculados por meio das equações 6 e 7, respectivamente.

$$MOR = \frac{3 \cdot P \cdot D}{2 \cdot a \cdot b^2} \quad (6)$$

Onde: MOR = módulo de ruptura [MPa]
 P = média das cargas de ruptura [N]
 D = distância entre os apoios do aparelho [mm]
 a = largura do corpo de prova [mm]
 b = espessura do corpo de prova [mm]

$$MOE = \frac{P_1 \cdot D^3}{4 \cdot v \cdot w \cdot h^3} \quad (7)$$

Onde: MOE = módulo de elasticidade [MPa]
 P₁ = carga limite proporcional entre 10% à 50% [N]
 D = distância entre os apoios do aparelho [mm]
 v = deslocamento entre 10% à 50% [mm]
 w = largura do corpo de prova [mm]
 h = altura do corpo de prova [mm]

Figura 28 – Ensaio de Flexão Estática.



Fonte: Própria autoria.

3.4.2 Ensaio de tração perpendicular às faces

Este ensaio objetiva analisar a adesão interna das partículas que compõem o painel, e para realização deste, foram utilizadas dois suportes metálicos, um para cada face do corpo de prova. O ensaio foi conduzido por meio da Máquina Universal de Ensaio EMIC DL - 30 ton. Os valores foram obtidos por meio da Equação 8.

$$TP = \frac{P}{S} \quad (8)$$

Onde: TP = resistência à tração perpendicular [MPa]
P = carga na ruptura [N]
S = área da superfície do corpo de prova [mm²]

3.4.3 Ensaio de arrancamento de parafuso

Para a preparação do corpo de prova deste ensaio foram utilizados uma furadeira, brocas e parafusos. Foi traçado duas retas diagonais na face do corpo de prova, para encontrar o centro, e no centro foi executado um furo com diâmetro de 27 mm, e neste furo foi colocado o parafuso. O ensaio (Figura 29) foi conduzido por meio da Máquina Universal de Ensaios EMIC DL - 30 ton. Os valores são obtidos por meio de leitura no indicador de cargas.

Figura 29 – Ensaio de arrancamento de parafuso.



Fonte: Própria autoria.

3.4.4 Ensaio de resistência superficial

Este ensaio tem por objetivo analisar a resistência superficial das partículas que compõem o painel. Para a preparação do corpo de prova deste ensaio foram utilizados uma furadeira de bancada e brocas tipo copo. Para desempenho do ensaio, foram utilizadas suportes metálicos circulares, um para cada corpo de prova. O ensaio foi conduzido por meio da Máquina Universal de Ensaios EMIC DL - 30 ton (Figura 30).

Figura 30 – Ensaio de resistência superficial.



Fonte: Própria autoria.

3.4.5 Ensaio não destrutivo

Para o cálculo do módulo de elasticidade Longitinal, além do método destrutivo (Ensaio de flexão estática), existem novos métodos para determinar o MOE, chamados métodos não destrutivos, dentre estes estão a Técnica de Excitação por Impulso (TEI). A TEI consiste em determinar o módulo de elasticidade longitudinal por meio das frequências naturais de ressonância do material, onde por meio destas frequências são calculados o módulo de elasticidade dinâmico (E_d).

Os cálculos dos valores de módulo de elasticidade dinâmico foram ser feitos por meio da Equação (9), fornecida pela ASTM E 1876.

$$E_d = 4mf_1^2 \left[\frac{L}{\pi R^2 K} \right] \quad (9)$$

Onde:

L = comprimento da peça (mm);

m = massa da peça (g);

f_1 = frequência fundamental longitudinal (Hz);

πR^2 = área da seção;

K = Fator de correção para o módulo longitudinal levando em conta a relação finita do diâmetro – comprimento e o coeficiente de Poisson dada pela Equação (10):

$$K = 1 - \left[\frac{\pi^2 \mu^2 D_e^2}{8L^2} \right] \quad (10)$$

Onde:

μ = coeficiente de Poisson;

D_e = diâmetro efetivo da peça (mm), que para uma seção transversal retangular da peça dada pela Equação (11):

$$D_e^2 = \frac{2(b^2 + t^2)}{3} \quad (11)$$

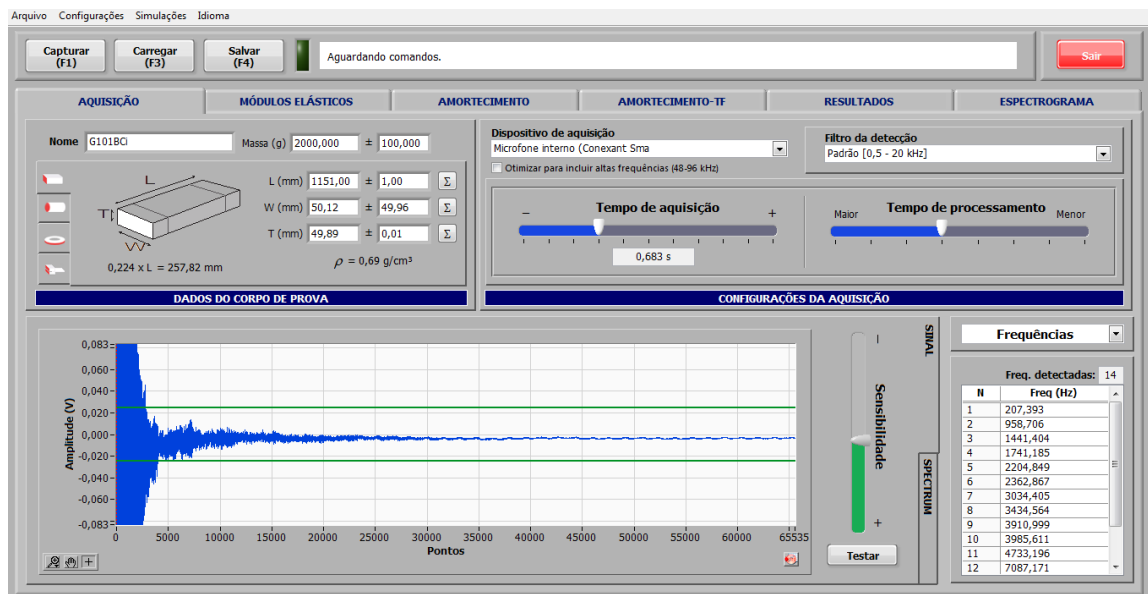
Onde:

b = largura da peça (mm);

t = espessura da peça (mm).

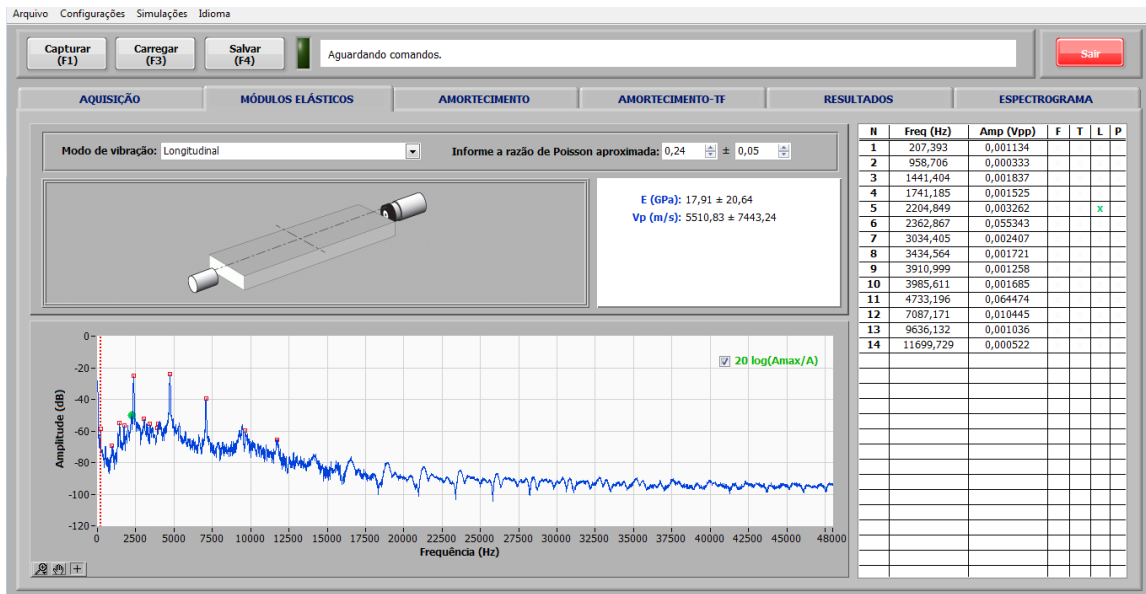
Os corpos de prova foram submetidos a TEI, de acordo com as prescrições do documento normativo ASTM E-1876, para a determinação do valor da frequência de vibração e do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico. A técnica foi executada por meio do *Software Sonelastic® Tecnologia PC Based*, e por meio das Figuras 31 e 32 podemos observar, respectivamente, a entrada e saída do software.

Figura 31 - Entrada do Sonelastic® Tecnologia PC Based.



Fonte: Própria autoria.

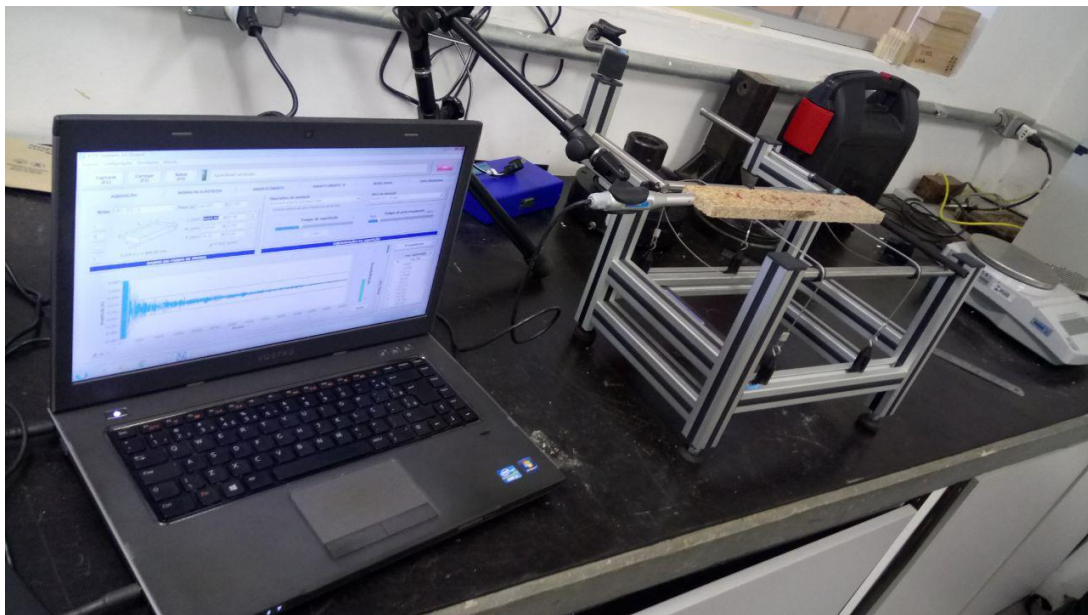
Figura 32 – Saída do Sonelastic® Tecnologia PC Based



Fonte: Própria autoria.

O procedimento ocorreu em sala climatizada à 23°C, em superfície emborrachada, excitando-se cinco vezes os corpos de prova de flexão estática, coletando as frequências obtidas por meio do espectro gerado, e calculando o módulo de elasticidade. A Figura 33 demonstra a realização deste ensaio

Figura 33 – Ensaio não destrutivo: Técnica de Excitação por Impulso.



Fonte: Própria autoria.

3.5 Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos às análises estatísticas, estudando a normalidade (*Shapiro Wilk Test*) e homogeneidade (*Bartlett Test*) dos dados para possibilitar a análise de variância (ANOVA), verificando se as médias das populações diferem umas das outras. A análise de regressão foi utilizada para correlacionar diferentes métodos. Todas as análises estatísticas foram realizadas por meio do software *R Project for Statistical Computing*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico apresentam-se os dados obtidos na pesquisa com suas determinadas análises estatísticas e discussões.

4.1 Ensaios físicos

O tópico aborda os resultados e análises dos testes físicos para os quatro traços de painéis produzidos.

4.1.1 Massa específica

Por meio do teste físico proposto pela norma ABNT NBR 14810-3, foram determinadas a massa e o volume do corpo de prova para cálculo da massa específica. Os resultados encontrados para massa específica (g/cm^3) para os quatro traços estudados estão demonstrados na Tabela 8.

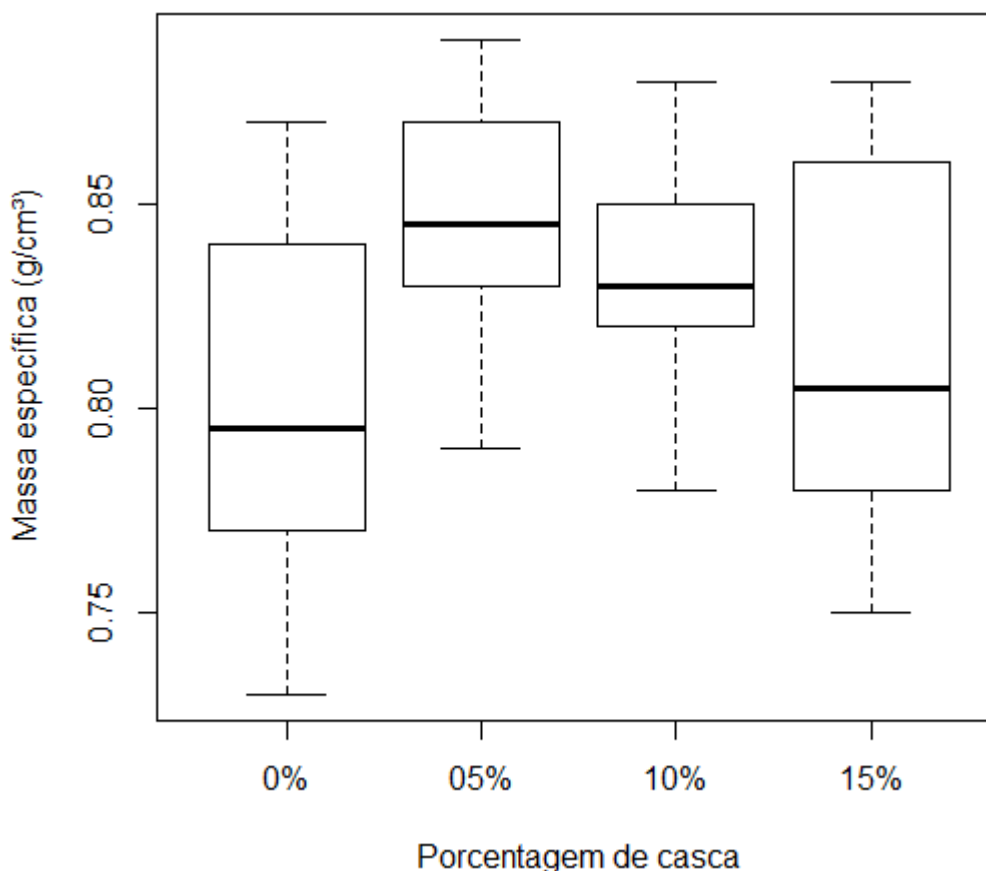
Tabela 8 – Massa específica (g/cm^3) para os quatro traços.

	Traços			
	S/C	5%	10%	15%
Painel 1	0,86	0,87	0,80	0,85
Painel 2	0,80	0,83	0,88	0,79
Painel 3	0,82	0,80	0,83	0,88
Painel 4	0,77	0,85	0,83	0,79
Painel 5	0,74	0,87	0,82	0,77
Média	0,80	0,85	0,83	0,82
DP	0,04	0,02	0,02	0,04
CV (%)	5,02	2,96	2,92	5,11

DP – Desvio Padrão.
CV – Coeficiente de Variação.
S/C – Sem Casca.

Com os resultados obtidos no ensaio de massa específica, foi realizado a ANOVA, para comparar se as médias dos quatro traços estudados diferem ou não uma das outras. A Figura 34 apresenta o gráfico gerado na análise.

Figura 34 – Boxplot massa específica para os quatro traços.



Fonte: Própria autoria

Por meio da análise de variância (ANOVA) obteve-se o p-value 0,0384, rejeitando-se a hipótese nula de que as médias não diferem, ou seja, não apresentam equivalência estatística.

Campos *et al.* (2014) fabricaram painéis MDP de *Eucalyptus ssp.* com adição de casca nas porcentagens de 5, 10, 15 e 20% e não encontraram equivalência estatística na massa específica. Com isso conclui-se que a porcentagem de casca adicionado em ambos painéis de *Eucalyptus* afetaram a densidade, contradizendo com a pesquisa desenvolvida por Trianoski *et al.* (2013), onde não encontraram diferença estatística para adição de casca em painéis aglomerados de *Acrocarpus fraxiiniifolius*.

4.1.2 Inchamento em espessura 24 horas

Por meio do teste físico proposto pela norma ABNT NBR 14810-3, foram determinadas a espessura inicial e a espessura final (após a absorção de água) do

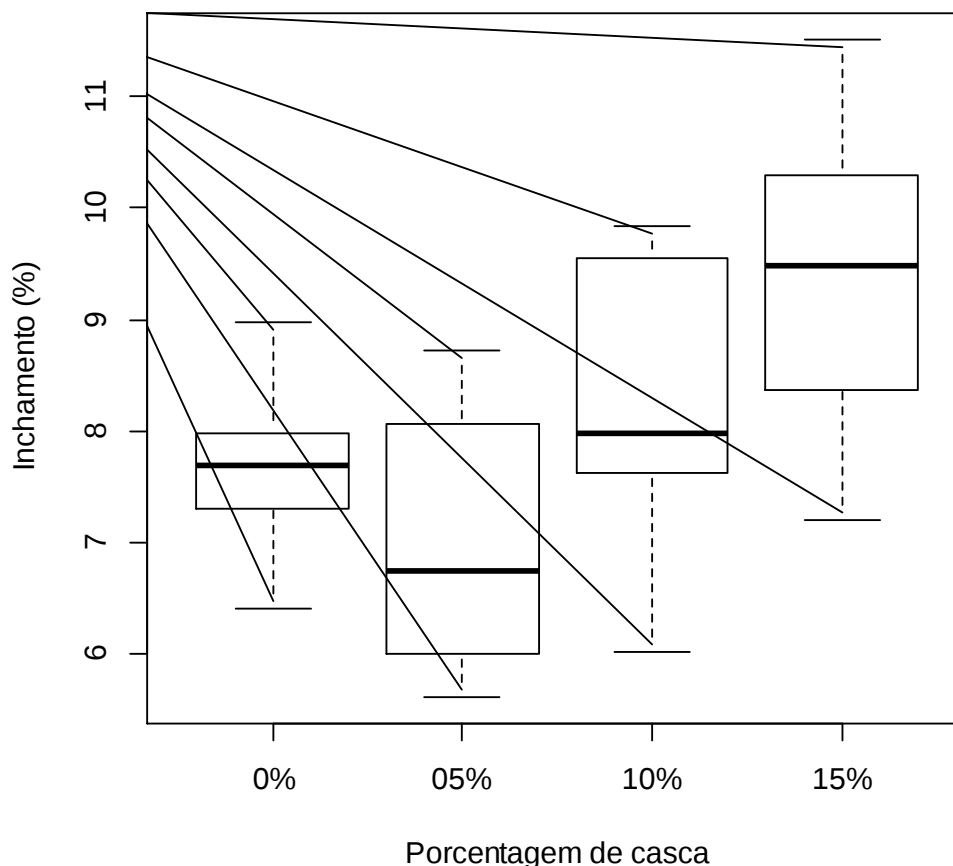
corpo de prova, fundamentais para o cálculo do inchamento em espessura 24 horas. Os resultados obtidos para os quatro traços estudados encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 – Inchamento e espessura 24 horas (%) para os quatro traços.

	Traços			
	S/C	5%	10%	15%
Painel 1	7,09	8,40	8,77	8,51
Painel 2	8,07	6,59	6,98	10,90
Painel 3	8,38	7,87	8,73	8,95
Painel 4	7,25	5,96	7,00	9,82
Painel 5	7,65	5,98	9,27	8,84
Média	7,69	6,96	8,15	9,40
DP	0,48	1,00	0,97	0,86
CV (%)	6,27	14,37	11,86	9,17

Com os resultados obtidos no ensaio de inchamento em espessura 24 horas, foi realizado a ANOVA, para comparar se as médias dos quatro traços estudados diferem ou não uma das outras. A Figura 35 apresenta o gráfico gerado na análise.

Figura 35 – Boxplot inchamento em espessura 24 horas para os quatro traços.



Fonte: Própria autoria

Por meio da análise de variância (ANOVA) obteve-se o p-value 0,000546, rejeitando-se a hipótese nula de que as médias não diferem, ou seja, não apresentam equivalência estatística. Com isso conclui-se que a porcentagem de casca adicionado nos painéis afetou no inchamento em espessura. Os dados estudados apresentaram distribuição normal e as variâncias foram homogêneas, a partir dos testes Shapiro Wilk (normalidade) e Bartlett (homogeneidade).

No trabalho desenvolvido por Campos *et al.* (2014), os pesquisadores encontraram uma porcentagem de inchamento em espessura médio para 10% de casca no valor de 11,12%, valor este maior que o apresentado neste trabalho presente. Quanto a variação de porcentagem de casca, os autores não encontraram diferença estatística, porém os valores demonstraram a mesma tendência de aumento da porcentagem de inchamento com o aumento da porcentagem de casca.

Trianoski *et al.* (2013) encontraram resultados diferentes para o gênero *Acrocarpus*, onde houve diferença estatística com 10 a 30% de casca, onde quanto maior a porcentagem de casca menor foi o inchamento em espessura. Esta diferença se deve as propriedades químicas da casca de cada gênero/espécie, onde a casca de Eucalipto apresenta características de absorção de água maiores que o *Acrocarpus fraxinifolius*.

4.1.3 Absorção de água 24 horas

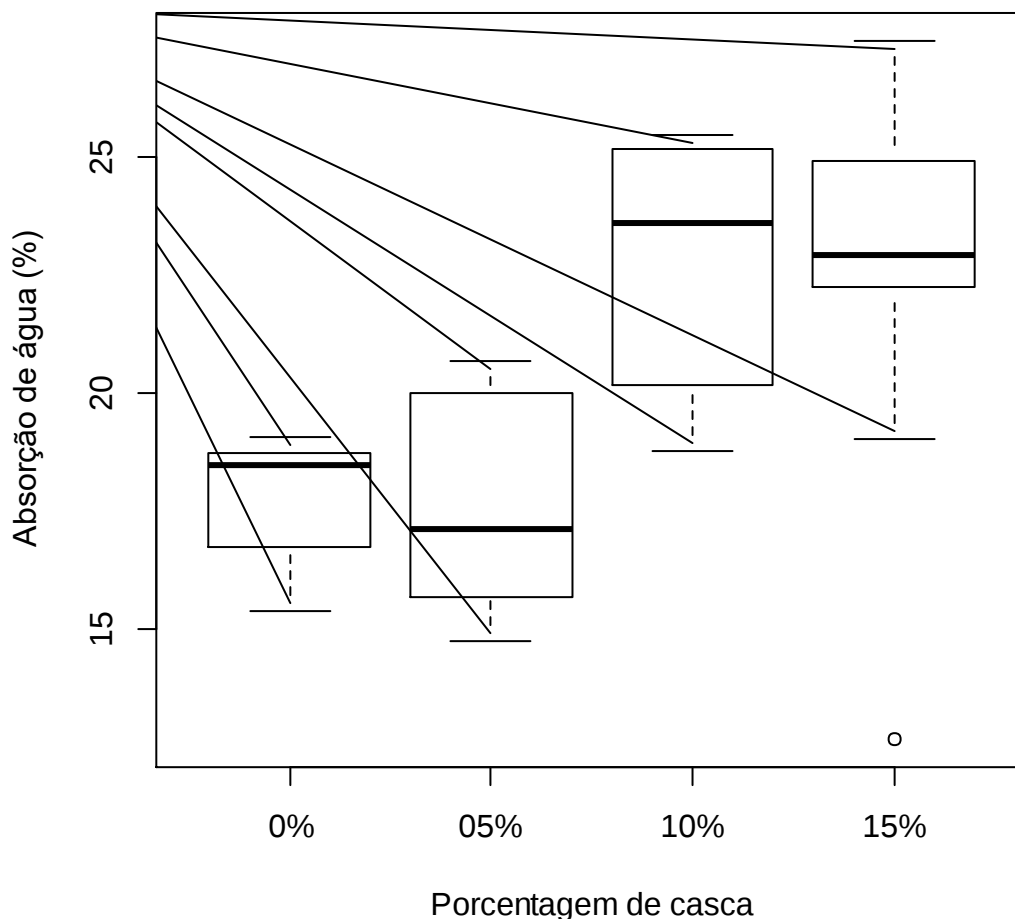
Por meio do teste físico proposto pela norma ABNT NBR 14810-3, foram determinadas a massa inicial e a massa final (após a absorção de água) do corpo de prova, fundamentais para o cálculo da absorção de água 24 horas (%). Os resultados encontrados para os quatro traços estudados estão demonstrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Absorção de água 24 horas (%) para os quatro traços.

	Traços			
	S/C	5%	10%	15%
Painel 1	16,95	20,11	24,22	20,69
Painel 2	18,48	16,64	20,03	27,28
Painel 3	18,38	20,16	24,66	22,92
Painel 4	16,63	16,33	19,58	18,81
Painel 5	18,92	14,98	24,70	23,58
Média	17,87	17,65	22,64	22,65
DP	0,91	2,11	2,32	2,86
CV (%)	5,06	11,96	10,26	12,62

Com os resultados obtidos no ensaio de absorção de água 24 horas, foi realizado a ANOVA, para comparar se as médias dos quatro traços estudados diferem ou não uma das outras. A Figura 36 apresenta o gráfico gerado na análise.

Figura 36 – Boxplot absorção de água para os quatro traços.



Fonte: Própria autoria.

Dados para “0% de casca” não apresentarão distribuição normal e as variâncias não foram homogêneas, por meio dos testes Shapiro Wilk e Bartlett, respectivamente. Com isso para a análise dos dados, os mesmos foram submetidos ao teste não paramétrico Kruskal Wallis, onde encontrou-se $p\text{-value} = 0,0001907$ rejeitando-se a hipótese nula de que as médias não diferem, ou seja, não apresentam equivalência estatística. Com isso conclui-se que a porcentagem de casca adicionado nos painéis afetou na absorção de água.

Campos *et al.* (2014) encontraram uma porcentagem de absorção de água médio para 10% de casca no valor de 11,07%, valor este menor que o apresentado neste trabalho presente. Quanto a variação de porcentagem de casca, os autores não

encontraram diferença estatística, porém os valores demonstraram uma grande de aumento da porcentagem de absorção de água com o aumento da porcentagem de casca.

Como encontrado para o inchamento em espessura 24 horas, Trianoski *et al.* (2013) demonstraram diferença estatística com 10 a 30% de casca, onde quanto maior a porcentagem de casca menor foi a absorção de água. Esta diferença, assim como demonstrado para inchamento 24 horas, se deve as propriedades químicas da casca de cada gênero.

4.1.4 Umidade específica

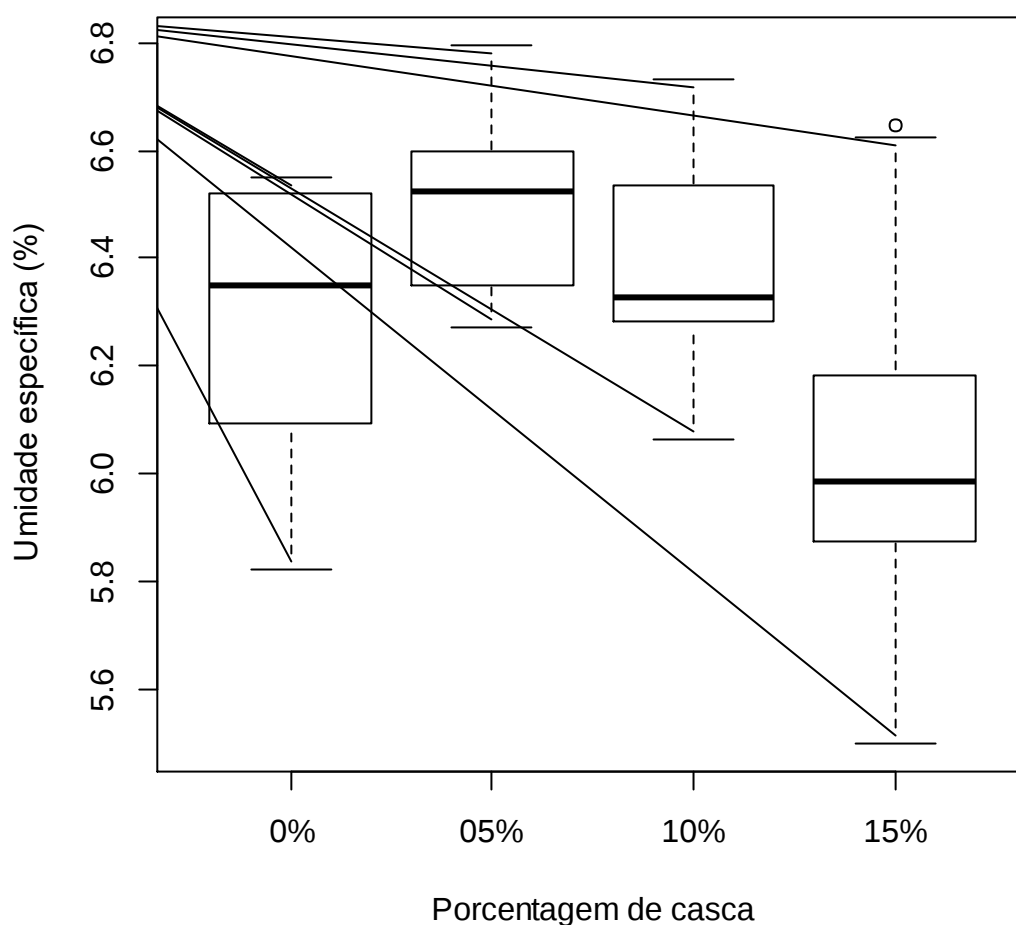
Por meio do teste físico proposto pela norma ABNT NBR 14810-3, foram determinadas a massa úmida e a massa saturada (após secagem) do corpo de prova, fundamentais para o cálculo da umidade específica (%). Os resultados obtidos para os quatro traços estudados encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 – Umidade específica (%) para os quatro traços.

	Traços			
	S/C	5%	10%	15%
Painel 1	6,53	6,48	6,18	5,55
Painel 2	6,12	6,58	6,63	5,93
Painel 3	5,83	6,43	6,30	6,06
Painel 4	6,53	6,70	6,43	6,64
Painel 5	6,35	6,31	6,26	6,06
Média	6,27	6,50	6,36	6,05
DP	0,27	0,13	0,16	0,35
CV (%)	4,24	2,02	2,50	5,79

Com os resultados obtidos no ensaio de umidade específica, foi realizado a ANOVA, para comparar se as médias dos quatro traços estudados diferem ou não uma das outras. A Figura 37 abaixo apresenta o gráfico gerado na análise.

Figura 37 – Boxplot umidade específica para os quatro traços.



Fonte: Própria autoria.

Por meio da análise de variância (ANOVA) obteve-se o p-value 0,00473, rejeitando-se a hipótese nula de que as médias não diferem, ou seja, não apresentam equivalência estatística. Com isso conclui-se que a porcentagem de casca adicionado nos painéis afetou na umidade específica. Os dados estudados apresentaram distribuição normal e as variâncias foram homogêneas, a partir dos testes Shapiro Wilk (normalidade) e Bartlett (homogeneidade).

Campos *et al.* (2014) encontraram diferença estatística para umidade específica entre painéis MDP com a adição 5, 10, 15 e 20% de casca. Todos os valores encontrados para umidade específica pelos autores foram superiores aos encontrados neste presente trabalho, e superiores ao valor estabelecido pela norma brasileira ABNT NBR 14810-2, que limita o umidade específica em 11%. Todos os valores determinados neste presente trabalho para umidade específica estão dentro das exigências normativas.

4.2 Ensaios Mecânicos

O tópico aborda os resultados e análises dos ensaios mecânicos para os quatro traços de painéis produzidos.

4.2.1 Flexão estática

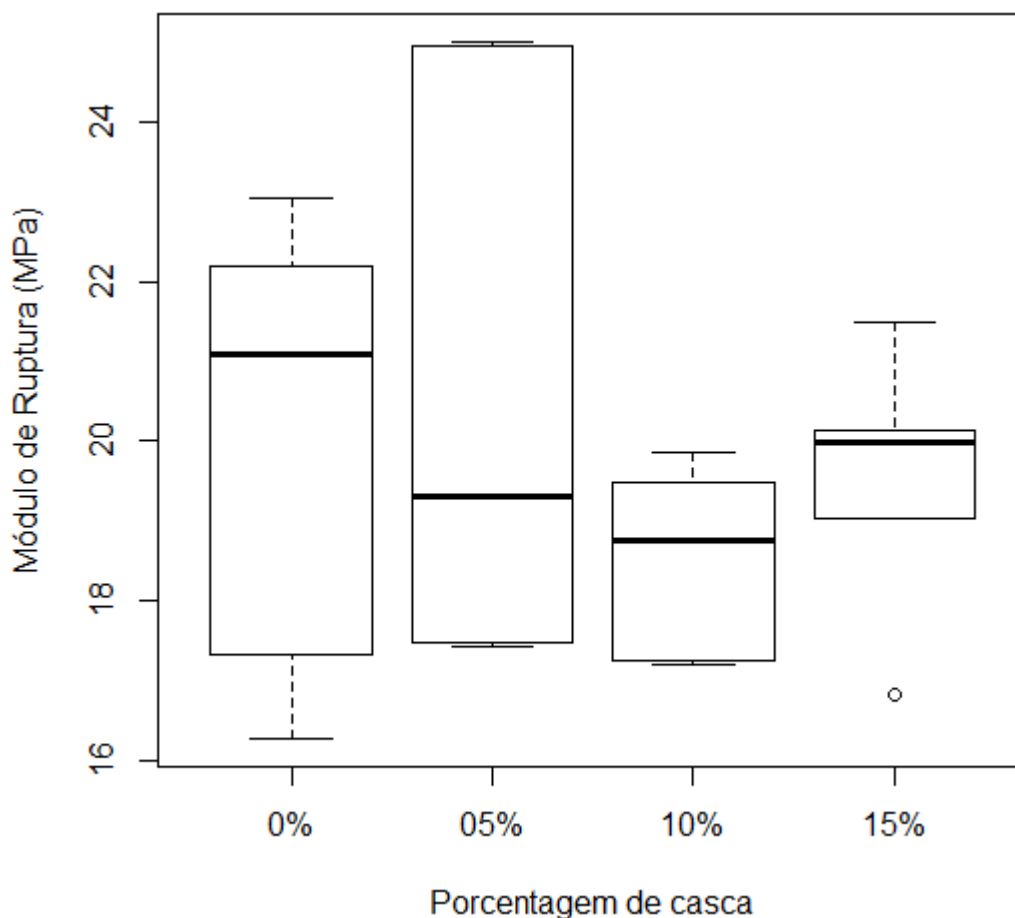
Por meio do ensaio de flexão proposto pela norma ABNT NBR 14810-3, determinou-se o módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR), para os quatro traços de painéis produzidos. Os resultados encontrados de MOE e MOR para os quatro traços estudados estão demonstrados na Tabela 12.

Tabela 12 – MOR e MOE para os quatro traços.

	Traços							
	S/C		5%		10%		15%	
	MOR	MOE	MOR	MOE	MOR	MOE	MOR	MOE
Painel 1	21,09	2,70	17,49	2,26	19,48	2,91	20,14	2,11
Painel 2	22,18	2,80	24,99	2,78	17,25	2,78	21,48	2,30
Painel 3	23,04	2,96	24,94	2,65	19,86	2,23	16,84	1,84
Painel 4	16,29	2,28	17,44	2,48	18,76	2,21	19,99	2,34
Painel 5	17,34	2,60	19,31	2,21	17,20	2,12	19,04	2,35
Média	19,99	2,67	20,83	2,48	18,51	2,45	19,50	2,19
DP	2,68	0,23	3,44	0,22	1,11	0,33	1,54	0,19
CV (%)	13,43	8,53	16,51	8,85	5,98	13,36	7,90	8,89
MOR [MPa]								
MOE [GPa]								

Com os resultados obtidos para módulo de ruptura no ensaio mecânico de flexão estática, foi realizado a ANOVA, para comparar se as médias dos quatro traços estudados diferem ou não uma das outras. A Figura 38 abaixo apresenta o gráfico gerado na análise.

Figura 38 – Boxplot módulo de ruptura para os quatro traços.



Fonte: Própria autoria.

Por meio da análise de variância (ANOVA) obteve-se o p-value 0,585, aceitando-se a hipótese nula de que as médias não diferem, ou seja, apresentam equivalência estatística. Com isso conclui-se que a porcentagem de casca adicionado nos painéis não afetou estatisticamente no módulo de ruptura. Os dados estudados apresentaram distribuição normal e as variâncias foram homogêneas, a partir dos testes Shapiro Wilk (normalidade) e Bartlett (homogeneidade).

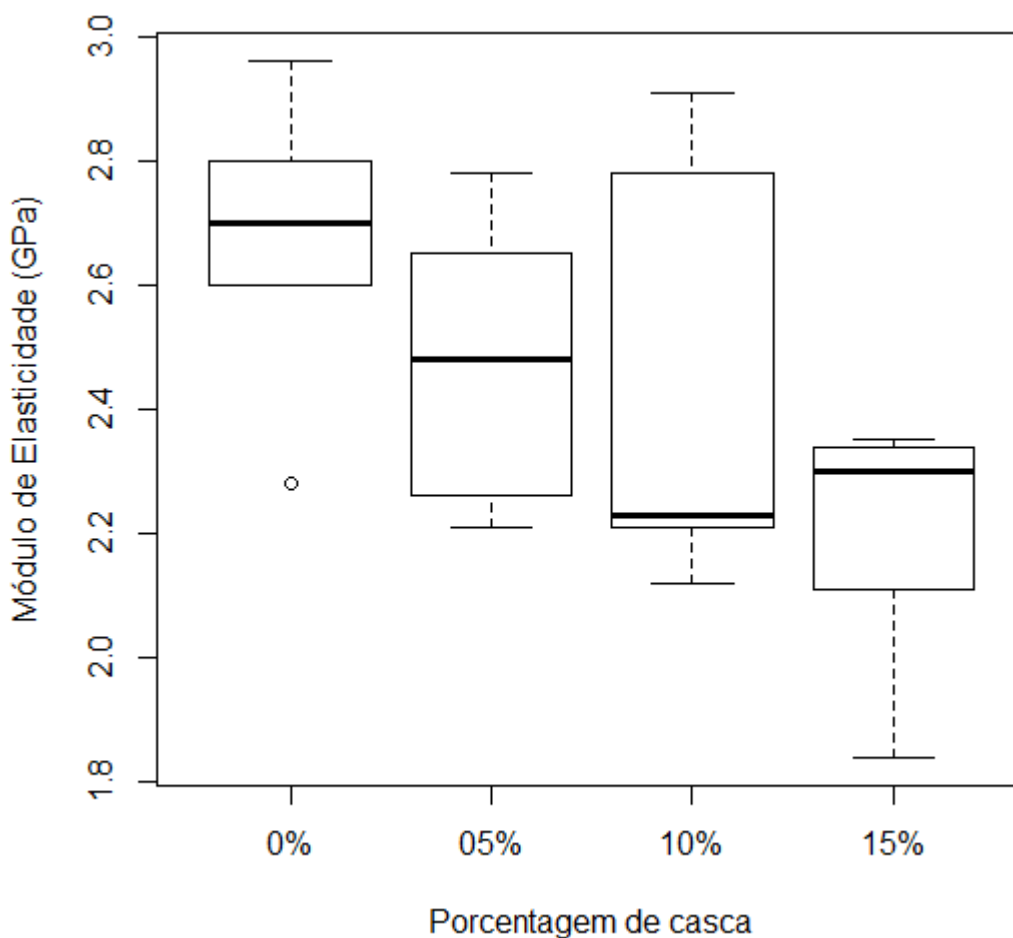
Campos *et al.* (2014) não encontraram diferenças estatísticas para os 4 traços estudados com adição de 5, 10, 15 e 20% de casca, condizendo com os dados obtidos neste trabalho.

Os resultados encontrados por Trianoski *et al.* (2013) para módulo de ruptura na flexão estática não demonstram diferença estatística com 10 a 30% de casca de *Acrocarpus fraxiiniifolius*. O comportamento mecânico da casca da espécie *Acrocarpus fraxiiniifolius* possui semelhança com o comportamento do *Eucalyptus*

ssp., pois ambas possuem fibras longas, e com isso maior resistência e homogeneidade.

Com os resultados obtidos para módulo de elasticidade no ensaio mecânico de flexão estática, foi realizado a ANOVA, para comparar se as médias dos quatro traços estudados diferem ou não uma das outras. A Figura 39 abaixo apresenta o gráfico gerado na análise.

Figura 39 – Boxplot módulo de elasticidade para os quatro traços.



Fonte: Própria autoria.

Por meio da análise de variância (ANOVA) obteve-se o p-value 0,0926, aceitando-se a hipótese nula de que as médias não diferem, ou seja, apresentam equivalência estatística. Com isso conclui-se que a porcentagem de casca adicionado nos painéis não afetou estatisticamente no módulo de elasticidade. Os dados estudados apresentaram distribuição normal e as variâncias foram homogêneas, a partir dos testes Shapiro Wilk (normalidade) e Bartlett (homogeneidade).

O resultado para módulo de elasticidade na flexão estática encontrado por Campos *et al.* (2014), para os 4 traços estudados com adição de 5, 10, 15 e 20% de casca, não apresentarão equivalência estatística, demonstrando uma diminuição do MOE com o aumento da porcentagem de casca.

Para o módulo de elasticidade na flexão estática Trianoski *et al.* (2013) também não encontraram diferença estatística com 10 a 30% de casca de *Acrocarpus fraxiifolius*. Isso demonstra que a casca de ambas espécies não afetaram na resistência e rigidez dos painéis aglomerados.

4.2.2 Tração perpendicular

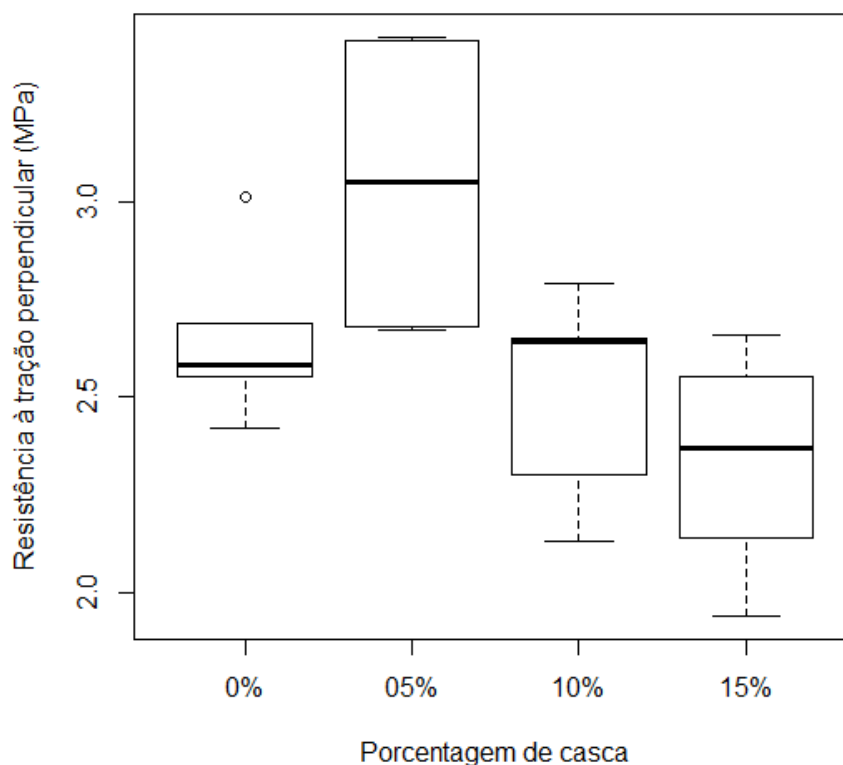
Por meio do ensaio de tração perpendicular proposto pela norma ABNT NBR 14810-3, determinou-se a resistência à tração perpendicular (TP) em MPa, para os quatro traços de painéis produzidos. Os resultados obtidos de TP encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 – Resistência à tração perpendicular (MPa) para os quatro traços.

	Traços			
	S/C	5%	10%	15%
Painel 1	2,55	3,05	2,13	2,55
Painel 2	2,58	3,42	2,65	2,66
Painel 3	3,01	2,67	2,30	2,14
Painel 4	2,42	3,41	2,79	1,94
Painel 5	2,69	2,68	2,64	2,37
Média	2,65	3,05	2,50	2,33
DP	0,20	0,33	0,25	0,26
CV (%)	7,53	10,87	9,84	11,30

Com os resultados obtidos no ensaio de tração perpendicular, foi realizado a ANOVA, para comparar se as médias dos quatro traços estudados diferem ou não uma das outras. A Figura 40 abaixo apresenta o gráfico gerado na análise.

Figura 40 – Boxplot resistência a tração perpendicular para os quatro traços.



Fonte: Própria autoria.

Por meio da análise de variância (ANOVA) obteve-se o p-value 0,00981, rejeitando-se a hipótese nula de que as médias não diferem, ou seja, não apresentam equivalência estatística. Com isso conclui-se que a porcentagem de casca adicionado nos painéis afetou estatisticamente na resistência à tração perpendicular. Os dados estudados apresentaram distribuição normal e as variâncias foram homogêneas, a partir dos testes Shapiro Wilk (normalidade) e Bartlett (homogeneidade).

Campos *et al.* (2014) não encontraram diferenças estatísticas na resistência à tração perpendicular para os 4 traços estudados com adição de 5, 10, 15 e 20% de casca. Esta diferença se deve ao fato de Campos *et al.* (2019) produziram MDP, onde as camadas internas possuem mais finos e a ligação é mais resistente, diferentemente do aglomerado.

Os resultados encontrados por Trianoski *et al.* (2013) para módulo de ruptura na flexão estática não demonstram diferença estatística com 10 a 30% de casca de *Acrocarpus fraxiiniifolius*. Esta diferença se deve à maior presença de sílica na composição da casca de *Eucalyptus spp.*, que dificulta o acesso a uma ligação mais homogênea entre as partículas.

4.2.3 Tração superficial

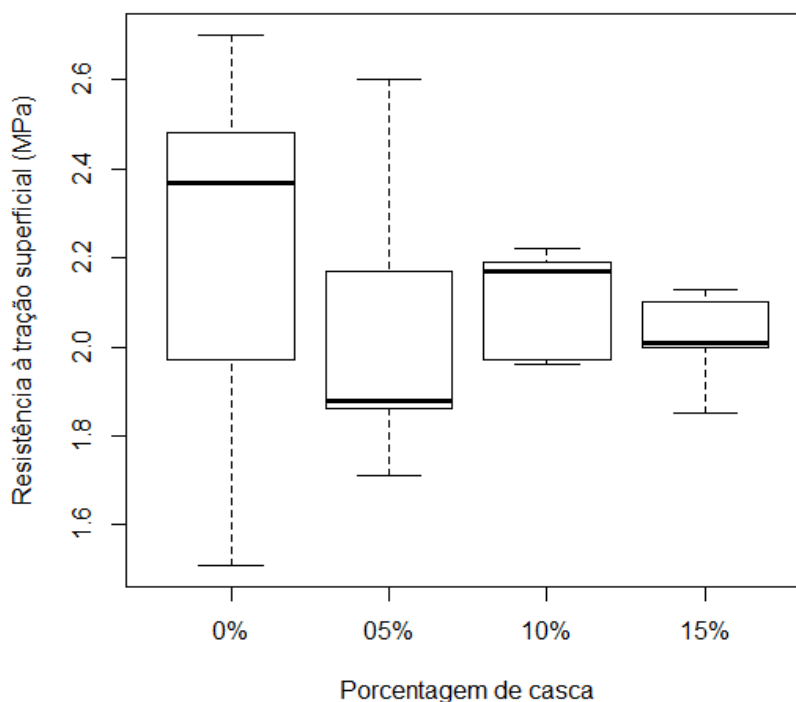
Por meio do ensaio de tração superficial proposto pela norma ABNT NBR 14810-3, determinou-se a resistência à tração superficial (RS) em MPa, para os quatro traços de painéis produzidos. Os resultados encontrados de RS encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14 – Resistência à tração superficial (MPa) para os quatro traços.

	Traços			
	S/C	5%	10%	15%
Painel 1	1,51	1,71	2,17	2,00
Painel 2	2,70	2,60	2,22	2,10
Painel 3	2,37	1,88	1,97	2,01
Painel 4	2,48	1,86	2,19	1,85
Painel 5	1,97	2,17	1,96	2,13
Média	2,21	2,04	2,10	2,02
DP	0,42	0,32	0,11	0,10
CV (%)	19,80	15,43	5,38	4,85

Com os resultados obtidos no ensaio de tração superficial, foi realizado a ANOVA, para comparar se as médias dos quatro traços estudados diferem ou não uma das outras. A Figura 41 abaixo apresenta o gráfico gerado na análise.

Figura 41 – Boxplot resistência à tração superficial para os quatro traços.



Fonte: Própria autoria.

Dados apresentaram distribuição normal, porém as variâncias não foram homogêneas (Shapiro Wilk para normalidade e Bartlett test para homogeneidade dos dados) , com isso para a análise dos dados, os mesmos foram submetidos ao teste não paramétrico Kruskal Wallis, onde obteve-se o p-value 0.6479, aceitando-se a hipótese nula de que as médias não diferem, ou seja, apresentam equivalência estatística. Com isso conclui-se que a porcentagem de casca adicionado nos painéis não afetou estatisticamente na resistência à tração superficial.

Telles (2016) fabricou e avaliou painéis MDP (Medium Density Particleboard), com proporções de madeira de *Eucalyptus grandis*, e encontrou o valor médio de 1,1 MPa, valor este abaixo do valor médio de todos os painéis produzidos no trabalho aqui presente.

4.2.4 Arrancamento de parafuso

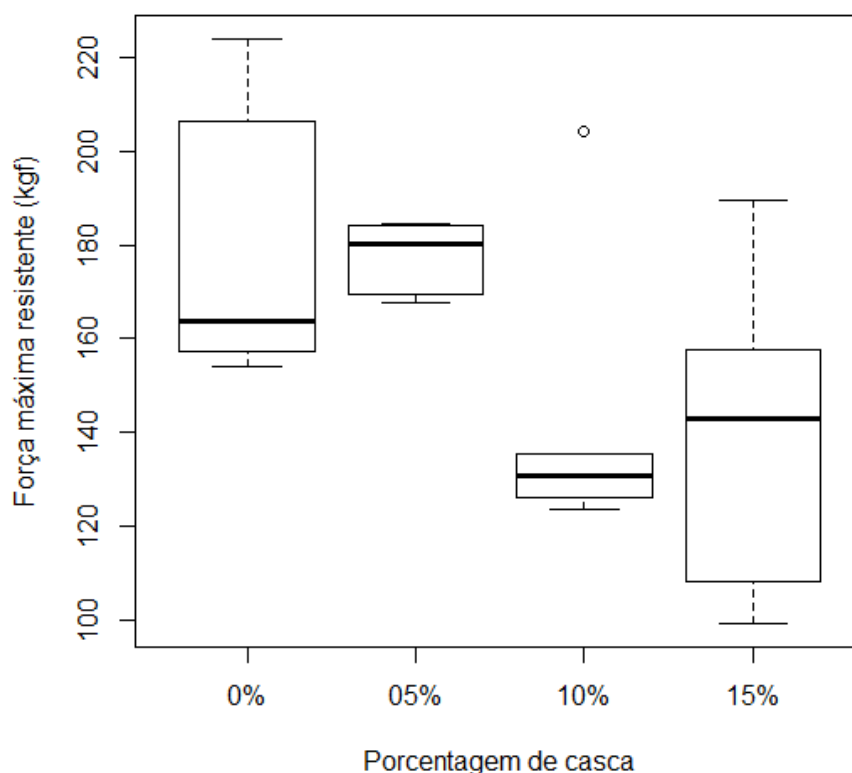
Por meio do ensaio de arrancamento de parafuso proposto pela norma ABNT NBR 14810-3, determinou-se a força máxima resistente (F) na face e topo em kgf, para os quatro traços de painéis produzidos. Os resultados encontrados de F estão demonstrados na Tabela 15.

Tabela 15 – Força máxima resistente ao arrancamento de parafusos (kgf) para os quatro traços.

	Traços							
	S/C		5%		10%		15%	
	Face	Topo	Face	Topo	Face	Topo	Face	Topo
Painel 1	206,34	207,68	184,10	161,94	130,81	165,40	108,29	155,59
Painel 2	223,85	245,52	167,66	185,30	126,08	160,39	143,09	144,86
Painel 3	154,17	160,46	169,42	243,68	204,15	221,45	99,39	143,16
Painel 4	163,63	171,54	180,08	155,73	123,75	140,97	157,63	121,56
Painel 5	157,35	150,08	184,39	195,89	135,61	156,64	189,47	204,86
Média	181,07	187,06	177,13	188,51	144,08	168,97	139,57	154,01
DP	28,49	35,10	7,20	31,27	30,31	27,48	31,93	27,72
CV (%)	15,74	18,76	4,06	16,59	21,04	16,26	23,59	18,00

Com os resultados obtidos no ensaio de arrancamento de parafuso de face, foi realizado a ANOVA, para comparar se as médias dos quatro traços estudados diferem ou não uma das outras. A Figura 42 abaixo apresenta o gráfico gerado na análise.

Figura 42 – Boxplot força máxima resistente de arrancamento de parafuso da face para os quatro traços.



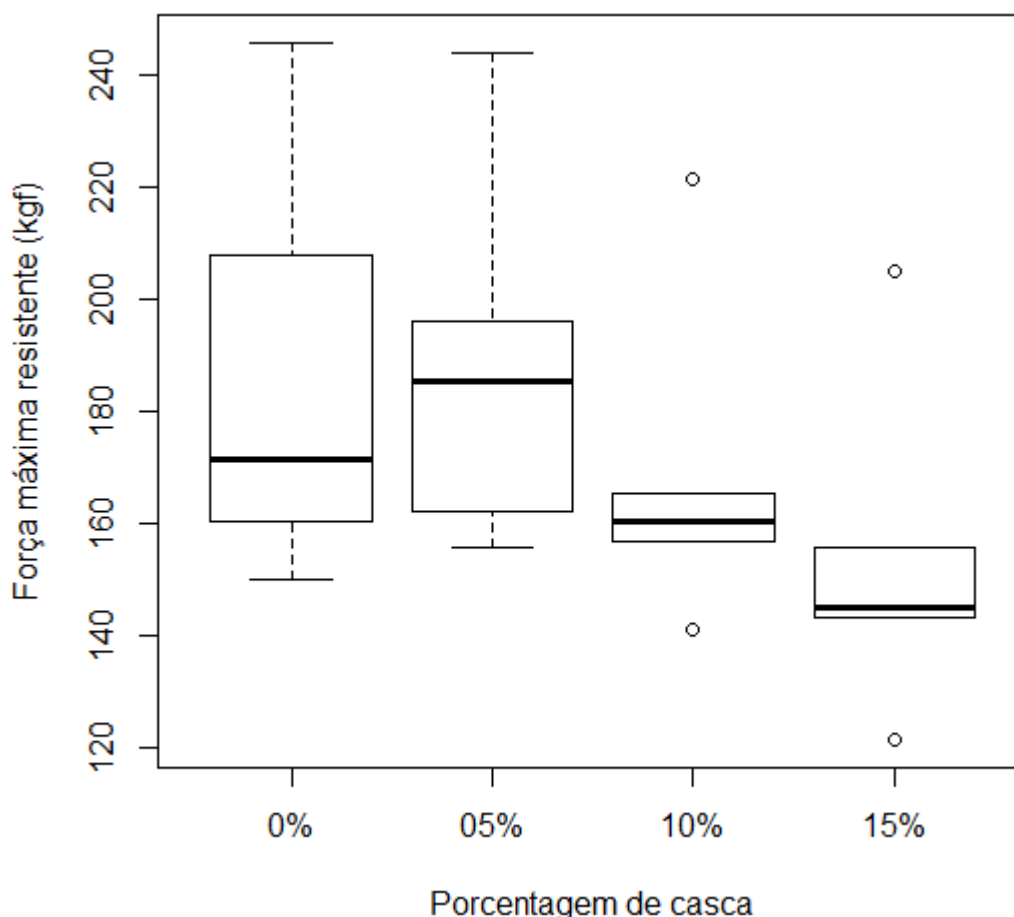
Fonte: Própria autoria.

Dados para “10% de casca” não apresentarão distribuição normal e as variâncias foram homogêneas, por meio dos testes Shapiro Wilk e Bartlett, respectivamente. Com isso para a análise dos dados, os mesmos foram submetidos ao teste não paramétrico Kruskal Wallis, onde encontrou-se $p\text{-value} = 0,1176$ aceitando-se a hipótese nula de que as médias não diferem, ou seja, apresentam equivalência estatística. Com isso conclui-se que a porcentagem de casca adicionado nos painéis não afetou na resistência à força máxima resistente do arrancamento de parafuso de face.

Trianoski *et al.* (2013) encontraram diferença estatística entre 10 à 30% de casca de *Acrocarpus fraxiifolius* para força máxima resistente de arrancamento de parafuso na face. O mesmo não ocorreu no trabalho aqui apresentado, porém observa uma tendência de diminuição da força máxima resistente, similar ao apresentado no trabalho de Trianoski *et al.* (2013).

Com os resultados obtidos no ensaio de arrancamento de parafuso de topo, foi realizado a ANOVA, para comparar se as médias dos quatro traços estudados diferem ou não uma das outras. A Figura 43 apresenta o gráfico gerado na análise.

Figura 43 – Boxplot força máxima resistente de arrancamento de parafuso de topo para os quatro traços.



Fonte: Própria autoria.

Por meio da análise de variância (ANOVA) obteve-se o p-value 0,36, aceitando-se a hipótese nula de que as médias não diferem, ou seja, apresentam equivalência estatística. Com isso conclui-se que a porcentagem de casca adicionado nos painéis não afetou estatisticamente na resistência à força máxima resistente do arrancamento de parafuso de topo. Os dados estudados apresentaram distribuição normal e as variâncias foram homogêneas, a partir dos testes Shapiro Wilk (normalidade) e Bartlett (homogeneidade).

Trianoski *et al.* (2013) encontraram diferença estatística entre 10 à 30% de casca de *Acrocarpus fraxiifolius* para força máxima resistente de arrancamento de

parafuso de topo. Isso demonstra uma boa aplicabilidade de painéis produzidos com adição de casca de *Eucalyptus ssp.* para móveis com ligações por parafusos, pois ambas as resistências na arrancamento de parafuso não demonstraram diferença estatística com a adição de porcentagens de casca.

4.3 Técnica de Excitação por Impulso

O tópico aborda os resultados e análises obtidos pela Técnica de Excitação por Impulso para os quatro traços de painéis produzido, assim como a correlação entre o método destrutivo e o método não destrutivo.

4.3.1 Frequências naturais de vibração

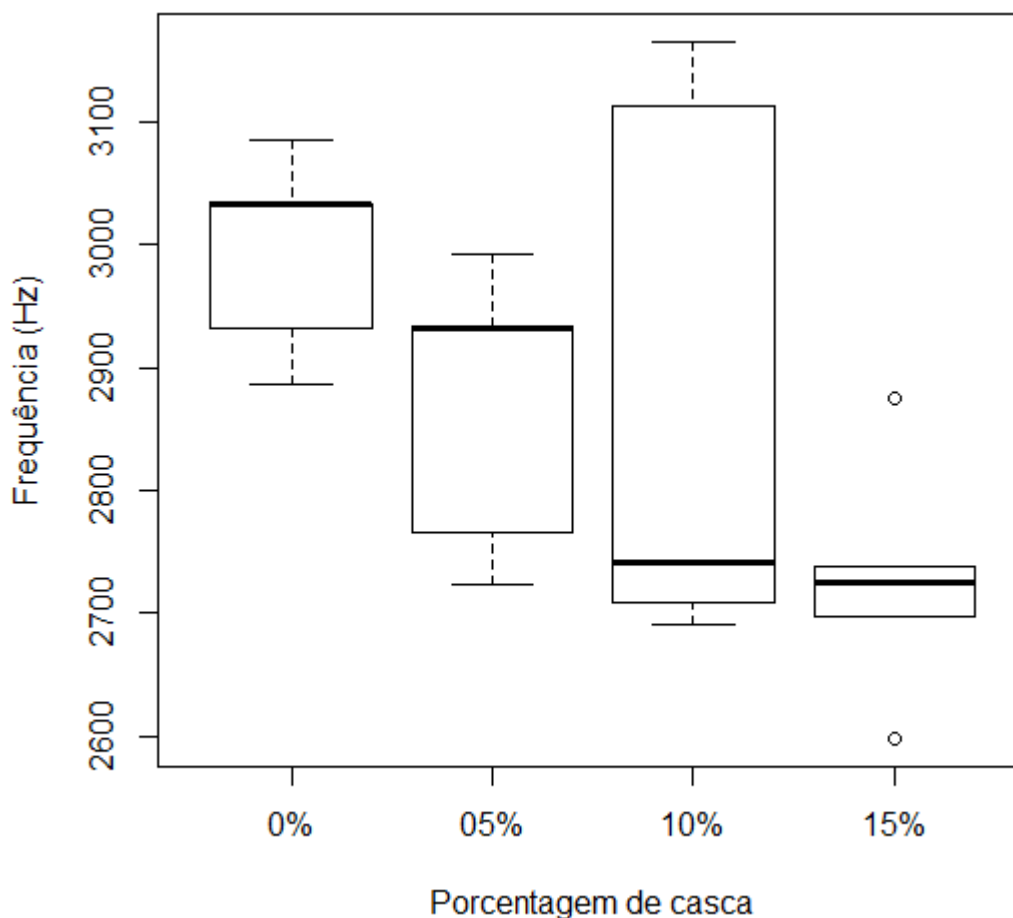
Na Técnica de Excitação por Impulso os módulos elásticos e o amortecimento são caracterizados a partir da resposta acústica emitida pela amostra após receber um leve impulso mecânico. Esta resposta acústica contém as frequências naturais de vibração. Foram obtidas frequências naturais (Hz) para os quatro traços estudados, demonstrados na Tabela 16 abaixo.

Tabela 16 – Frequência (Hz) para os quatro traços.

	Traços			
	S/C	5%	10%	15%
Painel 1	3032,27	2765,54	3164,55	2697,61
Painel 2	3032,10	2992,84	3112,19	2725,64
Painel 3	3084,41	2933,33	2707,98	2598,33
Painel 4	2886,36	2932,19	2741,59	2738,66
Painel 5	2932,04	2722,80	2691,38	2874,73
Média	2993,44	2869,34	2883,54	2726,99
DP	81,42	117,84	234,06	99,22
CV (%)	2,72	4,11	8,12	3,64

Com os resultados obtidos para frequência por meio da TEI, foi realizado a ANOVA, para comparar se as médias dos quatro traços estudados diferem ou não uma das outras. A Figura 44 apresenta o gráfico gerado na análise.

Figura 44 – Boxplot frequência para os quatro traços.



Fonte: Própria autoria.

Dados para “10% de casca” não apresentarão distribuição normal e as variâncias foram homogêneas, por meio dos testes Shapiro Wilk e Bartlett, respectivamente. Com isso para a análise dos dados, os mesmos foram submetidos ao teste não paramétrico Kruskal Wallis, onde encontrou-se $p\text{-value} = 0,09252$ aceitando-se a hipótese nula de que as médias não diferem, ou seja, apresentam equivalência estatística. Com isso conclui-se que a porcentagem de casca adicionado nos painéis não afetou na frequência.

Lima Jr. *et al.* (2018) estudaram as frequências de vibração naturais para a madeira de *Eucalyptus grandis* de 10 anos de idade, e encontraram o valor médio de 2118 Hz, este valor inferior ao de 2868 Hz encontrado no trabalho aqui presente. Esta diferença se deve ao tipo de produto, pois nos painéis de partículas a propagação sonora e as frequências de vibrações ocorrem de maneira mais homogênea em toda a peça, não ocorrendo desvios e/ou perdas de propagação.

4.3.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico

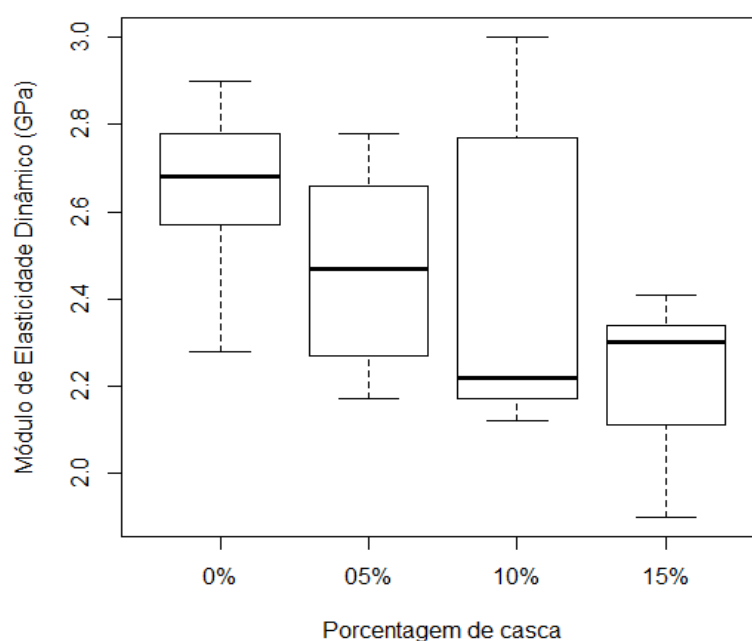
Por meio da frequência natural de vibração obtida pela TEI, foram calculados os módulos de elasticidade dinâmico (GPa) para os quatro traços, representados abaixo na Tabela 17.

Tabela 17 – Módulo de elasticidade dinâmico (GPa) para os quatro traços.

	Traços			
	S/C	5%	10%	15%
Painel 1	2,78	2,27	3,00	2,11
Painel 2	2,68	2,78	2,77	2,34
Painel 3	2,90	2,66	2,22	1,90
Painel 4	2,28	2,47	2,17	2,30
Painel 5	2,57	2,17	2,12	2,41
Média	2,64	2,47	2,46	2,21
DP	0,24	0,26	0,40	0,21
CV (%)	8,94	10,37	16,35	9,35

Com os resultados obtidos para módulo de elasticidade dinâmico por meio da TEI, foi realizado a ANOVA, para comparar se as médias dos quatro traços estudados diferem ou não uma das outras. A Figura 45 abaixo apresenta o gráfico gerado na análise.

Figura 45 – Boxplot módulo de elasticidade dinâmico para os quatro traços.



Fonte: Própria autoria.

Por meio da análise de variância (ANOVA) obteve-se o p-value 0,167, aceitando-se a hipótese nula de que as médias não diferem, ou seja, apresentam equivalência estatística. Com isso conclui-se que a porcentagem de casca adicionado nos painéis não afetou estatisticamente no módulo de elasticidade dinâmico. Os dados estudados apresentaram distribuição normal e as variâncias foram homogêneas, a partir dos testes Shapiro Wilk (normalidade) e Bartlett (homogeneidade).

Assim como estudado para o módulo de elasticidade estático, os valores encontrados para o módulo de elasticidade dinâmico, para os quatro traços estudados, não apresentarão diferenças estatísticas, ou seja, apresentarão equivalência estatística, condizendo com as caracterizações mecânicas realizadas por Trianoski *et al.* (2013).

4.3.3 Eficiência da Técnica de Excitação por Impulso

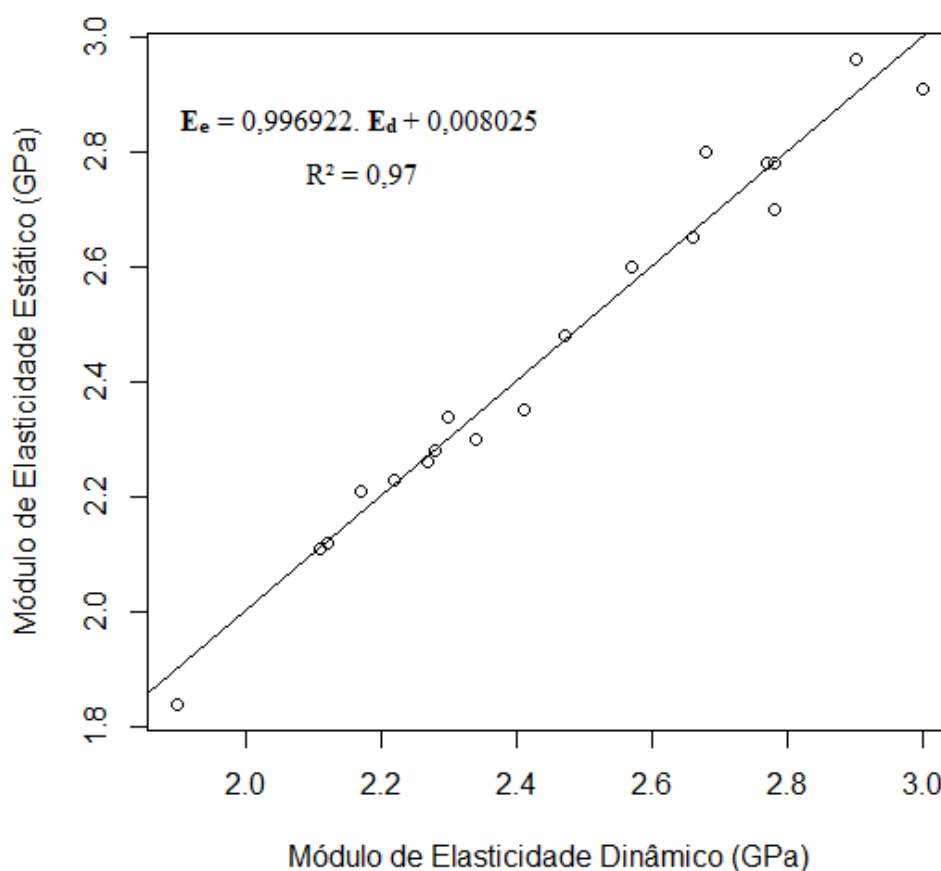
Tratando-se de um método novo e não destrutivo, para admitir a eficiência do mesmo, foi feita a correlação dos módulos de elasticidade dinâmico (E_d) e estático (E_e). Os módulos calculados e obtidos para as duas técnicas seguem na Tabela 18.

Tabela 18 – E_d e E_e (GPa) para os quatro traços.

	Traços							
	S/C		5%		10%		15%	
	E_d	E_e	E_d	E_e	E_d	E_e	E_d	E_e
Painel 1	2,78	2,70	2,27	2,26	3,00	2,91	2,11	2,11
Painel 2	2,68	2,80	2,78	2,78	2,77	2,78	2,34	2,30
Painel 3	2,90	2,96	2,66	2,65	2,22	2,23	1,90	1,84
Painel 4	2,28	2,28	2,47	2,48	2,17	2,21	2,30	2,34
Painel 5	2,57	2,60	2,17	2,21	2,12	2,12	2,41	2,35
Média	2,64	2,67	2,47	2,48	2,46	2,45	2,21	2,19
DP	0,24	0,25	0,26	0,25	0,40	0,37	0,21	0,22
CV (%)	8,94	9,54	10,37	9,90	16,35	14,93	9,35	9,94

A Figura 46 demonstra o gráfico de correlação gerada pelo *Software R* entre o módulo de elasticidade dinâmico e módulo de elasticidade estático.

Figura 46 – Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e estático.



Fonte: Própria autoria.

O valor obtido para o coeficiente de determinação R^2 foi de 0,97 para a correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático, apresentando uma boa correlação entre os métodos, e como se esperava sendo superior aos estudos realizados para madeira maciça, pois comportamento homogêneo do aglomerado influenciou na propagação do som.

Lima Jr. *et al.* (2018) utilizaram a Técnica de Excitação por Impulso para a caracterização mecânica não destrutiva da madeira de *Eucalyptus grandis* de 10 anos de idade. O coeficiente de determinação encontrado pelos autores foi de 0,85. Pode-se observar uma grande diferença positiva para o trabalho aqui apresentado, esta diferença se deve ao tipo de produto, pois nos painéis de partículas a propagação sonora e as frequências de vibrações ocorrem de maneira mais homogênea em toda a peça, tornando a estimativa do módulo de elasticidade mais próximo ao valor estático.

4.4 Quantidade de casca gerada por mês

Por meio dos valores de produção mensal em metros cúbicos da empresa, aproveitamento, diâmetro médio das toras e comprimento médio das toras, foi possível determinar o total de casca gerada mensalmente. Abaixo segue os dados fornecidos pela empresa e os cálculos realizados para determinar este valor.

- Produção mensal = 1336 m³;
- Aproveitamento = 41%;
- Diâmetro médio das toras = 0,33m;
- Comprimento médio das toras = 3m;

$$\text{Volume da tora} = \pi r^2 \times L = \pi \left(\frac{0,33}{2}\right)^2 \times 3 = 0,26\text{m}^3$$

Calculo do total de toras:

$$41\% \text{ ----- } 1336\text{m}^3/\text{mês}$$

$$100\% \text{ ----- } x$$

$$x = 3259,7 \text{ m}^3/\text{mês}$$

$$\text{Total de toras} = \frac{3259,7}{0,26} = 12537 \text{ toras/mês.}$$

Segundo Oliveira *et al.* (1999) a porcentagem de casca média presente na espécie *Eucalyptus grandis* é equivalente à 10,82%. Com esse valor podemos calcular a quantidade em metros cúbicos de casca presente na tora, e o total de casca gerado mensalmente pela empresa.

$$\text{Total de casca por tora} = 0,26\text{m}^3 \times 0,1082 = 0,028\text{m}^3/\text{tora.}$$

$$\text{Total de casca mensal} = 0,1082 \times 3259,7\text{m}^3 = 352,7 \text{ m}^3/\text{mês.}$$

Pode-se concluir que a quantidade de casca gerada pela empresa é de aproximadamente 25% do total de madeira serrada mensalmente. Esta porcentagem demonstra uma grande quantidade de resíduo de casca gerado na produção, evidenciando a importância de pesquisas com este material.

5. CONCLUSÕES

- Por meio dos dados obtidos para módulo de elasticidade na flexão estática, realizado em Itapeva, nos quatro traços estudados, conclui-se que a variação de porcentagem de casca de 0 à 15%, não afetaram na rigidez dos painéis.
- Por meio dos dados obtidos para módulo de elasticidade na flexão estática, realizado em Bauru, nos quatro traços estudados, conclui-se que a variação de porcentagem de casca de 0 à 15%, não afetaram na rigidez dos painéis.
- Com os dados obtidos para módulo de elasticidade por meio da TEI, realizado Itapeva, nos quatro traços estudados, conclui-se que a variação de porcentagem de casca de 0 à 15%, não afetaram na rigidez dos painéis.
- Os dados obtidos para resistência à tração superficial e força máxima resistente ao arranchamento de parafuso de topo e face, para os quatro traços estudados, não apresentaram diferenças estatísticas com a variação de casca de 0 a 15%.
- Os dados obtidos para as propriedades físicas estudadas para os quatro traços, com variação de 0 a 15% de casca, apresentaram diferenças estatísticas, demonstrando que os painéis fabricados com mais de 10% de casca decresceram a qualidade física dos painéis.
- Com os valores encontrados para módulo de elasticidade dinâmico e estático, e por meio de uma análise de regressão, encontrou-se o coeficiente de diferenciação $R^2 = 0,97$, sendo superior aos estudos realizados para madeira maciça, demonstrando que o ótimo comportamento homogêneo do material proporcionou pouca variação nas frequências de ressonância.
- Os painéis produzidos com adição de casca não apresentaram diferenças significativas nas propriedades mecânicas, e podem ser uma boa alternativa para o aproveitamento dos resíduos de forma sustentável, contribuindo com o meio ambiente e para o lucro das empresas.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

- Realizar estudos de usinagem do painel, incluindo durabilidade das ferramentas de corte e lixamento.
- Desenvolver novos painéis com diferentes porcentagens de casca, com diferentes espécies e adesivos.
- Desenvolver nova técnica ou método de estudo das frequências de vibração, buscando maior praticidade e eficácia.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14810-2: Chapas de madeira aglomerada: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013b.
- American Society for Testing and Materials. ASTM E 1876/01-76. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. United States, 1976.
- Astari, L.; Prasetyo, K. W.; Suryanegara, L. (2018). Properties of Particleboard Made from Wood Waste with Various Size. **Earth and Environmental Science**. Bogor, Indonesia. v. 166, DOI: 10.1088/1755-1315/166/1/012004.
- Atoyebi, O. D.; Awolusi, T. F.; Davies, I. E. E. (2018). Artificial neural network evaluation of cement-bonded particle board produced from red iron wood (*Lophira alata*) sawdust and palm kernel shell residues. **Case Studies in Construction Materials**. Omu-Aran, Nigeria.
- Ballarin, A. W., and Palma, H. A. L. (2009). "Avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento com uso do método não destrutivo de vibração transversal," **Revista Madeira Arquitetura e Engenharia** 10(25), 5-14.
- Bodig, J., and Jayne, B. A. (1982). Mechanics of Wood and Wood Composites, **Van Nostrand Reinhold**, New York, NY.
- Bodig, J. (2001). "The process of NDE research for wood and wood composites," in: 12th. International Symposium on Nondestructive Testing of Wood 6(3), 13-15 September, Sopron, Hungary.
- Brand, M. A. et al. Avaliação do processo produtivo de uma indústria de painéis por meio do balanço de material e do rendimento da matéria-prima. **Revista Árvore**, v.28, n.4, p.553-562, 2004.
- Bucur, V. (2006). "Acoustic methods as a nondestructive tool for wood quality assessment," in: **Acoustics of Wood**, T. E. Timell and R. Wimmer (eds.), Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 217-239. DOI: 10.1007/3-540-30594-7_8
- Campos, I. C.; Ferreira, B. S.; Barbosa, J. C.; Morales, E. A. M.; Christoforo, A. L.; Lahr, F. A. R. (2014). Particleboard Manufactured with Additions of Eucalyptus Bark in

Different Percentages in the Internal Layer. **Advanced Materials Research**, Suíça, vol. 1025-1026, pp. 3-6.

Carrasco, E. V. M.; Vargas, C. B.; Souza, M. F.; Mantilla, J. N. R. (2017). Avaliação das características mecânicas da madeira por meio de excitação por impulso. **Revista Materia**, Belo Horizonte-MG, v. 22.

Cheng, F. C., and Hu, Y. C. (2011). "Reliability analysis of timber structure design of poplar lumber with nondestructive testing methods," **BioResources** 6(3), 3188-3198. DOI: 10.15376/biores.6.3.3188-3198

Eshun, J. F.; Potting, J.; Leemans, R. Wood waste minimization in the timber sector of Ghana: a systems approach to reduce environmental impact. **Cleaner Production**, Wageningen-Netherlands, vol. 26, p. 67-78, 2012.

Fontes, P. J. P. **Auto-Suficiência Energética em Serraria de *Pinus* e Aproveitamento dos Resíduos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1994.

Hansen, H. (2006). Acoustic Studies on Wood, Master's Thesis, University of Canterbury, New Zealand.

Hodoušek, M., Dias, A. M. P. G., Martins, C., Marques, A. F. S., and Böhm, M. (2017). "Comparison of Non-Destructive Methods Based on Natural Frequency for Determining the Modulus of Elasticity of *Cupressus lusitanica* and *Populus x canadenses*," **BioResources** 12(1), 270-282. DOI: 10.15376/biores.12.1.270-282

Iwakiri, S. et al. Painéis de Madeira Reconstituída. 1ª ed. Curitiba-PR: **Ajir Gráfica e Editora Ltda**. 217p, 2005.

Iwakiri, S. et al. Mistura de espécies na produção de chapas de partículas estruturais "waferboard". **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v.14, n.1-2, p.107-114, 1995.

Kojima, Y. et al. Evaluation the durability performance of wood-based panels by a non-destructive bending test. **Journal of Wood Science**, Japão, vol. 62, p. 263-269, 2016.

Lima Jr, M. P; Biazzon, J. C.; Araujo, V. A.; Munis, R. A.; Martins, J. C.; Cortez-Barbosa, J.; Gava, M.; Valarelli, I. D.; Morales, E. A. M. (2018). Mechanical Properties

Evaluation of *Eucalyptus grandis* Wood at Three Different Heights by Impulse Excitation Technique (IET). **BioResources**. Bauru-SP, v. 13, p. 3377-3385.

Mao, P. et al. *Pinus massoniana* bark extract inhibits migration of the lung cancer A549 cell line. **Oncology Letters**, Liaoning-China, vol. 13, p. 1019-1023, 2017.

Moraes, C. A. P. (2012). Determinação do módulo de elasticidade dinâmico em concretos via técnica de excitação por impulso, Master's Thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil.

Moubarik, A. et al. Evaluation of mechanical and physical properties of industrial particleboard bonded with corn flour-urea formaldehyde adhesive. **Composites**, Marrocos, vol. 44, p. 44-51, 2013.

Nasser, R. A., et al Use of tree pruning wastes for manufacturing of wood reinforced cement composites. **Cement & Concrete Composites**, Alexandria-Egito, Editora Elsevier, vol. 72, p.246-256, 2016.

Nemli, G., et al Evaluation of the mechanical, physical properties and decay resistance of particleboard made from particles impregnated with *Pinus brutia* bark extractives. **Bioresource Technology**, Trabzan-Turquia, Editora Elsevier, vol. 97, p. 2059-2064, 2006.

Omar, N. N.; Mustafa, I. S.; Hashim, R. Fabrication of *Rhizophora* Particleboard bonded with *Rhizophora*-based Phenol Formaldehyde Resin as a Potential Phantom Material. **Journal of Physical Science**, Malaysia, vol. 28, p.111-128, 2017.

Pedieu, R.; Riedl, B.; Pichette, A. Measurement of wood and bark particles acidity and their impact on the curing of urea formaldehyde resin during the hot pressing of mixed panels. **Holz als Roh – und Werkstoff**, Heidelberg-Alemanha, vol. 66, p. 113-117, 2008.

Pedieu, R.; Riedl, B.; Pichette, A. Properties of mixed particleboards based on White birch (*Betula papyfera*) inner bark particles and reinforced with wood fibres. **European Journal of Wood and Wood Products**, Québec-Canada, vol. 67, p. 95-101, 2009.

Pizzol, V. D.; Mantilla, J. N. R.; Carrasco, E. V. M. (2017). Caracterização elástica de compensados de madeira utilizados e reutilizados em fôrmas através de excitação por impulso. **Revista Materia**, Belo Horizonte – MG, v. 22.

Qin, J.; Liu, X.; Abeele, K. V. D.; Cui, G. (2018) The study of wood knots using acoustic nondestructive testing methods. **Ultrasonics**. Nanjing-China, vol. 88, p. 43-50.

Riggio, M., Anthony, R. W., Augelli, F., Kasal, B., Lechner, T., Muller, W., and Tannert, T. (2014). "In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques," *Materials and Structures* 47(5), 749-766. DOI: 10.1617/s11527-013-0093-6.

Ross, R. J., Brashwa, B. K., and Pellerin, R. F. (1998). "Nondestructive evaluation of wood," **Forest Products Journal** 48(1), 14-19; DOI:

Segundinho, P. G. A., Cossolino, L. C., Pereira, A. H. A., and Calil, C. J. (2012). "Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do modulo de elasticidade de peças estruturais de madeira," **Revista Árvore** 36(6), 1155-1161. DOI: 10.1590/S0100-67622012000600016

Seifert, K. Beiträge zur Analyse von holzhaltigen Werkstoffen—Zweite Mitteilung: Die Bestimmung von Phenolharzen in Holzfaser-und Holzspanplatten. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Dresden-Alemanha, vol. 16, p. 335-340, 1958.

Shulga, G. et al. Short Fibre Filler from Wood Residue for Polymeric Composite Materials. **Materials Science**, Riga – Latvia, vol. 22, p. 370-375, 2016.

Sommerhuber, P. F.; Wang, T.; Krause, A. (2016) Wood-plastic composites as potential applications of recycled plastics of eletronic waste and recycled particleboard. **Cleaner Production**, Hamburg-Alemanha, vol.121, p. 176-185.

Song, W.; Zhong, Y.; Xiang, J. (2017) Mechanical parameters identification for lamitated composites based on the impulse excitation technique. **Composite Structures**, Wenzhou-China, vol.162, p. 255-260.

Souza, A. M.; Nascimento, M. F.; Almeida, D. H.; Silva, D. A. L.; Almeida, T. H., Christoforo, A. L.; Lahr, F. A. R. Wood-based composite made of wood waste and epoxy based ink-waste as adhesive: A cleaner production alternative. **Journal of Cleaner Production**. São Carlos-SP, v. 193, p. 549-562.

Stangerlin, D. M. ; Gatto, D. A.; Melo, R. R. ; Calegari, L. ; Vivian, M. A. ; Castelo, P. A. R. ; Beltrame, R., Uso do ultrassom para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de peltophorum dubium . **Revista Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 01, n. 02, p. 44-53, Novembro de 2010.

Telles, J. S. **Resíduos madeireiros da indústria ervateira para produção de painéis MDP**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 142. 2016.

Tomaselli, I.; Delespinasse, B. A Indústria de painéis do Brasil. A tendência de mudança no perfil da produção brasileira. **STCP Informativo**, n.1, p.17-20, 1997.

Trianoski, R.; Iwakiri, S.; Mator, J. L. M.; Prata, J. G. Physical and mechanical properties of particleboards of *Acrocarpus fraxinifolius* compounds with different percentages of bark. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 4, p. 761-769, 2013.

Wang, L. et al. Value-added recycling of construction waste wood into noise and thermal insulating cement-bonded particleboards. **Construction and Building Materials**, Hong Kong-China, vol. 125, p. 316-325, 2016.

Yang, P; Jenkins B.M Wood residues from sawmills in California. **Biomass & Bioenergy**, Mississippi, Editora Elsevier, vol. 32, p.101-108, 2008.

Yin, Y. F., Nagao, H., Liu, X. K., and Nakai, T. (2010). "Mechanical properties assessment of *Cunninghamia lanceolata* plantation wood with three acoustic-based nondestructive methods," **Journal of Wood Science** 56, 33-40. DOI: 10.1007/s10086-009-1067-8

Zhow, J. et al. Simultaneous measurement of elastic constants of full-size engineered wood-based panels by modal testing. **Holzforschung**, Canada, vol. 70, p. 673-682, 2016.

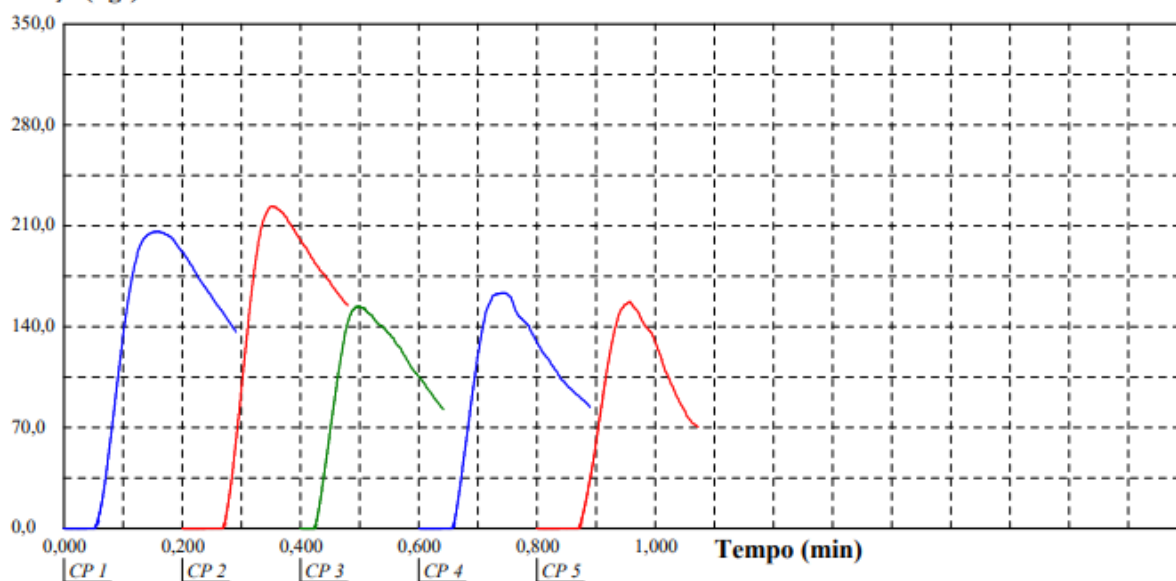
UNESP - Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Engenharia de Bauru - Laboratório de Construção Civil

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **31/01/2018** Hora: **17:26:43** Trabalho n° **3179**
Programa:Método de Ensaio: **Painel MDP Mestrado Mauri Arrancamento de Parafuso norma NBR ABNT 15316-2 2015**
Ident. Amostra: >>>>>>>> Material: **MDP** Ensaio: **Arrancamento parafuso de face S/C** Interessado: **Mestrado Mauri**

Corpo de Prova	Força Máxima (kgf)
CP 1	206,34
CP 2	223,85
CP 3	154,17
CP 4	163,63
CP 5	157,35
Número CPs	5
Média	181,1
Desv.Padrão	31,85
Coef.Var.(%)	17,59
Mínimo	154,2
Máximo	223,8

Força (kgf)



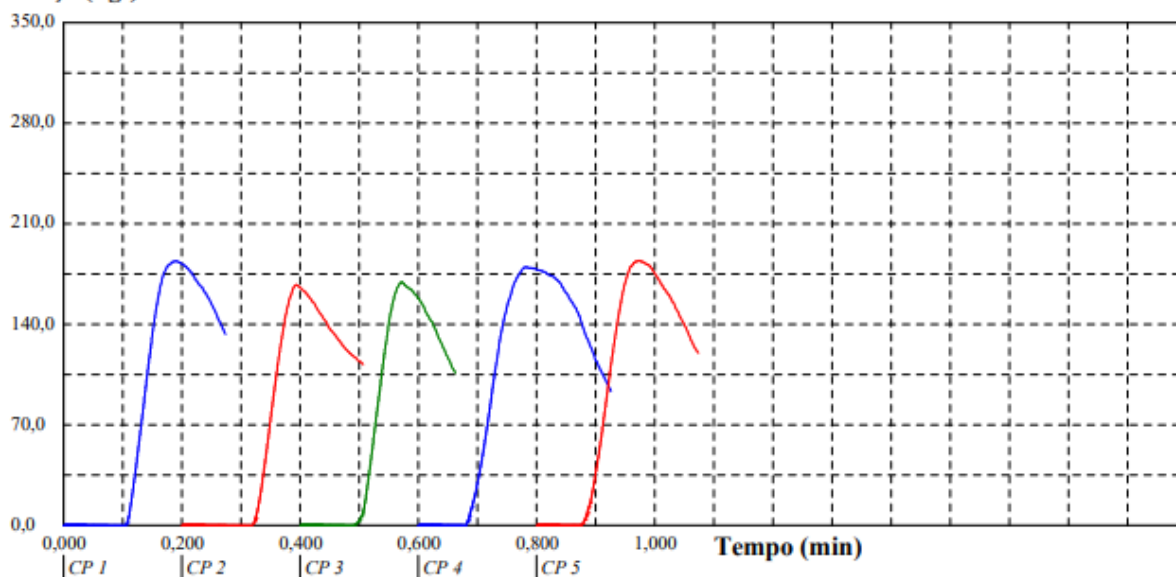
UNESP - Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Engenharia de Bauru - Laboratório de Construção Civil

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **31/01/2018** Hora: **17:32:06** Trabalho n° **3180**
Programa:Método de Ensaio: **Painel MDP Mestrado Mauri Arrancamento de Parafuso norma NBR ABNT 15316-2 2015**
Ident. Amostra: >>>>> Material: **MDP** Ensaio: **Arrancamento parafuso de face 5% casca** Interessado: **Mestrado Mauri**

Corpo de Prova	Força Máxima (kgf)
CP 1	184,10
CP 2	167,66
CP 3	169,42
CP 4	180,08
CP 5	184,39
Número CPs	5
Média	177,1
Desv.Padrão	8,050
Coef.Var.(%)	4,544
Mínimo	167,7
Máximo	184,4

Força (kgf)



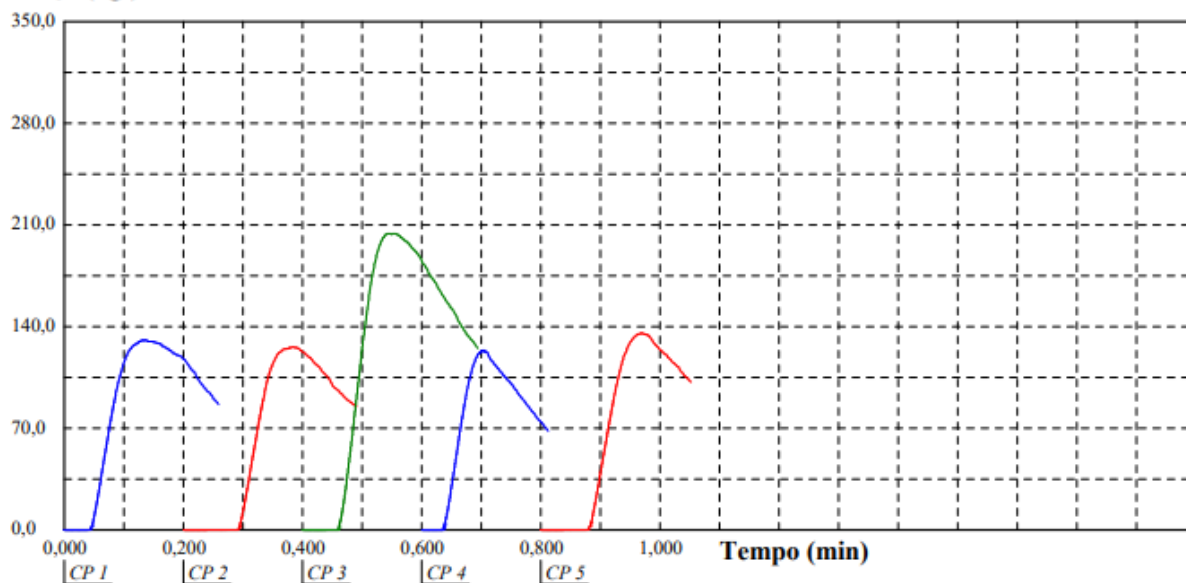
UNESP - Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Engenharia de Bauru - Laboratório de Construção Civil

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **31/01/2018** Hora: **17:36:19** Trabalho n° **3181**
Programa:Método de Ensaio: **Painel MDP Mestrado Mauri Arrancamento de Parafuso norma NBR ABNT 15316-2 2015**
Ident. Amostra: >>>> Material: **MDP** Ensaio: **Arrancamento parafuso de face 10% casca** Interessado: **Mestrado Mauri**

Corpo de Prova	Força Máxima (kgf)
CP 1	130,81
CP 2	126,08
CP 3	204,15
CP 4	123,75
CP 5	135,61
Número CPs	5
Média	144,1
Desv.Padrão	33,89
Coef.Var.(%)	23,52
Mínimo	123,7
Máximo	204,2

Força (kgf)



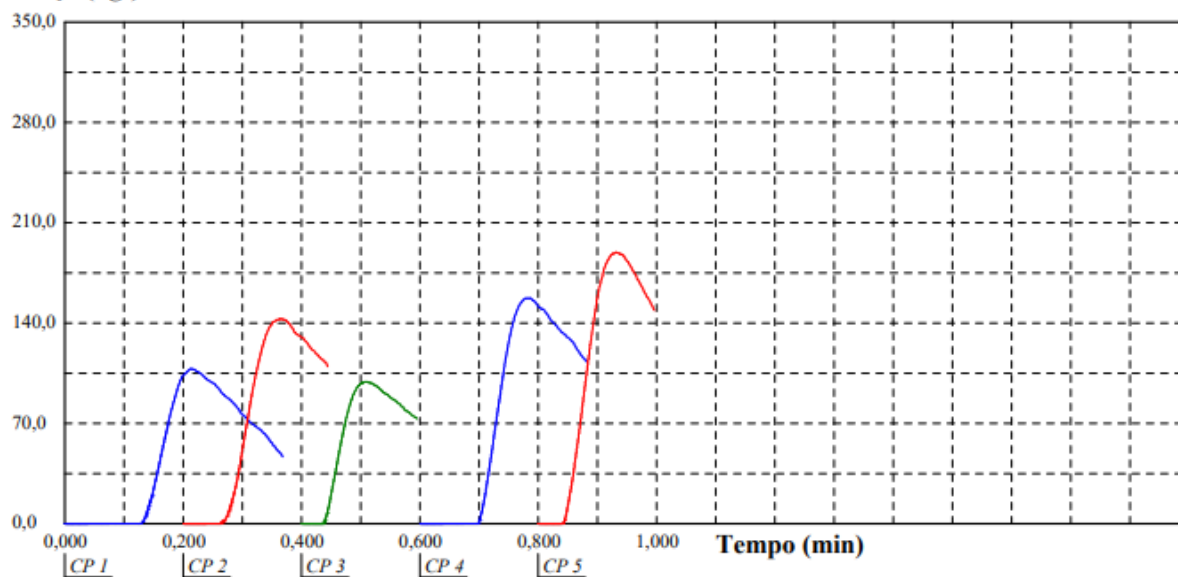
UNESP - Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Engenharia de Bauru - Laboratório de Construção Civil

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **31/01/2018** Hora: **17:40:34** Trabalho n° **3182**
Programa:Método de Ensaio: **Painel MDP Mestrado Mauri Arrancamento de Parafuso norma NBR ABNT 15316-2 2015**
Ident. Amostra: >>>> Material: **MDP** Ensaio: **Arrancamento parafuso de face 15% casca** Interessado: **Mestrado Mauri**

Corpo de Prova	Força Máxima (kgf)
CP 1	108,29
CP 2	143,09
CP 3	99,39
CP 4	157,63
CP 5	189,47
Número CPs	5
Média	139,6
Desv.Padrão	36,81
Coef.Var.(%)	26,38
Mínimo	99,39
Máximo	189,5

Força (kgf)



UNESP - Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Engenharia de Bauru - Laboratório de Construção Civil

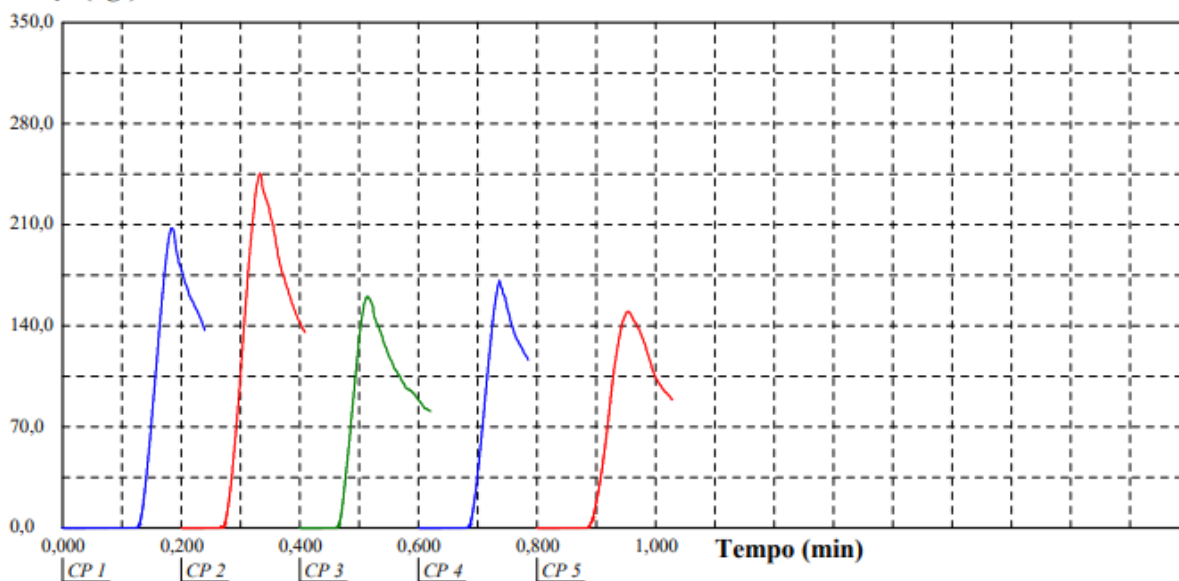
Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **31/01/2018** Hora: **17:44:11** Trabalho n° **3183**
Programa:Método de Ensaio: **Painel MDP Mestrado Mauri Arrancamento de Parafuso norma NBR ABNT 15316-2 2015**
Ident. Amostra: >>>>>>>> Material: **MDP** Ensaio: **Arrancamento parafuso de topo S/C** Interessado: **Mestrado Mauri**

Corpo de Prova	Força Máxima (kgf)
CP 1	207,68
CP 2	245,52
CP 3	160,46
CP 4	171,54
CP 5	150,08

Número CPs	5
Média	187,1
Desv.Padrão	39,24
Coef.Var.(%)	20,98
Mínimo	150,1
Máximo	245,5

Força (kgf)



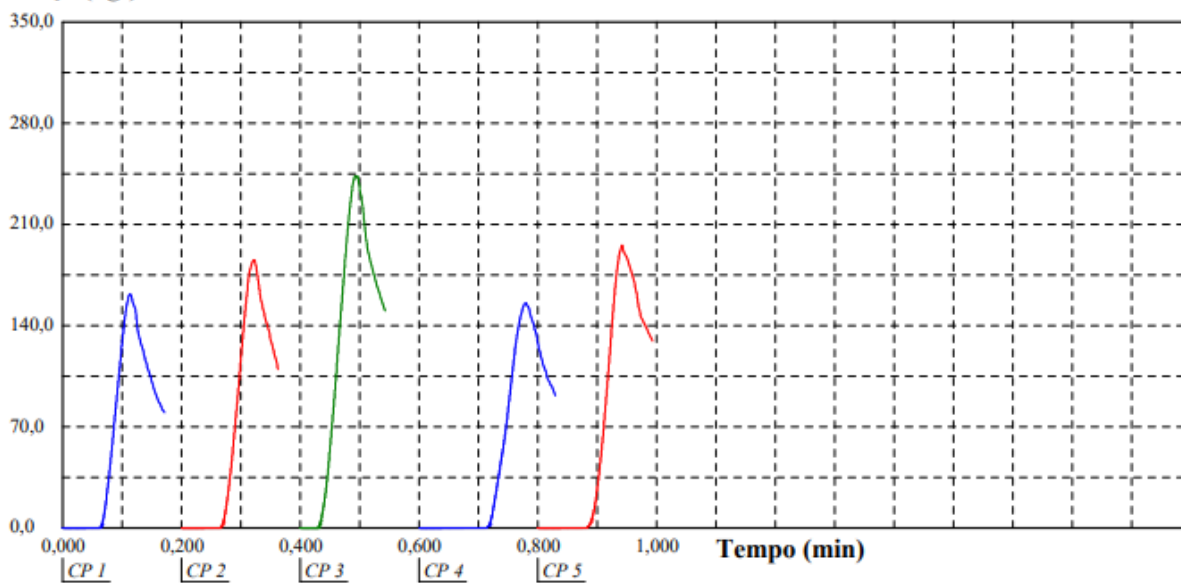
UNESP - Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Engenharia de Bauru - Laboratório de Construção Civil

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **31/01/2018** Hora: **17:48:16** Trabalho n° **3184**
Programa:Método de Ensaio: **Painel MDP Mestrado Mauri Arrancamento de Parafuso norma NBR ABNT 15316-2 2015**
Ident. Amostra: >>>>>>>> Material: **MDP** Ensaio: **Arrancamento parafuso de topo 5%** Interessado: **Mestrado Mauri**

Corpo de Prova	Força Máxima (kgf)
CP 1	161,94
CP 2	185,30
CP 3	243,68
CP 4	155,73
CP 5	195,89
Número CPs	5
Média	188,5
Desv.Padrão	34,96
Coef.Var.(%)	18,55
Mínimo	155,7
Máximo	243,7

Força (kgf)



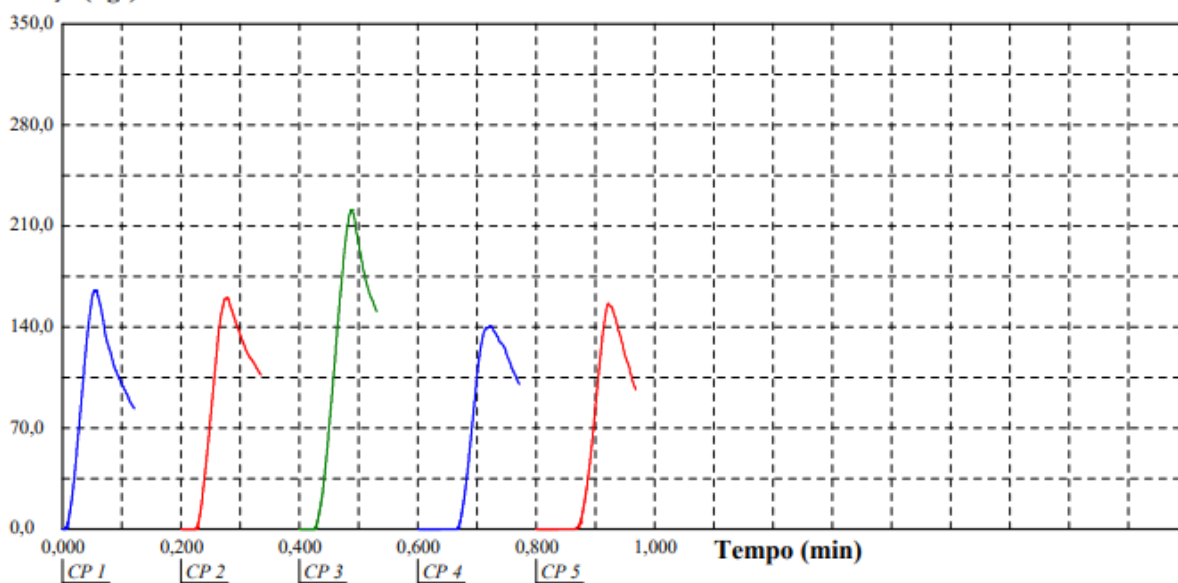
UNESP - Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Engenharia de Bauru - Laboratório de Construção Civil

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **31/01/2018** Hora: **17:51:14** Trabalho nº **3185**
Programa:Método de Ensaio: **Painel MDP Mestrado Mauri Arrancamento de Parafuso norma NBR ABNT 15316-2 2015**
Ident. Amostra: >>>>>>>> Material: **MDP** Ensaio: **Arrancamento parafuso de topo 10%** Interessado: **Mestrado Mauri**

Corpo de Prova	Força Máxima (kgf)
CP 1	165,40
CP 2	160,39
CP 3	221,45
CP 4	140,97
CP 5	156,64
Número CPs	5
Média	169,0
Desv.Padrão	30,73
Coef.Var.(%)	18,18
Mínimo	141,0
Máximo	221,4

Força (kgf)



UNESP - Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Engenharia de Bauru - Laboratório de Construção Civil

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **31/01/2018** Hora: **17:53:57** Trabalho n° **3186**
Programa:Método de Ensaio: **Painel MDP Mestrado Mauri Arrancamento de Parafuso norma NBR ABNT 15316-2 2015**
Ident. Amostra: > Material: **MDP** Ensaio: **Arrancamento parafuso de topo 15% de casca** Interessado: **Mestrado Mauri**

Corpo de Prova	Força Máxima (kgf)
CP 1	155,59
CP 2	144,86
CP 3	143,16
CP 4	121,56
CP 5	204,86
Número CPs	5
Média	154,0
Desv.Padrão	30,99
Coef.Var.(%)	20,13
Mínimo	121,6
Máximo	204,9

Força (kgf)

