

RICARDO RITTER DE SOUZA BARNASKY

**INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE UM COMPÓSITO COM MATRIZ DE
POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS
DE PAINÉIS DE FIBRAS DE MÉDIA DENSIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Bayestorff da Cunha
Coorientadora: Profª. Drª. Amanda Dantas de Oliveira

LAGES, SC

2019

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Barnasky, Ricardo Ritter de Souza
Influência da incorporação de um compósito com matriz de polietileno de alta densidade nas propriedades tecnológicas de painéis de fibras de média densidade / Ricardo Ritter de Souza Barnasky. -- 2019.
105 p.

Orientador: Alexsandro Bayestorff da Cunha
Coorientadora: Amanda Dantas de Oliveira
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2019.

1. Painéis Reconstituídos de Madeira. 2. Medium Density Fiberboard (MDF). 3. Pinus spp e PEAD. 4. Estabilidade Dimensional . 5. Resistência e Rígidez. I. Cunha, Alexsandro Bayestorff da . II. Dantas de Oliveira, Amanda. III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. IV. Titulo.

RICARDO RITTER DE SOUZA BARNASKY

**INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE UM COMPÓSITO COM MATRIZ DE
POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS
DE PAINÉIS DE FIBRAS DE MÉDIA DENSIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Banca examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Bayestorff da Cunha
Universidade do Estado de Santa Catarina

Coorientadora:

Profª. Drª. Amanda Dantas de Oliveira
Universidade Federal de Pelotas

Membros:

Profª. Drª. Karina Soares Modes
Universidade Federal de Santa Catarina

Drª. Paula Zanatta
Universidade do Estado de Santa Catarina

Lages, 18 de fevereiro de 2019

À Thaís Paz, por estar ao meu lado em todos os momentos e ser a razão deste trabalho se tornar realidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em especial, ao meu orientador, Alexsandro Bayestorff da Cunha, por todos os ensinamentos e dedicação ao longo desta etapa e por ter acreditado no sucesso deste trabalho.

À minha coorientadora, Amanda Dantas de Oliveira, pelas valiosas contribuições ao trabalho, pelo auxílio na execução do projeto e pela prontidão sempre quando solicitada.

Também agradeço aos demais docentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UDESC, que contribuíram de forma atuante na conclusão do curso de mestrado. Sobretudo, às professoras Polliana D'Angelo Rios e Martha Andreia Brand.

Aos colaboradores do Laboratório de Polímeros da UFPEL, Caio Melo, Fabio Riemke, Gabriel Scholant, Gabriela Escobar, Jonas Granada, Juliana Seixas, Mariane Bosenbecker, Mauricio de Oliveira Silva e Oscar Paniz, pela troca de conhecimentos, ensinamentos e assistência no processamento dos compósitos e conserto dos equipamentos.

Aos membros do Rotaract Club de Pelotas Oeste, Betina Suziellen, Bruna Fronza, Gabriel Feron, João Marco de Moraes, Lauren da Rosa, Monique Aguiar e Sofia Rieger, pela pronta colaboração na parte prática do trabalho, pela estadia e pelo exemplo de amizade.

Aos colegas e amigos da pós-graduação, Bruno Jan, Luana Muller, Leonardo Kuhn e Rodrigo Buss, pelas conversas, colaboração com a manufatura dos painéis, cafés e constantes ensinamentos na área florestal.

Aos estágiários e colaboradores da tecnologia da madeira, Ana Carolina Pohlmann Debora Mello, Gustavo Tomio, Isabela Capelari, Joelson Lima e Karina Karling, por todo auxílio com os painéis e pela paciência na fragmentação manual dos compósitos.

Às empresas Bonet, Braskem e Sudati, pela doação das matérias-primas fundamentais para a execução do trabalho.

Aos amigos Brendon Denegredo, Gabriel Pigatto e Gabriel Souza pela parceria de quase 3 anos.

Aos amigos do Rotaract Club de Lages, por fazerem desta cidade um lugar melhor e acolhedor.

À minha mãe, Cledinei Barnasky, por fazer o possível para me auxiliar durante toda minha formação acadêmica.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina.

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

“Que o mundo dos plásticos seja o “seu” mundo.”

Sebastião Vicente Canevarolo Junior

INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE UM COMPÓSITO COM MATRIZ DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE PAINÉIS DE FIBRAS DE MÉDIA DENSIDADE

Resumo: Os painéis de fibras de média densidade (MDF) são formados pela união de fibras lignocelulósicas, aglutinadas pela adição de adesivos e consolidadas pela ação de pressão e calor. Embora apresentem vantagens em relação à madeira sólida, como a eliminação da anisotropia, os painéis MDF possuem estabilidade dimensional comprometida quando em presença de umidade elevada. A adição de materiais hidrofóbicos surge como uma alternativa para a redução desta característica, porém, pode ter como consequência a perda de resistência mecânica e o aumento do custo de produção. Este estudo teve por objetivo determinar a influência da incorporação de polietileno de alta densidade (PEAD) na forma pura e também como matriz em um compósito de PEAD/*Pinus* spp nas propriedades tecnológicas de painéis MDF. O estudo foi dividido em 5 etapas, sendo: i) definição dos parâmetros de processamento do compósito PEAD/*Pinus* spp; ii) caracterização das propriedades térmicas do PEAD puro e do compósito por meio de análise termogravimétrica (TGA), calorimetria exploratória diferencial (DSC) e análise térmica diferencial (DTA); iii) produção de painéis MDF, em 11 tratamentos com diferentes proporções de *Pinus* spp, PEAD e compósito PEAD/*Pinus* spp, 12% de resina ureia-formaldeído e ciclo de prensagem de 180°C e pressão de 32 kgf.cm⁻² por 12 minutos; iv) determinação das propriedades tecnológicas dos painéis por meio de ensaios físicos e mecânicos, descritos na NBR 15316:2015 e v) análise morfológica dos tratamentos por microscopia eletrônica de varredura. Como resultados, foi possível fazer o processamento do compósito na proporção de 5% de fibras de *Pinus* spp e 95% de PEAD, em extrusora de rosca simples com três zonas de temperatura em 160°C/180°C/190°C e velocidade de 20 rpm. Observou-se, por meio das análises térmicas, que o PEAD e o compósito PEAD/*Pinus* spp possuem comportamentos semelhantes, sendo: estabilidade térmica até 450°C e 400°C, temperatura de fusão de 141,67°C e 138,80°C e cristalinidade de 63% e 58%, respectivamente, além de um pico de degradação aos 518°C para ambos os materiais. Os painéis produzidos apresentaram boa estabilidade dimensional, com a diminuição da absorção de água, do inchamento em espessura e da taxa de não-retorno em espessura. Tratamentos com maior porcentagem de polímero apresentaram relação positiva com as propriedades de tração perpendicular e arrancamento de parafuso, devido a uma maior taxa de resina disponível para ancoramento das fibras. Os módulos de elasticidade e ruptura foram influenciados negativamente com o aumento das cargas poliméricas. A análise morfológica demonstrou uma boa homogeneidade das fibras na matriz polimérica e ausência de falha por arrancamento. O tratamento com adição de 40% de compósito foi o que atendeu todos os requisitos da norma brasileira, sendo o mais indicado para uso como alternativa aos tradicionais painéis MDF de fibras de *Pinus* spp.

Palavras-chave: Painéis reconstituídos de madeira. *Medium Density Fiberboard* (MDF). *Pinus* spp e PEAD. Estabilidade dimensional. Resistência e rigidez.

INFLUENCE OF THE INCORPORATION OF COMPOSITE OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE MATRIX ON TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF MEDIUM DENSITY FIBERBOARDS

Abstract: The medium density fiberboards (MDF) are composed by lignocelulosic fibers, agglutined by the addition of adhesives and consolidated by pressure and heat. Although MDF have advantages when compared to solid wood, such as the suppression of the anisotropy, they present compromised dimensional stability in the presence of moisture. The addition of hydrophobic materials emerges as an alternative to reduct this characteristic. However, it may bring to a loss of mechanical resistance and an increasing of cost production. This study aimed to determinate the influence of the incorporation of high density polyethylene (HDPE) in its pure form and as matrix in a HDPE/*Pinus* spp composite on technological properties of MDF. The study was divided in 5 stages: i) definition of processing parameters the HDPE/*Pinus* spp composite; ii) characterization of thermal properties of pure HDPE and of the composite through thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC) and differential thermal analysis (DTA); iii) MDF production of 11 treatments, with different proportions of *Pinus* spp, HDPE and HDPE/*Pinus* spp composite, using 12% of urea-formaldehyde resin and pressing cycle of 32 kgf.cm⁻², and 180°C for 12 minutes; iv) determination of technological properties of the panels, according to physical and mechanical characterizations described on NBR 15316:2015 standard, and v) morphological analysis of the panels using scanning electron microscope (SEM). As a result, was possible to process the composite using a proportion of 5% of *Pinus* spp fibers and 95% of HDPE, in a single screw extruder, with temperature zones of 160°C/180°C/190°C and velocity of 20 rpm. The thermal analysis allowed to observe that the HDPE and HDPE/*Pinus* spp composite presented similar behaviors, as thermal stability until 450°C and 400°C, melting temperature of 141.67°C and 138.80°C and crystallinity of 63% and 58%, respectively and a degradation temperature peak of 518°C for both materials. The panels presented good dimensional stability, with a decreasing of water absorption, swelling thickness, and non-return thickness rate. The addition of the polymers was positively related with the properties of perpendicular tension and screw withdrawal, due to a higher rate of resin available to promote a well stablished union of fibers. The modulus of elasticity and rupture were negatively influenced by the increasing of polymer loads. SEM images showed a good homogeneity of the fibers in the polymer matrix and absence of pull out failures. The treatment with addition of 40% of HDPE/*Pinus* spp composite was the one that attended to all requirements of the compared standard, being the most suitable for use as an alternative to the traditional MDF panels of *Pinus* spp.

Keywords: Reconstituted wood panels. Medium density fiberboard (MDF). *Pinus* spp and HDPE. Dimensional stability. Resistance and stiffness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Distribuição geográfica brasileira das principais unidades produtoras de painéis reconstituídos de madeira.....	30
Figura 2 -	Unidade estrutural de repetição química do polietileno.....	35
Figura 3 -	Matérias-primas utilizadas.....	51
Figura 4 -	Processo de obtenção do compósito:.....	52
Figura 5 -	Curvas TGA e DTG das amostras analisadas.....	56
Figura 6 -	Análise DSC para as amostras de PEAD e compósito PEAD/ <i>Pinus</i> spp.....	58
Figura 7 -	Análise DTA para as amostras de PEAD e compósito PEAD/ <i>Pinus</i> spp.....	60
Figura 8 -	Etapas do processo produtivo da produção dos painéis.....	71
Figura 9 -	<i>Layout</i> de retirada dos corpos de prova.....	72
Figura 10 -	Micrografias do tratamento Testemunha em diferentes magnificações.....	91
Figura 11 -	Tratamentos com adição do compósito PEAD/ <i>Pinus</i> spp com magnificação de 30X.....	93
Figura 12 -	Imagens do compósito PEAD/ <i>Pinus</i> spp antes da incorporação nos painéis, em diferentes magnificações.....	94
Figura 13 -	Tratamentos com adição de PEAD puro, com magnificação de 30X.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Algumas propriedades do polietileno de alta densidade.....	35
Tabela 2 -	Dados obtidos por meio da análise de calorimetria exploratória diferencial	58
Tabela 3 -	Tratamentos realizados no desenvolvimento do estudo.....	68
Tabela 4 -	Parâmetros de prensagem utilizados na produção dos painéis.....	69
Tabela 5 -	Valores médios de densidade para todos os tratamentos.....	76
Tabela 6 -	Razão de compactação para todos os tratamentos.....	78
Tabela 7 -	Valores médios de absorção de água após 2 horas e 24 horas.....	79
Tabela 8 -	Valores médios de inchamento em espessura após 2 horas e 24 horas de submersão em água.....	81
Tabela 9 -	Valores médios da taxa de não-retorno em espessura para todos os tratamentos.....	83
Tabela 10 -	Módulo de elasticidade e módulo de ruptura pelo teste de flexão estática.....	85
Tabela 11 -	Valores médios de ligação interna pelo teste de tração perpendicular para todos os tratamentos.....	87
Tabela 12 -	Valores médios de resistência ao arrancamento de parafuso em superfície e topo.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DSC	<i>Differential scaning calorimetry</i>
DTA	<i>Differential thermal analysis</i>
DTG	<i>Differential thermogravimetry</i>
EGP	<i>Edge glued panels</i>
FF	Fenol-formaldeído
HB	<i>Hardboard</i>
HDF	<i>High density fiberboard</i>
MDF	<i>Medium density fiberboard</i>
MDP	<i>Medium density particleboard</i>
MF	Melamina-formaldeído
OSB	<i>Oriented strand board</i>
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PELBD	Polietileno linear de baixa densidade
PET	Polietileno tereftalato
PEUAMPM	Polietileno de ultra alto peso molecular
PEUBD	Polietileno de ultra baixa densidade
PLA	Poli-ácido lático
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de vinila
RC	Razão de Compactação
TGA	<i>Thermogravimetric analysis</i>
TNRE	Taxa de não-retorno em espessura
UF	Ureia-formaldeído
WPC	<i>Wood-polymer composite</i>
WWF	<i>Wood waste flour</i>

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E REVISÃO DE LITERATURA.....	25
1.1	INTRODUÇÃO.....	25
1.2	OBJETIVOS.....	28
1.2.1	Objetivo Geral.....	28
1.2.2	Objetivos Específicos.....	28
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
1.3.1	Painéis de Madeira.....	29
1.3.1.1	<i>Painéis de Fibras de Média Densidade.....</i>	30
1.3.1.1.1	Fatores que Influenciam na Produção de Painéis de Fibra de Média Densidade	31
1.3.1.1.2	Materiais Não-Convencionais na Produção de Painéis de Fibra de Média Densidade.....	32
1.3.2	Polímeros.....	34
1.3.2.1	<i>Características dos Polímeros.....</i>	34
1.3.2.2	<i>Polietileno de Alta Densidade.....</i>	34
1.3.3	Compósitos.....	36
1.3.3.1	<i>Compósitos Poliméricos.....</i>	36
1.3.3.1.1	O Uso de Polímeros em Produtos do Setor de Base Florestal.....	37
1.3.3.1.2	O Polietileno de Alta Densidade no Setor de Base Florestal.....	38
	REFERÊNCIAS.....	41
2	CAPÍTULO II – ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE UM COMPÓSITO COM MATRIZ DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE E FIBRAS DE <i>Pinus spp</i>.....	49
2.1	INTRODUÇÃO.....	49
2.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	51
2.2.1	Matérias-Primas.....	51
2.2.2	Preparação do Compósito.....	51
2.2.3	Caracterização.....	53
2.2.3.1	<i>Análise Termogravimétrica.....</i>	53

SUMÁRIO

2.2.3.2	<i>Análise Termogravimétrica Derivada</i>	53
2.2.3.3	<i>Calorimetria Exploratória Diferencial</i>	53
2.2.3.4	<i>Análise Térmica Diferencial</i>	54
2.2.3.5	<i>Análise dos Dados</i>	55
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
2.3.1	TGA e DTG	56
2.3.2	DSC	58
2.3.3	DTA	60
2.4	CONCLUSÕES.....	61
	REFERÊNCIAS.....	63
3	CAPÍTULO III – PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE PAINÉIS DE FIBRAS PRODUZIDOS COM <i>Pinus</i> spp E CARGAS POLIMÉRICAS	67
3.1	INTRODUÇÃO.....	67
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	68
3.2.1	Matérias-Primas	68
3.2.2	Plano Experimental	68
3.2.3	Produção dos Painéis	70
3.2.4	Caracterização Tecnológica dos Painéis	72
3.2.4.1	<i>Razão de Compactação</i>	73
3.2.4.2	<i>Taxa de Não-Retorno em Espessura</i>	73
3.2.4.3	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura</i>	74
3.2.5	Análise Estatística	75
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	76
3.3.1	Propriedades Físicas dos Painéis	76
3.3.1.1	<i>Densidade e Razão de Compactação</i>	76
3.3.2	Estabilidade Dimensional dos Painéis	79
3.3.2.1	<i>Absorção de Água</i>	79

SUMÁRIO

3.3.2.2	<i>Inchamento em Espessura e Taxa de Não-Retorno em Espessura.....</i>	81
3.3.4	Propriedades Mecânicas.....	84
3.3.4.1	<i>Flexão Estática.....</i>	84
3.3.4.2	<i>Tração Perpendicular.....</i>	87
3.3.4.3	<i>Arrancamento de Parafuso.....</i>	89
3.3.5	Análise Morfológica.....	91
3.3.6	Comparação Entre os Resultados e a Instrução Normativa Brasileira.....	97
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
3.4.1	Conclusões.....	99
3.4.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	100
	REFERÊNCIAS.....	101

1 CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E REVISÃO DE LITERATURA

1.1 INTRODUÇÃO

Os painéis de madeira reconstituída, formados por partículas, como o MDP (*Medium Density Particleboard*) e o OSB (*Oriented Strand Board*) e fibras, como o MDF (*Medium Density Fiberboard*) e o HDF (*High Density Fiberboard*), são amplamente utilizados não somente pelo setor moveleiro como também em aplicações estruturais, de decoração e construção civil (VIDAL; HORA, 2014). A pesquisa sobre estes materiais e a sua produção foram alavancadas no período da Segunda Guerra Mundial, na Alemanha, principalmente devido à falta de matéria-prima de madeira serrada, aliado com as crescentes pesquisas em colas e resinas poliméricas, o que possibilitou a fabricação de um produto com desempenho satisfatório e de forma a aproveitar e reutilizar os fragmentos de madeira existentes (IWAKIRI et al., 2005).

Nos últimos anos, os painéis MDF representam uma grande parcela do setor brasileiro de produção de painéis de madeira reconstituída, colocando o Brasil em 8º lugar na lista dos principais produtores mundiais (IBÁ, 2016).

Estes painéis apresentam características únicas e vantajosas em relação a outros tipos de painéis, como o MDP ou mesmo à madeira sólida, pois possuem melhores condições de usinabilidade e estabilidade dimensional. Mesmo podendo atingir densidades mais elevadas que a madeira sólida, o MDF possui uma versatilidade apreciável, não possuindo risco de rachaduras, possibilitando diferentes acabamentos, não possui nós, é mais resistente às mudanças de temperatura e suas características isotrópicas permitem que não haja risco de deformação, dilatação ou contração quando em uso correto. Além disso, o MDF é mais barato que a madeira sólida e está provando ser ambientalmente viável, por ser fabricado com partes de madeira que não seriam utilizadas na indústria tradicional de madeira serrada (INDUSTRIE PANNEAUX, 2018).

Como principais matérias-primas para a produção de painéis MDF, são utilizadas fibras de *Pinus* spp ou *Eucalyptus* spp, em que entre essas, o *Pinus* spp tem papel de destaque devido a algumas vantagens, como a geração de fibras mais longas, que facilitam a usinagem do painel e seu acabamento, por demandar menores quantidades de tintas para uma camada mais homogênea. O *Pinus* spp também possui uma menor densidade, levando a um menor desgaste das ferramentas no processo produtivo, melhorando a qualidade e diminuindo custos operacionais. Esta menor densidade também garante uma melhor compactação das fibras do

painel, garantindo uma estrutura mais estável que os painéis formados por fibras de *Eucalyptus* spp. Além das fibras, também são utilizadas resina ureia-formaldeído e emulsão de parafina, para aglutinação e diminuição da higroscopicidade, respectivamente (DIAS et al., 2005; GUARARAPES, 2018).

Apesar dessas vantagens, os painéis MDF apresentam algumas limitações em relação ao seu uso, principalmente na presença de umidade, sendo então projetados para ambientes internos. Um dos fatores que leva a esta condição é o uso da resina ureia-formaldeído, que é vulnerável à água e ocasiona a perda de resistência mecânica do painel, caso entre em contato com a umidade (RAZERA, 2006a), além de um grande inchamento em espessura do painel, proveniente da grande quantidade de fibras por unidade de volume.

Para minimizar os efeitos da umidade, é justificada a adição de pequenas quantidades de parafina no processo produtivo, contudo, não há a completa impermeabilização do painel, necessitando de revestimento nas superfícies e bordas. Assim, mesmo com a adição de parafina, a resina ureia-formaldeído não apresenta uma elevada resistência à umidade. No entanto, sua utilização é altamente difundida pois esta resina apresenta boas condições de processabilidade e custo-benefício vantajoso para uso em escala industrial.

Na intenção de modificar as propriedades higroscópicas de painéis, Garcia, Cloutier e Riedl (2005) produziram painéis MDF com misturas de fibras de árvores folhosas e coníferas, adicionando um tratamento superficial com cera de polipropileno graftizado com anidro maleico, obtendo a redução do teor de absorção de água, porém com a formação de zonas aglomeradas. Painéis MDF de *Pinus* spp foram produzidos por Ayrilmis (2012) com a adição de resíduos de papel impregnados com resina melamínica, com a melhoria das propriedades de estabilidade e resistência. Hervillard, Cao e Laborie (2007) obtiveram uma melhoria da resistência à água de painéis MDF de palha de trigo unidos com aminoplásticos, porém sem atingir todos os valores mínimos para resistência mecânica. No entanto, mesmo com o desenvolvimento de alguns estudos intencionando a diminuição da higroscopicidade e aumento da estabilidade dimensional, é percebida uma relação inversa entre o aumento da hidrofobicidade e as propriedades mecânicas. Ainda assim, percebe-se que as tentativas para diminuição desta característica higroscópica é conduzida pela adição de algum material hidrofóbico.

Neste contexto, polímeros, como as poliolefinas, podem surgir como uma alternativa em minimizar este problema, por possuírem características químicas apolares (TORRES, 2007). Os polímeros são macromoléculas orgânicas, compostas por unidades de repetição e unidas por ligações químicas covalentes (CANEVAROLO JUNIOR, 2010). Entre a classe dos

materiais poliméricos, existem alguns grupos, com o plástico como grupo mais conhecido e com diferentes tipos de polímeros e aplicações, sendo estes materiais oriundos principalmente do processo de craqueamento do petróleo.

O polietileno é considerado o polímero mais utilizado no mundo, compondo 32% da produção mundial de plástico (FÁBIO, 2017). Devido à sua imensa disponibilidade e baixo custo em relação a outros polímeros, o polietileno acaba sendo descartado de forma muito rápida, pois a maioria dos produtos obtidos com este polímero possui tempo de vida útil muito curto. Estima-se que 12% dos aterros sanitários, somente nos Estados Unidos, são de materiais plásticos (TECHDUTO, 2018). Em razão disso, a busca por outras formas de utilização do plástico é necessária, tanto para permitir uma maior reciclagem desses polímeros quanto para viabilizar a incorporação do plástico em outras utilizações.

Estudos sobre a incorporação de PEAD em painéis de madeira estão em expansão. Como exemplo, pode-se citar o trabalho de Ozdemir e Mengeloglu (2008), no qual os autores adicionaram polietileno reciclado em painéis compósitos, e observaram que houve uma diminuição da absorção de água e melhoria na suavidade da superfície dos painéis, porém, os autores não realizaram uma avaliação completa das propriedades mecânicas. Estudos sobre a utilização de outros plásticos, como o polipropileno, também têm sido realizados. Ghanbari, Madhoushi e Ashori (2013), analisaram a influência da variabilidade das fibras, tamanho e método de processamento utilizado na obtenção destes materiais. No entanto, o que tem se observado nestes trabalhos é que a adição de polímeros aos materiais lignocelulósicos, como as fibras de madeira, pode levar à uma baixa resistência mecânica do produto final, pois não há uma interação química efetiva entre as fibras de madeira e o polímero.

Algumas técnicas podem ser adotadas para melhorar esta interação entre o polímero e a madeira. A adição de agentes de acoplamento, que são elementos que possuem interação tanto com a madeira quanto com o polímero, é uma metodologia com resultados promissores (HILLIG et al., 2008), porém necessita de etapas adicionais de processamento e aumento de custo. Assim, ainda existe uma carência de análises sobre o efeito da incorporação de polímeros em painéis de MDF.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência da incorporação de polietileno de alta densidade na forma pura e como matriz em um compósito PEAD/*Pinus* spp em painéis de fibras de média densidade, com o intuito de melhorar a estabilidade dimensional dos painéis, sem prejudicar as propriedades de resistência mecânica e rigidez.

1.2.2 Objetivos Específicos

Obter um material compósito de PEAD/*Pinus* spp por meio do processo de mistura no estado fundido, utilizando para isto uma extrusora de rosca simples;

Caracterizar a matriz polimérica de PEAD e o compósito PEAD/*Pinus* spp por meio de análises térmicas;

Avaliar os painéis por meio de microscopia eletrônica de varredura.

Determinar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis formados por *Pinus* spp, PEAD e pelo compósito PEAD/*Pinus* spp;

Comparar os resultados obtidos com parâmetros estabelecidos pela norma de qualidade para painéis;

Determinar a melhor composição dentre os tratamentos realizados;

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.3.1 Painéis De Madeira

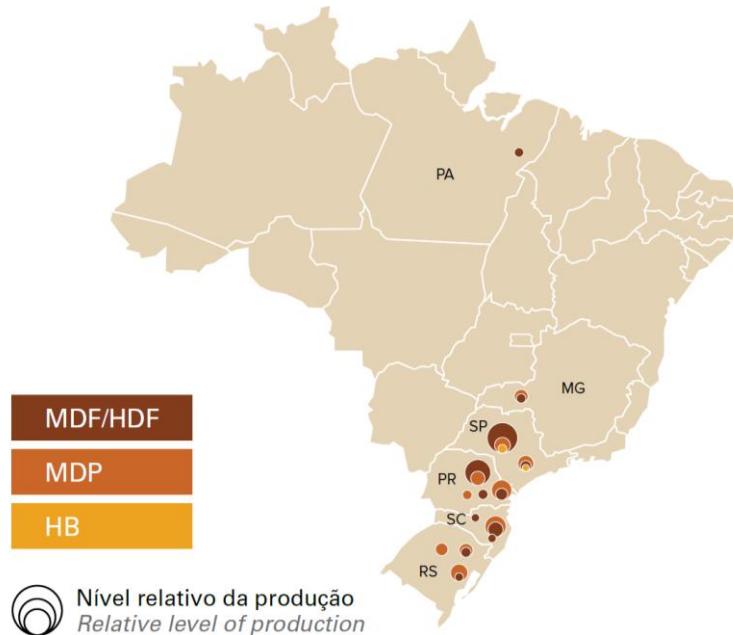
Os painéis de madeira são todos os produtos fabricados a partir da madeira em formato de lâminas ou em diferentes tipos de fragmentações, como partículas ou fibras, e unidos com o uso de resinas e da aplicação externa de temperatura e pressão, de forma produzir um material substituto a madeira maciça em seus diversos usos (MATTOS; GONÇALVES; CHAGAS, 2008).

Os painéis de madeira podem ser divididos em dois tipos: os painéis de madeira reconstituída e os painéis de madeira processada mecanicamente (BIAZUS; HORA; LEITE, 2010). Assim, os painéis processados mecanicamente são aqueles manufaturados a partir de lâminas ou sarrafos de madeira, sendo mais caracterizados pelos painéis compensados (BIAZUS; HORA; LEITE, 2010), que compõe uma produção anual de aproximadamente 2,7M de m³ (IBÁ, 2017) e pelos painéis do tipo EGP (*edge glued panels*), que são painéis colados lateralmente (VIDAL; HORA, 2014).

Dentre os painéis reconstituídos de madeira, destacam-se os painéis aglomerados de partículas e os painéis de fibras. Estes produtos constituem uma importante fatia do mercado brasileiro, com uma produção de 7,3M de m³, somente no ano de 2016, atendendo a demanda do mercado doméstico e colocando o Brasil entre os principais produtores mundiais de painéis de madeira (IBÁ, 2016). Mesmo com a retração do mercado, devido à diminuição do consumo, o país ainda ocupa o 8º lugar no ranking mundial de produtores (IBÁ, 2017).

Cerca de 86% da produção brasileira de painéis de madeira reconstituída é destinada ao mercado doméstico, com 18 unidades produtoras localizadas principalmente nas regiões Sul e Sudeste do país (Figura 1).

Figura 1 - Distribuição geográfica brasileira das principais unidades produtoras de painéis reconstituídos de madeira.



Legenda: MDF/HDF (*high density fiberboard*); MDP (*medium density fiberboard*); HB (*hardboard*). Fonte: IBÁ, 2017.

Tanto os painéis aglomerados de partículas, quanto os painéis de fibra são classificados quanto a sua densidade, que varia entre os painéis de baixa densidade, com valores menores que 600 kg.m^{-3} CEN/TS 16368 (2014), até os painéis de alta densidade, com valores que chegam à 1.100 kg.m^{-3} , como nos painéis HDF (*high density fiberboard*) ou HB (*hardboard*) (AYRILMIS, 2007).

1.3.1.1 Painéis de Fibras de Média Densidade

Os painéis de fibras de média densidade, conhecidos comumente como MDF são definidos pela norma ASTM D1554-10 (2016) como painéis compósitos, com densidade entre 500 kg.m^{-3} e 1000 kg.m^{-3} e constituídos principalmente de fibras celulósicas, na qual a principal fonte de resistência mecânica resulta da adição de um sistema de colagem, curada sob aquecimento e pressão, além da possível presença de aditivos introduzidos durante o processo de manufatura, visando melhoria de propriedades.

Iwakiri (2005) é um pouco mais restrito em sua definição para MDF, caracterizando-os como um painel produzido pela aglutinação entre fibras de madeira e resina ureia-formaldeído ou melanina-ureia-formaldeído, consolidadas pela prensagem à alta temperatura e pressão, com densidades entre 550 kg.m^{-3} e 850 kg.m^{-3} (apud TORQUATO et al., 2010). Já

a norma brasileira NBR 15316:2-2015 (ABNT, 2015) classifica como MDF aqueles painéis formados por fibras, com densidade entre 651 kg.m^{-3} e 800kg.m^{-3} .

O MDF é usado frequentemente como um substituto da madeira maciça e de outros tipos de painéis, como o compensado e aglomerado, em aplicações moveleiras, como revestimento de portas de uso interno, molduras e componentes de acabamento (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

A fabricação do MDF começou na necessidade do aproveitamento de resíduos de madeira da fabricação de papel, nos Estados Unidos, em 1914, e teve um rápido crescimento após a década de 30, sendo bem estabelecida tanto na América do Norte, quanto na Europa. Logo a produção de MDF adquiriu uma forte consolidação pois a manufatura de MDF foi uma maneira de utilizar madeiras e resíduos que não eram interessantes para a fabricação de papel e para a indústria de madeira serrada. Esse campo industrial é vantajoso em relação a outros ramos florestais, como a serraria, porque pode utilizar até 95% de suas matérias-primas, além de não estar ligado a nenhuma espécie específica, podendo ser um processo adequado para qualquer tipo de madeira (FAO, 1948).

Embora seja um setor industrial internacionalmente consolidado, a produção de painéis MDF no Brasil teve seu início somente no ano de 1997, com um consumo crescente em função da qualidade dos produtos fornecidos e diminuição da oferta de madeira sólida (MATTOS; GONÇALVES; CHAGAS, 2008).

1.3.1.1.1 Fatores que Influenciam na Produção de Painéis de Fibra de Média Densidade

As características físicas e mecânicas dos painéis MDF são influenciadas tanto pelas matérias-primas quanto pelo processo de manufatura que, além de influenciarem de maneira isolada, podem interagir (FRANÇA, 2015).

Dentre as matérias-primas, a madeira corresponde pela grande parte do volume do painel MDF. Segundo Mendes et al. (2005), a espécie utilizada é uma das variáveis mais importantes no processamento de painéis em geral, interagindo com todas as outras variáveis de manufatura. Os autores ainda exemplificam que a espécie de madeira utilizada reflete na formulação do adesivo, que pode depender do teor de extrativos e pH da madeira.

Vital (1974) ressalta que espécies de menor densidade apresentam vantagens em relação à espécies de densidade mais elevada e Eleotério (2000) explica que madeiras mais leves permitem uma maior compressão nos painéis, por possuírem maior área superficial para a mesma massa, permitindo uma maior área de contato entre as fibras.

Sobre a colagem, Maloney (1977) destaca que as resinas sintéticas foram um fator fundamental no desenvolvimento da indústria de painéis. O autor explica que os três tipos de resinas mais utilizadas para a indústria de painéis são as resinas de ureia-formaldeído (UF), fenol-formaldeído (FF) e melamina-formaldeído (MF). As resinas de ureia e melamina também são chamadas de amino-resinas e são produtos da reação de grupos amido e amino com aldeídos, sendo o mais comum deles o formaldeído. Esta reação causa a condensação do formaldeído, formando uma resina sem coloração e pronta para ser curada rapidamente com a adição de calor.

A resina de ureia-formaldeído é a mais utilizada para a produção de MDF, fato justificado pela facilidade de manufatura desta matéria-prima, proveniente da amônia, e formada por moléculas de ureia e formaldeído dispersas em um meio aquoso. Durante o processo de cura, ocorre o aumento da viscosidade da resina, seguida pela gelatinização e posterior formação de um sólido termorrígido. A temperatura de cura da resina UF é em torno de 100°C, porém, em um processo de formação de painéis, a temperatura das faces de prensagem devem ser mais elevadas, de 149°C à 188°C, para garantir o nível de cura suficiente ao interior do painel (MALONEY, 1977).

Embora a resina UF apresente certa resistência à umidade, teores muito elevados são prejudiciais às propriedades físicas e mecânicas dos painéis. Para contornar esta complicação, pequenas quantidades de emulsão de parafina são adicionadas nos painéis MDF. Esta emulsão age como retardante de absorção de água e reduz o inchamento em espessura, melhorando a estabilidade dimensional dos painéis. O aumento da quantidade de parafina não influencia proporcionalmente a estabilidade dimensional do painel, assim, uma quantidade de até 1% é considerada satisfatória (GINZEL e PERAZA, 1966 *apud* FRANÇA, 2015).

Além das matérias-primas, o processamento do painel também exerce papel essencial nas propriedades finais do produto, sendo a prensagem uma das etapas críticas (KELLY, 1977 *apud* FRANÇA, 2015). Nesta etapa, as variáveis de pressão, temperatura e tempo podem ser definidas, considerando as características dos materiais selecionados anteriormente, como densidade da matéria lignocelulósica, tipo de resina e densidade pretendida para o painel

1.3.1.1.2 Materiais Não-Convencionais na Produção de Painéis de Fibra de Média Densidade

Como há uma crescente demanda para a utilização de materiais alternativos nos produtos do setor de base florestal, o aproveitamento de resíduos também contribui para a utilização mais racional de recursos, além de auxiliar na política de gerenciamento de resíduos

das indústrias (CERQUEIRA, 2012). Melo et al. (2009) ressaltam que os painéis reconstituídos podem ser produzidos a partir de qualquer material lignocelulósico, desde que forneça a resistência e densidade necessária.

Segundo essa definição, Akgül et al. (2013) avaliaram o potencial da esponja-vegetal (*Luffa cylindrica*) na produção de MDF, em associação com fibras comerciais de *Pinus sylvestris*, *Fagus orientalis* Lipsky e *Quercus robur* L. O estudo indicou potencial de uso da esponja-vegetal como carga na produção dos painéis. Entretanto, houve uma perda expressiva de resistência da ligação interna do MDF, além de um aumento do inchamento em espessura. Alpár et al. (2010) verificaram o potencial de espécies de *Populus* spp, *Pinus nigra* e *Robinia pseudoacacia*, que apresentaram potencial para produção de MDF, porém, também houve perda expressiva da resistência de ligação interna e um grande inchamento em espessura, mesmo com a adição de 1,5% de parafina nos diferentes tratamentos estudados.

Resinas alternativas também são bastante estudadas na pesquisa de painéis de fibras, Özcan et al. (2013) estudaram o uso de resinas de acetato de polivinila e resina de poliuretano, em testes de arrancamento de cavilha de painéis MDF, com resultados satisfatórios e o adesivo de poliuretano sendo o mais promissor.

Ainda sobre, resinas alternativas, Valenzuela et al. (2012) produziram painéis de MDF com a utilização de adesivos de tanino de *Pinus radiata*, apresentando potencial para sua utilização, além de baixa emissão de formaldeído.

Em estudos relacionados à parafina, Roffael et al. (2005) concluiram que o tamanho da cadeia carbônica constituinte da molécula de parafina influencia diretamente na característica higroscópica de painéis MDF. Como a principal vantagem da adição de parafina em painéis reconstituídos de madeira é a diminuição da higroscopicidade do painel, outros estudos também investigam alternativas para a melhoria dessa característica. Entretanto, Artiaga (2014) evidencia que as fibras lignocelulósicas possuem natureza hidrofílica, sendo este fator um problema de incompatibilidade entre as fibras vegetais e compostos poliméricos, que são, em sua maioria, hidrofóbicos.

1.3.2 Polímeros

1.3.2.1 Características dos Polímeros

Os polímeros são materiais orgânicos de alta massa molecular, formadas estruturalmente pela repetição de unidades menores (meros). São macromoléculas formadas pela união de moléculas mais simples unidas por ligações covalentes (CANEVAROLO JUNIOR, 2010).

Podem ser divididos em termoplásticos e termorrígidos, dependendo da forma com a qual são ligados quimicamente e estruturalmente. Os polímeros termorrígidos, após serem formados, não podem ser modificados, pois há a formação de ligações cruzadas, em um processo chamado de “cura” (SMITH; HASHEMI, 2012), uma transformação química irreversível, tornando o polímero termorrígido infusível e insolúvel (CANEVAROLO JUNIOR, 2010).

Já os termoplásticos são definidos por Canevarolo Junior (2010) como os polímeros plásticos com capacidade de amolecer e fluir, quando submetidos ao aumento de temperatura e pressão, podendo ser solidificados em diversas formas, permitindo um ciclo de amolecimento e fluxo continuamente, sendo uma transformação física reversível. Essas características permitem aos termoplásticos serem fusíveis, solúveis e recicláveis, com diversos exemplos de produtos e aplicações.

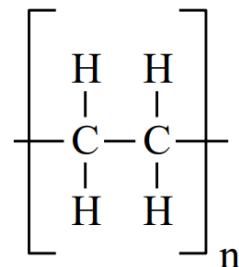
Dentre os termoplásticos típicos, os mais comuns são: polietileno tereftalato (PET), policloreto de vinila (PVC), polipropileno (PP), poliestireno (PS), polietileno de baixa densidade (PEBD) e polietileno de alta densidade (PEAD) (ALEM, 2018).

1.3.2.2 Polietileno de Alta Densidade

O polietileno de alta densidade (PEAD) é um polímero poliolefínico que faz parte da classe dos polímeros etilênicos. Além do PEAD, também fazem parte dessa categoria o polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno linear de baixa densidade (PELBD), polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) e o polietileno de ultra baixa densidade (PEUBD) (COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003). A principal característica que difere os polímeros de etileno é sua densidade, que varia de 920 kg.m^{-3} à 960 kg.m^{-3} . Para o PEAD, a densidade fica entre 950 kg.m^{-3} e 960 kg.m^{-3} (SMITH; HASHEMI, 2012). O polietileno é um termoplástico claro esbranquiçado e translúcido. Este polímero possui uma estrutura de cadeia

linear (Figura 2), formada pela polimerização do monômero etileno (SMITH; HASHEMI, 2012).

Figura 2 - Unidade estrutural de repetição química do polietileno.



Fonte: DALMOLIN, 2018.

O polietileno é o polímero mais utilizado mundialmente, devido principalmente ao seu baixo custo de produção e diversas propriedades de interesse para a indústria, como tenacidade em diferentes temperaturas, resistência mecânica, flexibilidade, propriedades de isolamento, resistência à corrosão, ser inodoro, insípido, atóxico e possuir baixa transmissão vapor-água (COUTINHO, MELLO e MARIA, 2003; SMITH e HASHEMI, 2012). Algumas propriedades do PEAD são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Algumas propriedades do polietileno de alta densidade.

Propriedade	Polietileno de Alta Densidade
Densidade (kg.m ⁻³)	950 – 960
Resistência à tração (x 1000 MPa)	20 – 37
Resistência ao impacto (J/m)	21 – 747
Resistência dielétrica (V/mm)	18.912 - 0
Temperatura máxima de uso sem carga (°C)	80 – 120
Alongamento (%)	20 – 120
Cristalinidade máxima (%)	95

Fonte: Adaptado de Smith e Hashemi (2012).

1.3.3 Compósitos

Os compósitos são produzidos quando dois ou mais materiais ou fases são unidos para resultar em uma combinação que não poderia ser obtida de outra forma. Os compósitos atuam com sinergia, apresentando propriedades de interesse superiores às dos seus constituintes (ASKELAND; PHULÉ, 2011).

Além das propriedades, a fração volumétrica dos constituintes é importante e também deve ser conhecida a extensão da conectividade entre as fases. Comumente a fase contínua é chamada de matriz e a fase incorporada é conhecida como dispersa. As fases dispersas são, usualmente, partículas ou fibras adicionadas à matriz (ASKELAND; PHULÉ, 2011).

1.3.3.1 *Compósitos Poliméricos*

Os compósitos poliméricos são aqueles materiais compósitos em que a fase matriz é formada, essencialmente, por um material polimérico. Estes tipos de compósitos são utilizados em uma grande diversidade de aplicações além de estarem nas maiores quantidades de compósitos. Das matrizes utilizadas nestes compósitos estão inclusos quase todos os polímeros comerciais termoplásticos e termorrígidos (CALLISTER, 1991).

Um dos maiores desafios no processamento de compósitos poliméricos é a boa distribuição das cargas na matriz polimérica. Além disso, deve ser obtida uma boa união entre estes constituintes, de modo com que as cargas estejam firmemente inseridas na matriz, para que ocorra uma boa distribuição das forças. No caso de compósitos poliméricos reforçados com fibras, caso essa união seja fraca, as fibras podem ser arrancadas da matriz, reduzindo a resistência mecânica e a tenacidade do compósito, sendo necessário o uso de agentes de recobrimento nas fibras, que atuam melhorando essa união (ASKELAND; PHULÉ, 2011, p. 545).

Existem três principais mecanismos de interação entre compósitos de matriz polimérica e fases de reforço. A ligação química, que ocorre quando há uma ligação química primária entre as fases, ocasiona uma ligação efetiva entre a matriz e o reforço. A interação mecânica, que ocorre quando há um entrosamento das superfícies, resultante das interações secundárias, do tipo van der Waals. Além da interação eletrostática, que depende da diferença eletrônica entre a matriz e a fase dispersa, sendo uma interação de curto alcance (MATTHEWS; RAYLINGS, 1994 *apud* RAZERA, 2006b).

1.3.3.1.1 O Uso de Polímeros em Produtos do Setor de Base Florestal

A presença de polímeros em produtos oriundos do setor de base florestal vem crescendo desde a popularização dos WPCs (*wood-plastic composites*), com a incorporação destes compósitos em produtos de construção, automotivos e mobiliários (QIANG et al., 2014). Estes compósitos madeira-plástico surgiram nos últimos 20 anos como uma opção viável para o melhor aproveitamento tanto de resíduos madeireiros, quanto para o emprego mais sustentável dos polímeros. Além dos WPCs, a utilização de farinhas de madeira já é uma realidade na indústria, que emprega compósitos de polipropileno e farinha de madeira para usos automotivos, desde a década de 70. Estes compósitos são denominados WWF (*wood waste flour*) (CORREA et al., 2003).

A falta de matéria-prima, combinada com a demanda crescente de produtos baseados em madeira, aumentou também a necessidade de recursos alternativos para substituir os produtos de madeira sólida e os WPCs desempenham um papel importante para balancear o fornecimento e a demanda de produtos de base florestal (Ghanbari, 2014). Dentre os resíduos utilizados, podem ser citadas a utilização de fibras, serragem, e farinha de madeira, que aplicados aos WPCs conferem propriedades mecânicas satisfatórias e melhoram a resistência do polímero em aplicações externas (CROITORU et al., 2017).

A farinha de madeira também pode ser empregada em PEBD (YAMAJI; BONDUELLE, 2004), além de polímeros biodegradáveis, como o poliácido láctico (PLA) (SAEED; NAWAZ; AL-TURAIF, 2018). Os WPCs também podem ser produzidos com matrizes de PET (JAVIER et al., 2015), PVC e PP (HAN et al., 2013).

Os WPCs são bastante utilizados como substitutos à madeira em locais de uso externo, onde a umidade é um fator determinante, como decks. Nessas aplicações, a madeira deve ser tratada com agentes preservantes. O arseniato de cobre cromatado foi largamente utilizado como um destes agentes de preservação da madeira, no entanto, a proibição desta substância devido à sua nocividade também alavancou a pesquisa e uso dos WPCs (YEH; KIM; GUPTA, 2012).

Os WPCs também podem ser uma alternativa para reciclar tanto polímeros, quanto resíduos madeireiros. A investigação de WPCs com diversos polímeros é de grande interesse tanto de pesquisadores quanto da indústria pois possibilita um método efetivo de reutilização de polímeros e de subprodutos agrícolas e florestais (DAI et al., 2015). Sommerhuber, Wang e Krause (2016) produziram WPCs com matrizes poliméricas de acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e poliestireno oriundos de lixo eletrônico, com a incorporação de resíduos de

painéis de partículas e obtiveram resultados semelhantes às propriedades da WPCs com a incorporação de madeira virgem de *Picea abies*.

1.3.3.1.2 O Polietileno de Alta Densidade no Setor de Base Florestal

Da mesma forma que o polietileno de alta densidade é o polímero mais utilizado mundialmente, este polímero possui também papel de destaque na formulação e estudos de compósitos de matriz polimérica e cargas lignocelulósicas. O PEAD não causa problema de liberação de gases tóxicos, facilitando seu processamento e sendo um dos principais polímeros na formulação da madeira plástica (OLIVEIRA; OLIVEIRA; COSTA, 2013).

Dai et al. (2016) utilizaram farinha de madeira como reforço de compósitos com matriz de PEAD e obtiveram resultados otimizados de resistência mecânica, propriedades reológicas e resistência à umidade.

Apesar do uso de farinha de madeira ser mais difundido nos WPCs, devido principalmente à facilidade de controle dimensional e incorporação no compósito, as fibras também possuem papel de destaque na formulação de WPCs. A introdução de fibras do caule de milho foi investigada por Khademieslam, Khatibi e Pour (2012), percebendo-se um aumento no módulo de flexão nos compósitos de acordo com o aumento do comprimento das fibras utilizadas.

A utilização de fibras de madeira em compósitos de matriz de PEAD é um recurso renovável e de baixo custo que aumenta o rendimento do polímero e modifica alguma de suas propriedades, pois o uso dessas fibras orgânicas, em relação ao uso de fibras minerais ou sintéticas, resulta em um compósito com uma densidade mais baixa, além de ser um material não abrasivo para os equipamentos de processamento (ÅKESSON et al., 2016).

Em um estudo combinando PEAD reciclado com farinha de madeira e fibra de bagaço de cana, Lei et al. (2007) demonstraram que o uso dessas cargas no PEAD diminuiu os picos de cristalinidade do composto e em uma comparação entre as propriedades dos compósitos e as propriedades do PEAD virgem, verificaram a necessidade do uso de agentes de acoplamento aos compósitos, para que haja uma certa equivalência das propriedades mecânicas dos compósitos em relação às propriedades originais do PEAD.

Serragem de *Pinus pinaster* foi utilizada na formulação de um compósito com matriz de PEAD reciclado, resultando em um WPC com melhoria nas propriedades mecânicas e diminuição da deformação plástica (HORTA; SIMÕES; MATEUS, 2017).

Outros subprodutos do setor florestal também podem ser incorporados em matrizes de PEAD, como demonstrado por Soucy et al. (2014), para o potencial do uso do lodo primário da indústria de papel na melhoria das propriedades mecânicas de WPCs.

Além disso, o estudo de Åkesson et al. (2016) demonstrou que os WPCs de PEAD também dispõem de estabilidade térmica e mecânica, mesmo após repetidos processos de reciclagem e reprocessamento, indicando a possibilidade de reaproveitamento desses compósitos.

Assim, tanto os polímeros em geral, quanto o PEAD especificamente, apresentam potencial para serem utilizados em associação aos produtos e subprodutos do setor florestal, demonstrando que há um grande campo de pesquisa e inovação do uso do PEAD.

REFERÊNCIAS

ACR - ASSOCIAÇÃO CATARINENSE DE EMPRESAS FLORESTAIS (Santa Catarina). **Anuário Estatístico de Base Florestal para o Estado de Santa Catarina 2016 (Ano Base 2015)**. Lages, 2016. 108 p. Disponível em: <http://www.acr.org.br/download/biblioteca/ACR_2016.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2018.

AKGÜL, Mehmet et al. Some Chemical Properties of Luffa and Its Suitability for Medium Density Fiberboard (MDF) Production. **Bioresources**, [s.l.], v. 8, n. 2, p.1709-1717, 2013. Disponível em: <http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_08_2_1709_Akgul_Chemical_Properties_Luffa/2002>. Acesso em: 28 ago. 2018.

ALEM. **The 5 Most Common Plastics & Their Everyday Uses**. Disponível em: <<https://www.cutplasticsheeting.co.uk/blog/uncategorized/the-5-most-common-plastics-their-everyday-uses/>>. Acesso em: 30 jul. 2018.

ALPÁR, Tibor et al. MDF/HDF Production from Plantation Wood Species. **Drvna Industrija**, [s.l.], v. 61, n. 3, p.183-191, jul. 2010. Disponível em: <<http://drvna.industrija.sumfak.hr/pdf/Drv%20Ind%20Vol%2061%203%20Alpar.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2018.

ARTIAGA, Kelly Christine Maruch. **Desenvolvimento e aplicação do compósito plásticomadeira (Poliuretano/resíduo de MDF) na indústria de base de calçados**. 2014. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014. Disponível em: <<https://www.redemat.ufop.br/arquivos/dissertacoes/2014/DesenvolvimentoAplicacao.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2018.

ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P.. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: Cengage, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15316-2:2015: Painéis de fibras de média densidade Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2015. 78 p.

ASTM. Terminology Relating to Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. **American Society For Testing And Materials**, [s.l.], p.1-4, 2016. ASTM International. <http://dx.doi.org/10.1520/d1554-10r16>.

AYRILMIS, Nadir. Effect of panel density on dimensional stability of medium and high density fiberboards. **Journal Of Materials Science**, [s.l.], v. 42, n. 20, p.8551-8557, 28 jun. 2007. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-007-1782-8>.

AYRILMIS, Nadir. Enhancement of dimensional stability and mechanical properties of light MDF by adding melamine resin impregnated paper waste. **International Journal Of Adhesion And Adhesives**, [s.l.], v. 33, p.45-49, mar. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.11.001>.

BIAZUS, André; HORA, André Barros da; LEITE, Bruno Gomes Pereira. Panorama de Mercado: painéis de madeira. In: RIO DE JANEIRO. Bndes. Bndes. **BNDES Setorial**. 32. ed. Rio de Janeiro. 2010. p. 49-90. Disponível em: <<https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1765>>. Acesso em: 04 jun. 2018.

CALLISTER, William D.. **Materials science and engineering : an introduction**. 2. ed. New York: Wiley, 1991. 791 p.

CANEVAROLO JUNIOR, Sebastião V.. **Ciência dos polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3. ed. São Paulo: Artliber, 2010. 280 p.

CEN – European Committee for Standardization. Lightweight Particleboards - Specifications. CEN/TS 16368, 2014.

CERQUEIRA, Pedro Henrique Alcântara de et al. Análise dos resíduos madeireiros gerados pelas serrarias do município de Eunápolis-BA. **Floresta e Ambiente**, [s.l.], v. 19, n. 4, p.506-510, 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.051>.

COUTINHO, Fernanda M. B.; MELLO, Ivana L.; MARIA, Luiz C. de Santa. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros**, [s.l.], v. 13, n. 1, p.01-13, jan. 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282003000100005>.

CROITORU, Catalin et al. Wood-plastic composites based on HDPE and ionic liquid additives. **Journal Of Materials Science**, [s.l.], v. 53, n. 6, p.4132-4143, 20 nov. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-017-1826-7>.

DALMOLIN, Carla. **Química de Polímeros: Estrutura Molecular de Polímeros**. Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/carlad/materiais/02_EstruturaMolecular.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2018.

DIAS, Fabricio Moura et al. Relation between the compaction rate and physical and mechanical properties of particleboards. **Materials Research**, [s.l.], v. 8, n. 3, p.329-333, set. 2005. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392005000300018>.

ELEOTÉRIO, Jackson Roberto. **Propriedade físicas e mecânica de painéis de MDF de diferentes densidade e teores de resina.** 2000. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN/TS 16368:2014:** Lightweight Particleboards - Specifications. S.l, 2014. Disponível em: <<https://www.evs.ee/preview/cen-ts-16368-2014-en.pdf>>. Acesso em: 11 mar. 2019.

FÁBIO, André Cabette. **Por que a capacidade de produção de plástico barato está aumentando.** 2017. Disponível em: <<https://www.nexojornal.com.br/expresso/2017/12/28/Por-que-a-capacidade-de-producao-de-plastico-barato-esta-aumentando>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

FAO. Food And Agriculture Organization Of The United Nations (Org.). Commodity reports. **Unasylva**, [s.l.], v. 2, n. 4, jul. 1948. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/x5345e/x5345e05.htm#fiberboards>>. Acesso em: 16 jun. 2018.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. United States Department Of Agriculture Forest Service. **Wood handbook - Wood as an engineering material.** Madison, Wi: Forest Products Laboratory, 2010. 508 p. General Technical Report FPL-GTR-190. Disponível em: <https://www.fpl.fs.fed.us/documents/fplgtr/fpl_gtr190.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2018.

FRANÇA, Morgana Cristina. **Produção de painéis aglomerados de fibras Oversized uma indústria de MDF.** 2015. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2015.

GARCIA, Rosilei A.; CLOUTIER, Alain; RIEDL, Bernard. Dimensional stability of MDF panels produced from fibres treated with maleated polypropylene wax. **Wood Science And Technology**, [s.l.], v. 39, n. 8, p.630-650, 29 set. 2005. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-005-0028-7>.

GHANBARI, Abbas; MADHOUSHI, Mehrab; ASHORI, Alireza. Wood Plastic Composite Panels: Influence of the Species, Formulation Variables and Blending Process on the Density and Withdrawal Strength of Fasteners. **Journal Of Polymers And The Environment**, [s.l.], v. 22, n. 2, p.260-266, 17 dez. 2013. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-013-0634-7>.

GINZEL, W., PERAZA, C. **Tecnología de tableros de partículas.** Madrid: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, 1966. 187 p.

GUARARAPES. **MDF de Pinus: quais são as vantagens na produção dos móveis?** 2018. Disponível em: <<http://www.guararapes.com.br/mdf/mdf-de-pinus-quais-as-vantagens-na-producao-moveleira/>>. Acesso em: 24 ago. 2018.

HERVILLARD, Thomas; CAO, Qi; LABORIE, Marie-pierre G.. IMPROVING WATER RESISTANCE OF WHEAT STRAW-BASED MEDIUM DENSITY FIBERBOARDS BONDED WITH AMINOPLASTIC AND PHENOLIC RESINS. **Bioresources Journal**, North Carolina, v. 2, n. 2, p.148-156, fev. 2007.

HILLIG, Éverton et al. Caracterização de compósitos produzidos com polietileno de alta densidade (HDPE) e serragem da indústria moveleira. **Revista Árvore**, [s.l.], v. 32, n. 2, p.299-310, abr. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622008000200013>.

HORTA, J.f.; SIMÕES, F.j.; MATEUS, A.. Study of Wood-Plastic Composites with Reused High Density Polyethylene and Wood Sawdust. **Procedia Manufacturing**, [s.l.], v. 12, p.221-229, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.08.026>.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório anual **O setor brasileiro de árvores plantadas**, Agosto, 2016. Disponível em: <http://iba.org/pt/sala-de-imprensa/releases/9-conteudo-pt/715-iba-publica-relatorio-anual-2016> Acesso em: 29 out 2017.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório anual **O setor brasileiro de árvores plantadas**, 2017. Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf Acesso em: 10 jun. 2018.

INDUSTRIE PANNEAUX. **Quels sont les avantages et inconvenients du bois MDF?** Disponível em: <<https://www.lrindustrie-panneaux.fr/faq/avantages-inconvenients-bois-mdf/>>. Acesso em: 24 ago. 2018.

IWAKIRI, Setsuo et al. Produção de painéis de madeira aglomerada de alta densificação com diferentes tipos de resina. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 68, n. 104, p.39-43, ago. 2005.

IWAKIRI, S. **Painéis de Madeira Reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247 p.

JAVIER, Cruz-salgado et al. Optimization of the Tensile and Flexural Strength of a Wood-PET Composite. **Ingeniería, Investigación y Tecnología**, [s.l.], v. 16, n. 1, p.105-112, jan. 2015. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1405-7743\(15\)72111-6](http://dx.doi.org/10.1016/s1405-7743(15)72111-6).

KHADEMIESLAM, Habibollah; KHATIBI, Reza; POUR, Arash Faraj. Investigation on Physical and Mechanical Properties of WPC from Corn stalk (Lignocellulosic Fiber) and HDPE. **Macromolecular Symposia**, [s.l.], v. 320, n. 1, p.70-74, out. 2012. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/masy.201251009>.

LEI, Yong et al. Preparation and properties of recycled HDPE/natural fiber composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s.l.], v. 38, n. 7, p.1664-1674, jul. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.02.001>.

MALONEY, Thomas M.. **Modern Particleboard & Dry-Process Fiberboard Manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman Publications, 1977.

MATTHEWS, F.L.; RAWLINGS, R. D. **Composite materials: engineering and science**. Great Britain, Chapman & Hall, 1994. 470 p.

MATTOS, René Luiz Grison; GONÇALVES, Roberta Mendes; CHAGAS, Flávia Barros das. Painéis de Madeira no Brasil: Panorama e Perspectivas. In: RIO DE JANEIRO. Bndes. Bndes. **BNDES Setorial**. 27. ed. Rio de Janeiro. 2008. Cap. 6. p. 121-156. ISSN 1414-9230. Disponível em: <<https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2526>>. Acesso em: 04 jun. 2018.

MELO, R. R. et al. Propriedades físicomecânicas de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e casca de arroz. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 449-460, 2009.

MENDES, Lourival Marin et al. Pinus spp. na produção de painéis de partículas orientadas (OSB). **Ciência Florestal**, [s.l.], v. 12, n. 2, p.135-145, 30 jun. 2005. Universidad Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/198050981688>.

OLIVEIRA, Evelyn Martins Reale de; OLIVEIRA, Emilly Martins Reale de; COSTA, Raissa Andrade. **Madeira plástica**. S.l: Instituto Euvaldo Lodi, 2013. Disponível em: <<http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/Mjc2Nzg=>>. Acesso em: 11 mar. 2019.

ÖZCAN, Cemal et al. Effect of dowels and adhesive types on withdrawal strength in particleboard and MDF. **Journal Of Adhesion Science And Technology**, [s.l.], v. 27, n. 8, p.843-854, abr. 2013. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01694243.2012.727157>.

OZDEMIR, Turgay; MENGELOGLU, Fatih. Some Properties of Composite Panels Made from Wood Flour and Recycled Polyethylene. **International Journal Of Molecular Sciences**, [s.l.], v. 9, n. 12, p.2559-2569, 10 dez. 2008. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms9122559>.

QIANG, Tao et al. Life cycle assessment on polylactide-based wood plastic composites toughened with polyhydroxyalkanoates. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 66, p.139-145, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.074>.

RAZERA, Dalton Luiz. **Estudo sobre as Interações entre as Variáveis Do Processo de Produção de Painéis Aglomerados e Produtos Moldados de Madeira**. 2006. (Dissertação). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, CURITIBA, 2006. Disponível em: <http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao/defesas/pdf_dr/2006/t199_0242-D.pdf>. Acesso em: 24 Ago. 2018.

RAZERA, Ilce Aiko Tanaka. **Fibras lignocelulósicas como agente de reforço de compósitos de matriz fenólica e lignofenólica**. 2006. 189 f. Tese (Doutorado) - Curso de Físico-química, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75131/tde.../IlceAikoTanakaRazera.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2018.

ROFFAEL, E. et al. On paraffin sizing of medium density fiberboards (MDF). Part 1: Influence of the chemical composition of paraffin and type of emulsifier on the hydrophobic properties of MDF. **Holz Als Roh- Und Werkstoff**, [s.l.], v. 63, n. 3, p.192-203, 1 abr. 2005. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-004-0556-0>.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2012. 712 p. Tradução de Necesio Gomes Costa, Ricardo Dias Martins de Carvalho e Mírian de Lourdes Noronha Motta Melo.

SOMMERHUBER, Philipp F.; WANG, Tianyi; KRAUSE, Andreas. Wood–plastic composites as potential applications of recycled plastics of electronic waste and recycled particleboard. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 121, p.176-185, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.036>.

TECHDUTO. **RECICLAGEM DO PEAD**. 2018. Disponível em: <<http://www.techduto.com.br/reciclagem-do-pead/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

TORQUATO, Luciane Paes et al. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PAINÉIS DE FIBRAS DE MÉDIA DENSIDADE (MDF) PRODUZIDOS PELAS INDÚSTRIAS BRASILEIRAS. **Floresta**, [s.l.], v. 40, n. 2, p.275-280, 30 jun. 2010. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v40i2.17823>. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/17823/11625>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

TORRES, Amelia Angélica Ulloa. **Envelhecimento físico químico de tubulações de polietileno de alta densidade empregadas em redes de distribuição de derivados de petróleo**. 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pósgraduação em Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/11035/11035_3.PDF>. Acesso em: 04 jun. 2018.

VALENZUELA, J. et al. Industrial production of pine tannin-bonded particleboard and MDF. **European Journal Of Wood And Wood Products**, [s.l.], v. 70, n. 5, p.735-740, 11 maio 2012. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-012-0610-2>.

VIDAL, André Carvalho Foster; HORA, André Barros da. Panorama de Mercado: painéis de madeira. In: RIO DE JANEIRO. Bndes. Bndes. **BNDES Setorial**. 40. ed. Rio de Janeiro. 2010. p. 323-384. Disponível em: <<https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/3023>>. Acesso em: 04 jun. 2018.

VITAL, B. R.; LEHMANN, W. F.; BOONE, R. S. How species and board densities affect properties of exotic hardwood particleboards. **Forest Products Journal**, Madison, v. 24, n. 12, p. 37-45, 1974.

YAMAJI, Fábio Minoru; BONDUELLE, Arnaud. UTILIZAÇÃO DA SERRAGEM NA PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS PLÁSTICO-MADEIRA. **Floresta**, [s.l.], v. 34, n. 1, p.59-66, 30 abr. 2004. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v34i1.2375>.

YEH, Shu-kai; KIM, Kwang-jea; GUPTA, Rakesh K.. Synergistic effect of coupling agents on polypropylene-based wood-plastic composites. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 127, n. 2, p.1047-1053, 11 maio 2012. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/app.37775>.

2 CAPÍTULO II – ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE UM COMPÓSITO COM MATRIZ DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE E FIBRAS DE *Pinus spp*

2.1 INTRODUÇÃO

O uso de materiais alternativos é uma necessidade crescente em produtos engenheirados, tanto pela disponibilidade de matéria-prima, quanto pela preservação de recursos. O setor da indústria de polímeros é um dos que demanda alternativas para reciclagem, reuso e uso de suas matérias-primas de maneira mais otimizada. Como um dos meios de aumentar o campo de produtos poliméricos, a pesquisa em compósitos surge como uma maneira altamente viável (MATSUSHIMA; SILVA; PEREIRA, 2015).

Os compósitos são formados pela combinação de duas ou mais fases distintas, resultando em um material único e com propriedades que não poderiam ser atingidas sem esta combinação, possuindo uma fase principal e uma fase dispersa. Além disso, os compósitos podem ser classificados como estruturais, reforçados por partículas e reforçados por fibras (CANEVAROLO JUNIOR, 2010).

O grupo dos compósitos poliméricos reforçados por fibras é uma realidade desde a incorporação das fibras de vidro nestes materiais (VAN VLACK, 1970). A incorporação de fibras vegetais em polímeros é um campo de pesquisa crescente, principalmente com uma necessidade maior de produtos “verdes”, alternativos às opções existentes, tais como as fibras sintéticas, que estão sendo cada vez menos utilizadas devido a questões legais, ambientais e econômicas (SILVA, 2003).

Os polímeros são uma classe versátil de materiais que podem ser classificados como termoplásticos ou termofixos, dependendo de seu arranjoamento estrutural e ligações químicas. Entre os polímeros termoplásticos, o polietileno de alta densidade é o mais utilizado no mundo, principalmente devido ao seu baixo custo e propriedades de interesse, como resistência, flexibilidade, propriedades e isolamento, hidrofobicidade e trabalhabilidade em diferentes temperaturas (SMITH; HASHEMI, 2012).

Além disso, as propriedades térmicas dos polímeros são interessantes pois a mobilidade das cadeias poliméricas influencia diretamente em outras propriedades, como as mecânicas, que irão determinar se o polímero possui um comportamento frágil, dúctil ou elastomérico, levando à uma melhor caracterização do material para aplicações específicas (CANEVAROLO JUNIOR, 2010).

Entre as propriedades térmicas dos polímeros, a temperatura de transição vítreia, temperatura de fusão cristalina, temperatura de cristalização e temperatura de degradação podem ser listadas e essas propriedades podem sofrer alterações devido à inserção de uma fase diferente de materiais.

Produtos florestais estão sendo muito utilizados em compósitos madeira-polímero, emergindo nos últimos 20 anos como uma alternativa viável para o uso de resíduos florestais e é uma aplicação sustentável para os polímeros (CORREA et al., 2003). O uso de *Pinus* spp é uma opção de reforço em compósitos poliméricos e está sendo bastante estudado atualmente (GRISON et al., 2015; DAI et al., 2016; ÅKESSON et al., 2016; ARREGI et al., 2017; HUNG et al., 2017). Entretanto, há uma necessidade de um melhor entendimento sobre a influência da adição dessas fases de reforço nas propriedades térmicas dos compósitos.

Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência da adição de fibras de *Pinus* spp nas propriedades térmicas de um compósito de matriz de polietileno de alta densidade e compará-las ao PEAD puro, com o intuito de auxiliar a estabelecer as características de processamento para a incorporação destes compósitos em painéis de fibras de média densidade.

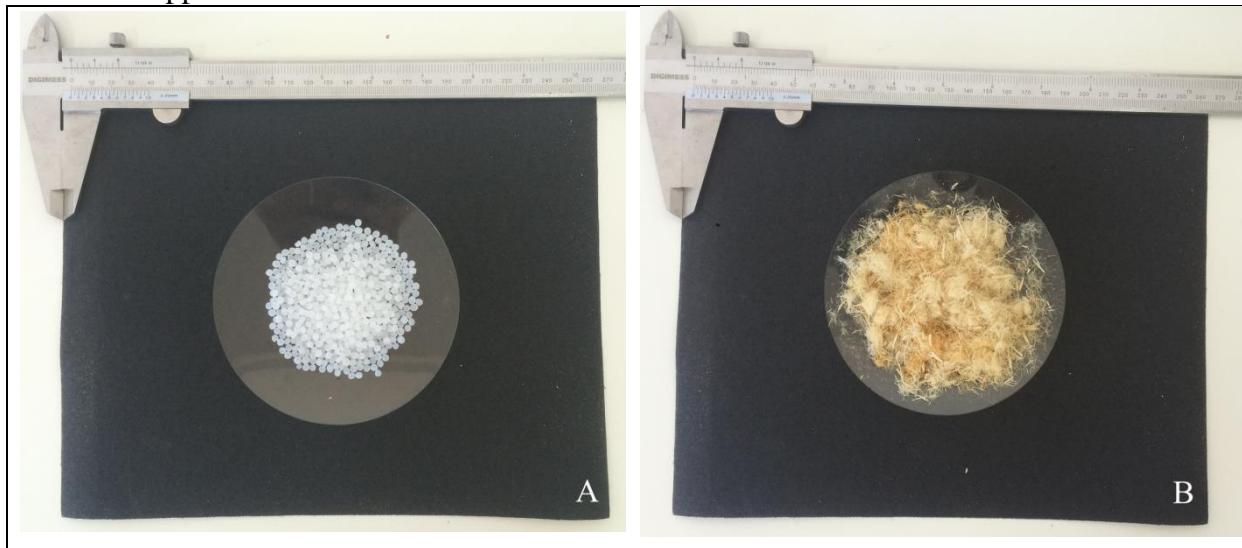
2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Matérias-Primas

O polietileno de alta densidade utilizado neste trabalho foi fornecido pela Petroquímica Braskem S/A, e é conhecido comercialmente como PEAD IG58 (Figura 3a). Segundo o fabricante, este polímero apresenta densidade de 956 kg.m^{-3} e índice de fluidez de 50g/10min.

As fibras de *Pinus spp* (Figura 3b) foram fornecidas pela empresa Sudati, unidade de Otacílio Costa, Santa Catarina. As fibras foram retiradas do processo produtivo de painéis MDF ainda úmidas e foram secas em estufa à 80°C, até atingir umidade em torno de $4 \pm 2\%$.

Figura 3 - Matérias-primas utilizadas. (a) Polietileno de alta densidade, (b) Fibras de *Pinus spp*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

2.2.2 Preparação do Compósito

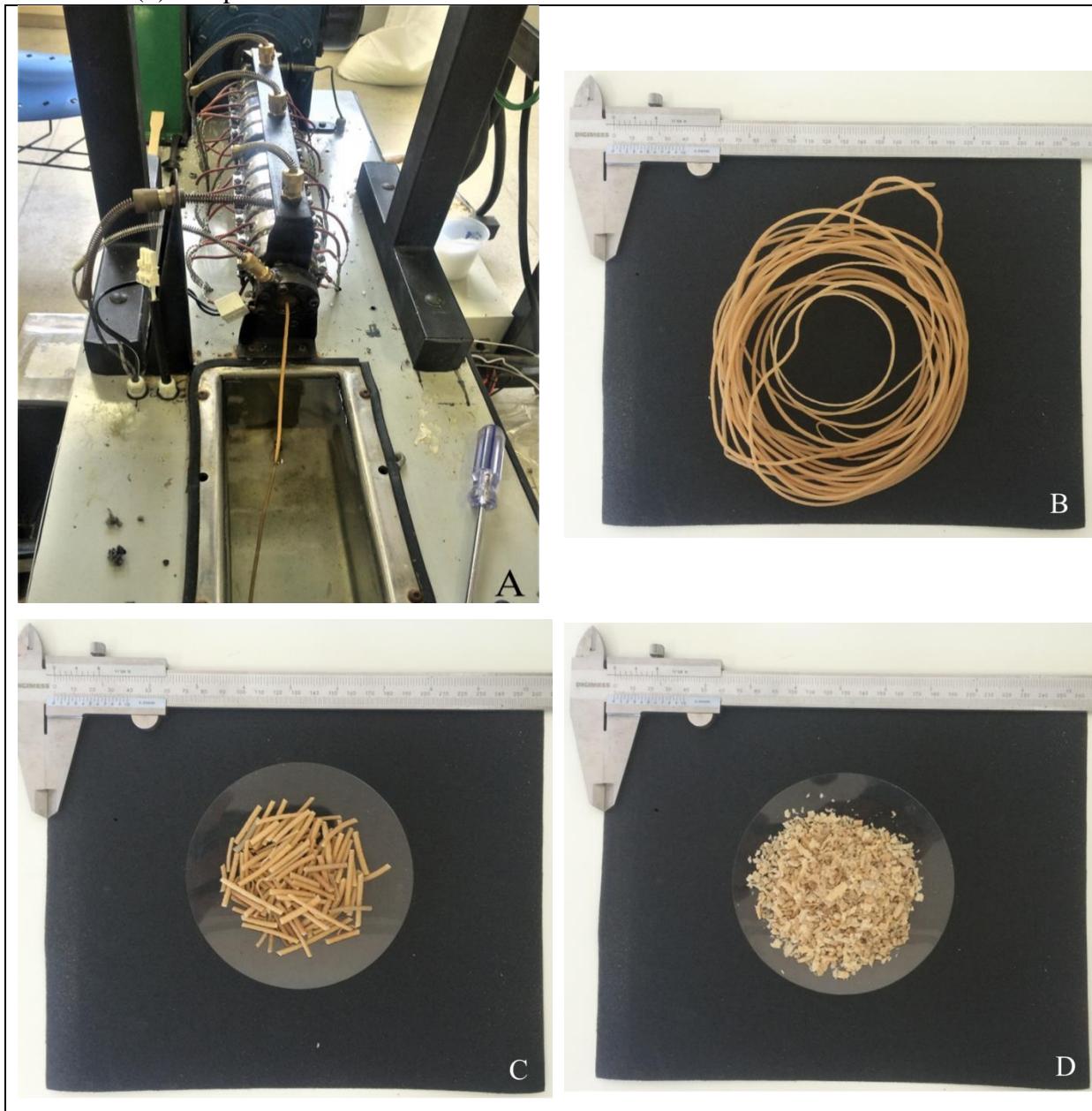
Além do PEAD puro, também foi utilizado um compósito PEAD/*Pinus spp*, o qual foi obtido por meio do processo de extrusão do polímero, com a adição de 5% em massa de fibras de *Pinus spp*. O processo de extrusão foi realizado em uma extrusora laboratorial de rosca simples, com razão $L/D = 20$, em que “L” é o comprimento e “D” é o diâmetro (Figura 4a). O perfil de temperatura utilizado nas três zonas foi 160°C/180°C/190°C e velocidade da rosca de 20 rpm. O compósito foi preparado no laboratório de materiais poliméricos localizado no curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pelotas e a definição da

proporção de fibras e polímero levou em consideração a capacidade máxima de processamento da extrusora.

Após a mistura entre o PEAD e as fibras de *Pinus spp*, os filamentos do compósito (Figura 4b) foram granulados (Figura 4c) e em seguida pulverizados, utilizando para isto um moinho de facas tipo Wiley.

O compósito foi moído (Figura 4d) de modo a possibilitar uma mistura mais homogênea entre os outros constituintes do painel.

Figura 4 - Processo de obtenção do compósito: (a) extrusora de rosca simples, (b) filamento do compósito PEAD/*Pinus spp* extrudado, (c) filamento extrudado em grânulos e (d) compósito moído.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

2.2.3 Caracterização

Tanto o compósito quanto o PEAD puro foram caracterizados pelas suas propriedades térmicas por meio de análise termogravimétrica (TGA), análise termogravimétrica derivada (DTG), calorimetria exploratória diferencial (DSC) e análise térmica diferencial (DTA).

2.2.3.1 Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica (*Thermogravimetric analysis – TGA*) é uma técnica na qual a variação de massa de uma substância é medida em função do aumento da temperatura (FÖLDVÁRI, 2011)

As análises termogravimétricas foram realizadas em amostras de PEAD puro e no compósito PEAD/Pinus. Para os ensaios de análise termogravimétrica utilizou-se um equipamento TGA 2000 - Automatic Multiple Sample Thermogravimetric Analyzer, NAVAS Instruments. Os ensaios foram feitos em atmosfera inerte de nitrogênio, com fluxo de 93,75 mL·min⁻¹. A taxa de aquecimento utilizada foi de 10°C min⁻¹, variando da temperatura ambiente até 800°C, em que ocorreu a estabilização completa da perda de massa.

2.2.3.2 Análise Termogravimétrica Derivada

Pela análise termogravimétrica diferencial (*Derivative Thermogravimetry – DTG*) é possível fazer a medida da taxa de variação da massa em relação à temperatura, ou seja, a velocidade que a amostra está perdendo massa, a medida que a temperatura aumenta (FÖLDVÁRI, 2011).

A análise de DTG é medida simultaneamente à TGA e fornece informações sobre a primeira derivada da curva térmica original da TGA. Assim, os resultados de DTG também foram obtidos com o uso do TGA 2000.

2.2.3.3 Calorimetria Exploratória Diferencial

A Calorimetria Exploratória Diferencial (*Differential Scanning Calorimetry – DSC*) é uma técnica termo-analítica, na qual o fluxo de calor é medido em função do tempo ou da temperatura (KABOORANI, 2010).

Pela análise de DSC é possível obter informações relevantes sobre as propriedades térmicas dos polímeros. As temperaturas de transição e entalpias de fusão dos materiais podem ser verificadas com auxílio da ASTM D3418-15 (ASTM, 2015).

A cristalinidade (X_c) do PEAD antes e após a mistura com *Pinus spp* foi determinada por meio da equação (1):

$$X_c = \frac{\Delta H_{exp}}{\Delta H} \times \frac{1}{W_f} \times 100\% \quad (1)$$

Em que:

ΔH_{exp} é a entalpia de fusão ou cristalização, obtida experimentalmente;

ΔH é a entalpia de fusão para o PEAD, assumida como 293 J.g^{-1} ;

W_f é a fração do peso de PEAD presente na amostra (TUFAN et al., 2016).

Esta análise foi realizada nas amostras de polietileno puro e no compósito, em um equipamento Netzscht DSC 200F3, com variação de temperatura de 20°C à 200°C e uma taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C.min}^{-1}$, em atmosfera inerte, com fluxo de 50 ml.min^{-1} de nitrogênio.

2.2.3.4 Análise Térmica Diferencial

A análise térmica diferencial (*Differential Thermal Analysis – DTA*) é a técnica na qual a diferença de temperatura entre a substância de interesse e um material de referência é medida em função da temperatura enquanto ambos os materiais são submetidos ao mesmo aquecimento. Por meio desta análise é possível identificar as transições de fase em que não há variação de massa. Comumente, a técnica de DTA é acoplada ao TGA, com o objetivo de prover maior resolução em faixas de temperatura nas quais a variação de perda de massa é mínima ou inexistente (FÖLDVÁRI, 2011).

A DTA também foi realizada em ambas amostras de polietileno puro e compósito. Para esta análise foi utilizado um equipamento Netzscht STA 449C, com fluxo de 50 ml. min^{-1} de nitrogênio e temperatura variando dos 20°C aos 200°C , com taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C.min}^{-1}$.

2.2.3.5 Análise dos Dados

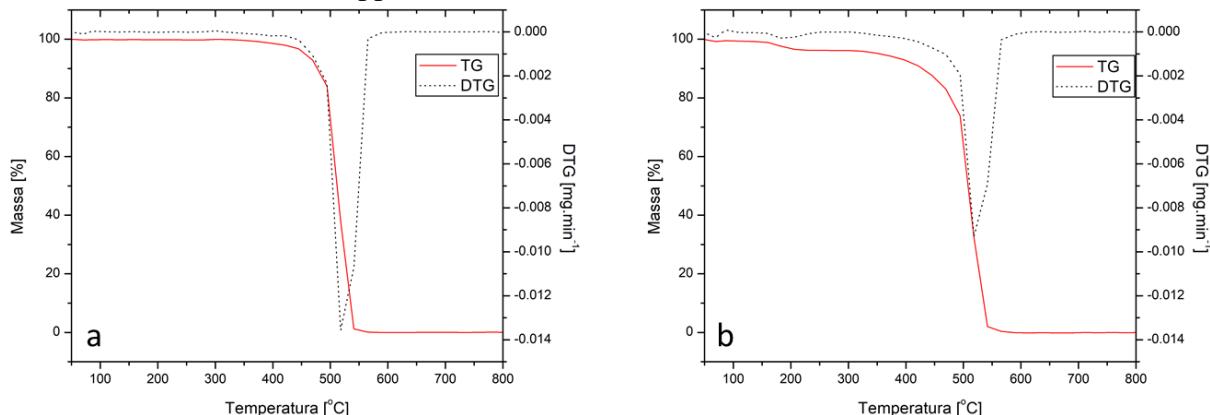
Os ensaios realizados fornecem dados numéricos sobre as propriedades de interesse em relação ao aumento da temperatura. Os dados foram utilizados para a formação de gráficos e sua interpretação foi feita de maneira descritiva dos pontos.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 TGA e DTG

Na Figura 5 estão apresentados os resultados da análise termogravimétrica (TGA) e da derivada da perda de massa (DTG) para o PEAD puro (5a) e para o compósito PEAD/*Pinus* spp (5b), na qual pode ser observado que os dois materiais apresentam comportamentos aparentemente similares, porém na Figura 5b é possível observar mais eventos de perda de massa para o material compósito.

Figura 5 - Curvas TGA e DTG das amostras analisadas: (a) PEAD, (b) compósito PEAD/*Pinus* spp.



Analizando os resultados obtidos para o polietileno puro, observa-se que este material possui uma estabilidade térmica até aproximadamente 450°C. A partir desta temperatura, é verificado um início de perda de massa, que acentua-se aos 500°C, até a completa degradação do polímero aos 540°C. A curva de DTG evidencia este comportamento, com apenas um pico de perda de massa, sendo a maior taxa de degradação observada aos 518°C. Este resultado é similar ao encontrado por Wu, Isarov e Connell (1999), com o pico do processo de decomposição do PEAD aos 498°C.

Jeske, Schirp e Cornelius (2012) comentam que a presença de umidade em compósitos de matriz polimérica e cargas de madeira é um fator que pode dispersar os resultados em ensaios termogravimétricos, com essa perda de umidade iniciando a partir dos 50°C. Para a amostra do compósito, é observada uma pequena perda de massa já aos 70°C. Entre as temperaturas de 160°C e 200°C, outro evento de perda de massa é observado. A partir dos 300°C já verifica-se um início de um terceiro patamar de degradação, que é acentuado aos

494°C e atinge sua maior taxa de perda de massa aos 518°C, conforme evidenciado pelas curvas de DTG da amostra. A perda de massa do compósito continua até os 540°C, em que atinge a degradação completa da amostra. Além disso, é observada uma diminuição na taxa de perda de massa para a amostra de compósito, demonstrado pelo DTG.

Como o compósito analisado possui os componentes de poliose, celulose e lignina, oriundos do *Pinus* spp, cada um destes constituintes possui suas faixas de decomposição características. Brand et al. (2018) distinguem a degradação térmica em três estágios principais, sendo o primeiro estágio referente à secagem, segundo estágio refere-se à pirólise ativa e o terceiro à pirólise passiva, ressaltando que esses estágios podem variar as faixas de temperatura, de acordo com a composição química do componente lignocelulósico analisado. Jeske, Schirp e Cornelius (2012) citam que há decomposição de poliose e celulose entre 150°C e 350°C, enquanto a lignina se decompõe entre 250°C e 500°C. Os autores também citam a temperatura principal de decomposição do polietileno aos 517°C, sendo estes valores de acordo com os resultados observados nas análises.

A perda de massa observada logo no início do ensaio é, então, atribuída principalmente a existência de moléculas de água adsorvida (~2%), presente nas fibras. Já aos 150°C inicia-se outro estágio de decomposição, sendo referente ao percentual de fibras, com a volatização de componentes presentes nas fibras e nos materiais lignocelulósicos em geral, conforme também relatado por Órfão e Figueiredo (2001) e Seye, Cortez e Gómez (2003), com a degradação térmica dos componentes de celulose, polioses e lignina.

O início da maior degradação, relacionado ao polietileno, permaneceu o mesmo para as duas amostras, acima dos 400°C. Ambas análises não apresentaram massa remanescente ao final do ensaio de termogravimetria.

Embora Han et al (2013) descrevam que a matriz de polietileno possa criar pontes de aquecimento, promovendo uma maior condução de calor e transferência de massa e resultando em uma maior degradação da mistura, com uma maior decomposição de hidrocarbonetos e liberação de produtos voláteis, é discutido que alguns fatores externos, como uma segunda fase em um polímero, não afetam as características das propriedades térmicas do material (CANEVAROLO JUNIOR, 2010).

Moigne et al. (2018) ressaltam o uso do TGA para destacar as modificações da estabilidade térmica de fibras naturais ou após a modificação de superfície, porém, apontam também para a existência de poucos estudos focados no entendimento do processo de degradação de biocompósitos, em relação à interface fibra/matriz, além de suas modificações.

2.3.2 DSC

A Figura 6 apresenta os resultados da análise de DSC para o PEAD puro e para o compósito PEAD/*Pinus spp.* Por meio desta análise foi possível verificar a temperatura de fusão dos materiais, além de possibilitar a determinação da entalpia de fusão experimental pela ASTM D3418-15 (ASTM, 2015) e o grau de cristalinidade do polímero com o uso da equação (1). Os dados referentes a estas amostras estão apresentados na Tabela 2.

Figura 6 – Análise DSC para as amostras de PEAD e compósito PEAD/*Pinus spp.*

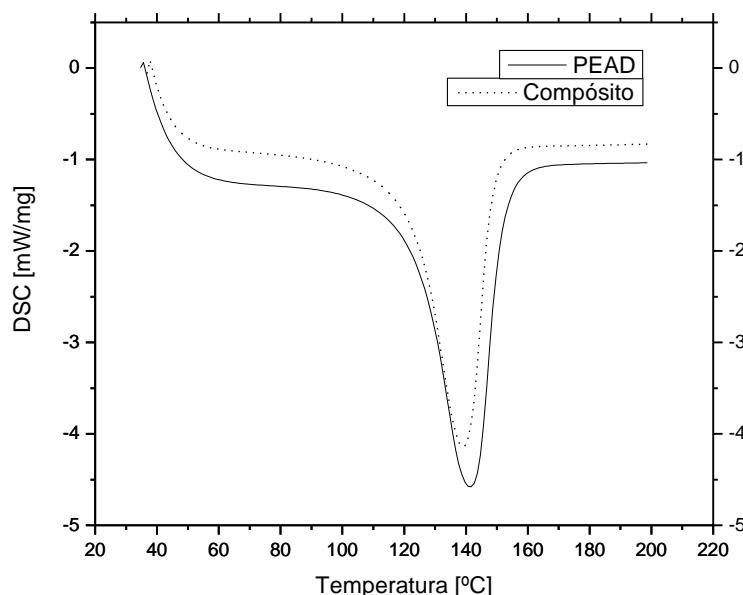


Tabela 2 – Dados obtidos por meio da análise de calorimetria exploratória diferencial.

Propriedade	PEAD	PEAD/ <i>Pinus spp</i>
T_m (°C)	141,67	138,80
ΔH_{exp} (J.g ⁻¹)	176,45	134,20
X_c (%)	63,39	48,21

Legenda: T_m = Pico da temperatura de fusão, ΔH_{exp} = Entalpia de fusão experimental, X_c = Grau de cristalinidade.

Moigne et al. (2018) indicam que a análise de DSC pode ser utilizada para estudar os efeitos das fibras na cristalização da matriz polimérica, pois possíveis modificações de superfícies e de interfaces podem influenciar dois fatores principais relacionados à cristalização polimérica em um compósito. As fibras podem causar efeitos de nucleação, influenciando a cinética de cristalização, além de poder causar um impedimento estérico, induzido pelas interações fibra/matriz, que alteram o crescimento dos cristais poliméricos e

podem, inclusive, inibir o processo de cristalização, conforme pode ser verificado nos valores de X_c , com a diminuição do grau de cristalinidade para o compósito.

Nos dados da análise DSC (Tabela 2) não é percebida uma alteração relevante no pico da temperatura de fusão (T_m). A entalpia de cristalização ΔH_c apresentou uma diminuição de valor para o compósito, em relação ao PEAD puro, além do grau de cristalinidade.

Em um estudo realizado por Tufan et al (2016), no qual foi analisado as propriedades térmicas de compósitos de PEAD com farinha de madeira de *Alnus glutinosa* L., também não observaram uma diferença significativa na T_m dos diferentes compósitos analisados. Shi et al (2012) também não observaram uma mudança no pico da temperatura de fusão de compósitos de PEAD com a adição de diferentes nanocargas de carbono. Da mesma forma que Saeed, Nawaz e Al-turaif (2018) que não verificaram uma influência direta da adição de farinha de *Pinus* spp em compósitos de PBS/PLA, que variou de 147,5°C à 153,06°C. Assim, pode-se indicar que a adição das fibras de *Pinus* spp ao polietileno de alta densidade não influenciou diretamente na temperatura de fusão do polímero.

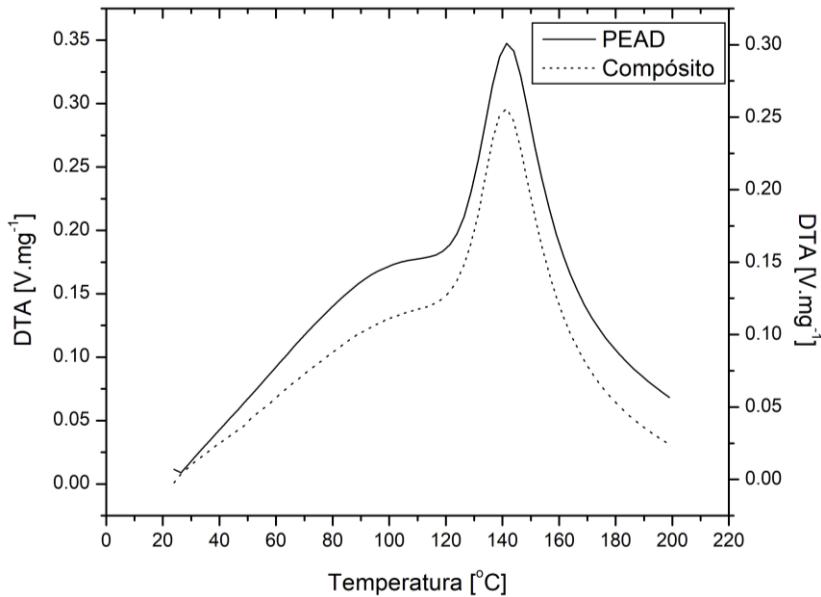
Em relação à entalpia de cristalização, foi observada uma diminuição de aproximadamente 25%, variando de 176,45 J.g⁻¹ para o PEAD puro para 134,20 J.g⁻¹ para o compósito. Essa diminuição é atribuída ao encurtamento do pico endotérmico da análise do compósito, devido à adição das fibras de *Pinus* spp.

Para a cristalinidade do polímero, houve um decrescimento da cristalinidade do compósito em aproximadamente 20%, diminuindo de 63% no PEAD puro para aproximadamente 48% no compósito. Essa diminuição de cristalinidade pode ser atribuída ao possível aumento da viscosidade do material, que impede o movimento das cadeias moleculares do polímero e consequentemente restringe a cristalização (SAEED; NAWAZ; AL-TURAIF, 2018).

2.3.3 DTA

Os resultados para a análise térmica diferencial (DTA) são apresentados no gráfico da Figura 7, na qual é possível verificar um comportamento similar para ambos os materiais.

Figura 7 – Análise DTA para as amostras de PEAD e compósito PEAD/*Pinus* spp.



Apesar de apresentarem um comportamento aparentemente similar, verifica-se uma maior intensidade no gráfico DTA para o PEAD puro, em relação ao compósito. O PEAD puro apresentou o pico de temperatura de fusão em 141,91°C, enquanto o compósito PEAD/*Pinus* spp apresentou pico de temperatura de fusão em 141,01°C. Esta permanência do pico de temperatura de fusão em uma faixa restrita em torno dos 140°C foi evidenciada também pela análise de DSC (Figura 6), no entanto, não apenas nas análises de DSC como também no DTA, foi observado um comportamento similar com a leve diminuição do pico de temperatura de fusão para o compósito, em relação ao PEAD puro.

Wu, Isarov e Connell (1999) encontraram resultado de 140°C para a temperatura de fusão do PEAD e análises de Singh e Palsule (2014) encontraram valores de 132,4°C para o pico da temperatura de fusão do PEAD, além de valores que variaram entre 132,7°C à 135,1°C para compósitos de PEAD com adição de fibras lignocelulósicas funcionalizadas de juta, indicando que a presença de um reforço não influencia significativamente na temperatura de fusão do polímero.

2.4 CONCLUSÕES

Os resultados da análise termogravimétrica apresentaram patamares característicos para o PEAD puro, além de patamares de degradação térmica referentes à umidade e degradação dos compostos lignocelulósicos provenientes da adição das fibras no material compósito. Ambas amostras analisadas apresentaram similaridade na massa remanescente (0%).

A análise de DSC, permitiu calcular o grau de cristalinidade as amostras, a qual foi verificada uma diminuição da cristalinidade do compósito, de 63,39% no PEAD puro para 48,21% no compósito.

Também foi percebida uma diminuição considerável da entalpia de fusão do compósito, passando de 176,45 J.g⁻¹ no polímero puro para 134,20 J.g⁻¹ no compósito.

Não foi percebida uma mudança relevante na temperatura de fusão do compósito, sendo verificada uma temperatura de fusão (T_m) de 141,67 °C para o PEAD e 138,80 °C para o compósito.

A análise de DTA também indicou resultados similares para a T_m , passando de 141,90 °C do PEAD puro para 141,01 °C para o compósito.

Verificou-se que a presença das fibras de *Pinus* spp não influenciou de maneira expressiva as a temperatura de fusão do compósito.

Não houve variação na temperatura principal de degradação dos polímeros analisados.

REFERÊNCIAS

ÅKESSON, Dan et al. Recycling of wood fiber-reinforced HDPE by multiple reprocessing. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 133, n. 35, p.1-8, 19 maio 2016. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/app.43877>.

ARREGI, Aitor et al. Hydrogen-rich gas production by continuous pyrolysis and in-line catalytic reforming of pine wood waste and HDPE mixtures. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 136, p.192-201, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.008>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3418**: Standard Test Method for Transition Temperatures of Polymers By Differential Scanning Calorimetry. West Conshohocken: Astm International, 2015.

BRAND, Martha Andreia et al. Thermogravimetric analysis for characterization of the pellets produced with different forest and agricultural residues. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 48, n. 11, p.1-10, 22 out. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20180271>. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v48n11/1678-4596-cr-48-11-e20180271.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2018.

CANEVAROLO JUNIOR, Sebastião V.. **Ciência dos polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3. ed. São Paulo: Artliber, 2010. 280 p.

CORREA, Carlos A. et al. Compósitos termoplásticos com madeira. **Polímeros**, [s.l.], v. 13, n. 3, p.154-165, jul. 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282003000300005>.

DAI, Baojie et al. Synergistic compatibilization and reinforcement of HDPE/wood flour composites. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 133, n. 8, p.1-9, 3 nov. 2015. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/app.42958>.

FÖLDVÁRI, Mária. **Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice**. Budapest: Geological Institute Of Hungary, 2011. 213 v.

GRISON, Karine et al. The physical perspective on the solid and molten states associated with the mechanical properties of eco-friendly HDPE/Pinus taedawood-plastic composites. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 133, n. 3, p.42887-42887, 24 set. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/app.42887>.

HAN, Bin et al. Co-pyrolysis behaviors and kinetics of plastics–biomass blends through thermogravimetric analysis. **Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry**, [s.l.], v. 115, n. 1, p.227-235, 21 maio 2013. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-013-3228-7>.

HUNG, Ke-chang et al. Characterization of Wood-Plastic Composites Made with Different Lignocellulosic Materials that Vary in Their Morphology, Chemical Composition and Thermal Stability. **Polymers**, [s.l.], v. 9, n. 12, p.726-726, 17 dez. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym9120726>.

JESKE, Helene; SCHIRP, Arne; CORNELIUS, Frauke. Development of a thermogravimetric analysis (TGA) method for quantitative analysis of wood flour and polypropylene in wood plastic composites (WPC). **Thermochimica Acta**, [s.l.], v. 543, p.165-171, set. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2012.05.016>.

KABOORANI, Alireza. Effects of Formulation Design on Thermal Properties of Wood/Thermoplastic Composites. **Journal Of Composite Materials**, [s.l.], v. 44, n. 18, p.2205-2215, 12 fev. 2010. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0021998309360938>.

MATSUSHIMA, Marcela Diogo Piveta; SILVA, Edson Roberto da; PEREIRA, Warley Augusto. **ESTUDO DE TIPOS DE POLÍMEROS COMO MATERIAIS LIGANTES NA FABRICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS**. 2015. Disponível em: <<http://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/MARCELA DIOGO - ESTUDO DE TIPOS DE POLIMEROS COMO MATERIAIS LIGANTES NA FABRICACAO DE MATERIAIS COMPOSITOS.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2018.

MOIGNE, Nicolas Le et al. Surfaces and Interfaces in Natural Fibre Reinforced Composites: Fundamentals, Modifications and Characterization. **Springerbriefs In Molecular Science**, [s.l.], p.1-136, 2018. Springer International Publishing. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-71410-3>.

NAVAS INSTRUMENTS. **TGA-2000A Series**. Disponível em: <http://www.navas-instruments.com/thermal_gravimetric_analyzers_for_organic_and_inorganic.php#>. Acesso em: 16 abr. 2018.

NETZSCH. **DSC 200 F3 Maia**. Disponível em: <<http://photos.labwrench.com/equipmentManuals/7471-2723.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2018a.

NETZSCH. STA 449 F3 Jupiter. Disponível em: <<https://www.netzsch-thermal-analysis.com/pt/produtos-solucoes/termogravimetria-calorimetria-exploratoria-diferencial-simultaneas/sta-449-f3-jupiter/>>. Acesso em: 16 abr. 2018b.

ÓRFÃO, J.j.m; FIGUEIREDO, J.l. A simplified method for determination of lignocellulosic materials pyrolysis kinetics from isothermal thermogravimetric experiments. **Thermochimica Acta**, [s.l.], v. 380, n. 1, p.67-78, nov. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6031\(01\)00634-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6031(01)00634-7).

SAEED, U; NAWAZ, Ma; AL-TURAIF, Ha. Wood flour reinforced biodegradable PBS/PLA composites. **Journal Of Composite Materials**, [s.l.], p.1-10, 10 jan. 2018. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0021998317752227>.

SEYE, Omar, CORTEZ, Luís Augusto Barbosa and GOMEZ, Edgardo Olivares. Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. **Proceedings online**. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC00000000220000002000022&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 27 Apr. 2018.

SHI, Xiaomei et al. Influence of nanofiller dimensionality on the crystallization behavior of HDPE/carbon nanocomposites. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 128, n. 6, p.3609-3618, 30 set. 2012. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/app.38581>.

SILVA, Rosana Vilarim da. **Compósito de resina poliuretana derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 139 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-29082003-105440/publico/teseRosanaVilarimdaSilva.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2018.

SINGH, Anshu Anjali; PALSULE, Sanjay. Thermal Properties of Jute Fiber Reinforced Chemically Functionalized High Density Polyethylene (JF/CFHDPE) Composites Developed by Palsule Process. **Applied Polymer Composites**, Shrewsbury, v. 2, n. 2, p.97-108, 2014. Disponível em: <<http://www.polymerjournals.com/pdfdownload/1163140.pdf>>. Acesso em: 01 maio 2018.

TUFAN, Mürşit et al. Technological and Thermal Properties of Thermoplastic Composites Filled with Heat-treated Alder Wood. **Bioresources**, [s.l.], v. 11, n. 2, p.3153-3164, 10 fev. 2016. BioResources. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.11.2.3153-3164>.

WU, Yuanwen; ISAROV, Alex V; CONNELL, Carolyn O'. Thermal analysis of high density polyethylene-maple woodflour composites. **Thermochimica Acta**, [s.l.], v. 340-341, p.205-220, dez. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6031\(99\)00265-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6031(99)00265-8).

VAN VLACK, Lawrence H. **Princípios de Ciência dos Materiais.** São Paulo: Edgard Blucher, 1970. 427 p. ISBN: 8521201214. ISBN-13: 9788521201212.

3 CAPÍTULO III - PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE PAINÉIS DE FIBRAS PRODUZIDOS COM *Pinus spp* E CARGAS POLIMÉRICAS

3.1 INTRODUÇÃO

Os painéis de fibras de média densidade (MDF) são fabricados pela aglutinação de fibras de madeira e resina sintética que, com a ação de pressão e calor, forma um painel homogêneo, estável, com superfície uniforme e lisa. Estes painéis são utilizados amplamente em aplicações que exijam boa usinabilidade, sendo, portanto, ideal para a manufatura de produtos torneados, entalhados e usinados. Devido a estas características, o MDF é muito utilizado pela indústria moveleira, do setor de artesanatos e da construção civil, que o utiliza na fabricação de pisos, rodapés, enchimento de portas e batentes (IBÁ, 2015).

Entretanto, mesmo com a vasta gama de usos para o MDF e um mercado em ascensão (GOMES et al., 2017), o MDF possui uma grande limitação, que é a baixa resistência à umidade. Essa desvantagem leva o painel MDF a uma maior e mais rápida absorção de água, quando comparado à madeira maciça. Esta maior absorção ocasiona um grande e indesejado inchamento em espessura e consequente perda de estabilidade dimensional da peça, acarretando perda de resistência mecânica e impedindo seu uso em quaisquer aplicações sujeitas à presença de umidade (FLOORSAVE, 2013; HILL, 2014; LINAUER, 2014; ROUGE, 2015; LONG, 2016; THE FURNITURE PEOPLE - TFP, 2017; MOU, 2018).

Como uma alternativa para diminuir esta desvantagem, alguns estudos investigam a viabilidade da incorporação de material hidrofóbico, como polímeros termoplásticos, na composição de painéis reconstituídos (SHI; GARDNER, 2006). Porém, não é verificada uma interação eficiente entre o material lignocelulósico e as partículas hidrofóbicas, o que pode ocasionar um comprometimento das propriedades de resistência mecânica dos painéis (GOMES et al., 2017).

Assim, o objetivo do presente estudo foi avaliar, por meio das propriedades físicas e mecânicas, a viabilidade técnica da utilização de polietileno puro e de um compósito de matriz de polietileno de alta densidade e fibras lignocelulósicas na composição de painéis de fibras de média densidade.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Matérias-Primas

Para a manufatura dos painéis foram utilizadas fibras de *Pinus* spp, obtidas no processo de fabricação de painéis MDF da Empresa Sudati – Unidade de Otacílio Costa, SC, após a passagem dos cavacos pelo desfibramento termo-mecânico; resina de ureia-formaldeído, fornecida pela empresa Bonet Madeiras e Painéis Ltda, de Santa Cecília, SC, a qual apresentava, conforme boletim técnico da empresa, teor de sólidos de 65%, pH 8,8 e viscosidade brookfield de 428 à 25°C; e cargas poliméricas caracterizadas no Capítulo II, de PEAD puro e o compósito formado por PEAD (95%) e fibras de *Pinus* spp (5%), processado por extrusão.

3.2.2 Plano Experimental

O estudo envolveu a produção de 33 painéis, divididos em 11 tratamentos (Tabela 3), sendo um testemunha e os demais compostos por diferentes proporções de PEAD puro e compósito PEAD/*Pinus* spp, adicionado às fibras de *Pinus* spp.

Tabela 3 – Tratamentos realizados no desenvolvimento do estudo.

Tratamento	<i>Pinus</i> spp (%)	PEAD (%)	PEAD/<i>Pinus</i> spp. (%)
P10	90	10	0
P20	80	20	0
P30	70	30	0
P40	60	40	0
P50	50	50	0
C10	90	0	10
C20	80	0	20
C30	70	0	30
C40	60	0	40
C50	50	0	50
Testemunha	100	0	0

Legenda: P= PEAD puro, C= compósito PEAD/*Pinus* spp.

Ressalta-se ainda que foi optado pela não utilização de parafina em todos os tratamentos, com o objetivo de evitar que houvesse influência da parafina nas características analisadas, principalmente nas propriedades de absorção de água, inchamento em espessura e taxa de não-retorno em espessura.

Os painéis foram produzidos com dimensões de 40 X 40 X 1,6 cm, densidade nominal de 750 kg.m^{-3} , resina ureia-formaldeído 12% psp (base peso seco das partículas), prensagem a frio de 5 kg.cm^{-2} , durante 10 minutos e ciclo de prensagem a quente, conforme os parâmetros apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de prensagem utilizados na produção dos painéis.

Condições de Prensagem a Quente	
Tempo de fechamento da prensa	1 min
Tempo de prensagem na pressão máxima	12 min
Tempo de abertura da prensa	1 min
Pressão	32 kgf.cm^{-2}
Temperatura dos pratos	180°C

3.2.3 Produção dos Painéis

Previamente a manufatura dos painéis foi conduzida a secagem das fibras de *Pinus* spp a temperatura de 80°C, em uma estufa de circulação forçada de ar, e monitoramento de umidade com medidor infravermelho Shimadzu MOC63u, até que atingissem teor de 4 ± 2%.

As massas de fibras de *Pinus* spp e da resina ureia-formaldeído, a serem utilizadas na produção de cada um dos painéis, foram pesadas em balança analítica, com quantidades calculadas em função das variáveis do processo, como densidade, dimensão dos painéis e teor de sólidos da resina. As fibras foram dispostas no interior de uma encoladeira do tipo tambor rotativo (Marconi MA686), com velocidade de 20 rpm (Figura 8a), enquanto a resina foi pulverizada no interior da encoladeira, durante 10 minutos, com auxílio de uma pistola dotada de copo graduado e ligada a um compressor de ar (Figura 8b).

Todos os tratamentos que possuíam cargas poliméricas do PEAD puro ou do compósito tiveram a adição manual das respectivas cargas em etapa após a saída da encoladeira. Esta etapa de adição manual buscou evitar que o polímero se depositasse no fundo da encoladeira, devido à diferença de densidade com as fibras (Figura 8c).

Após a saída da encoladeira e mistura com as cargas nas proporções estipuladas pelos tratamentos em caixa formadora, com dimensões de 40 cm x 40 cm, o colchão de fibras foi levado a uma prensagem à frio, para diminuição da espessura e penetração parcial da resina na estrutura porosa das fibras de *Pinus* spp (Figura 8d).

Posteriormente a prensagem à frio, o colchão de fibras foi disposto sobre uma chapa metálica para permitir a colocação e retirada da prensa aquecida. Além desta chapa metálica, os tratamentos que possuíam cargas poliméricas foram cobertos com papel alumínio, para evitar que houvesse uma adesão entre o polímero e a chapa metálica (Figura 8e). A prensagem à quente foi realizada em uma prensa hidráulica aquecida Marconi MA 098 (Figura 8f).

Após retirados da prensa, os painéis foram levados à sala climatizada, com temperatura de 20°C e 65% de umidade relativa do ar, para acondicionamento.

Figura 8 - Etapas do processo produtivo dos painéis. (a) encoladeira de tambor rotativo, (b) encoladeira com pistola acoplada ao compressor, (c) formação do colchão de fibras com adição manual do polímero, (d) prensagem à frio, (e) colchão de fibras, (f) prensa hidráulica aquecida.



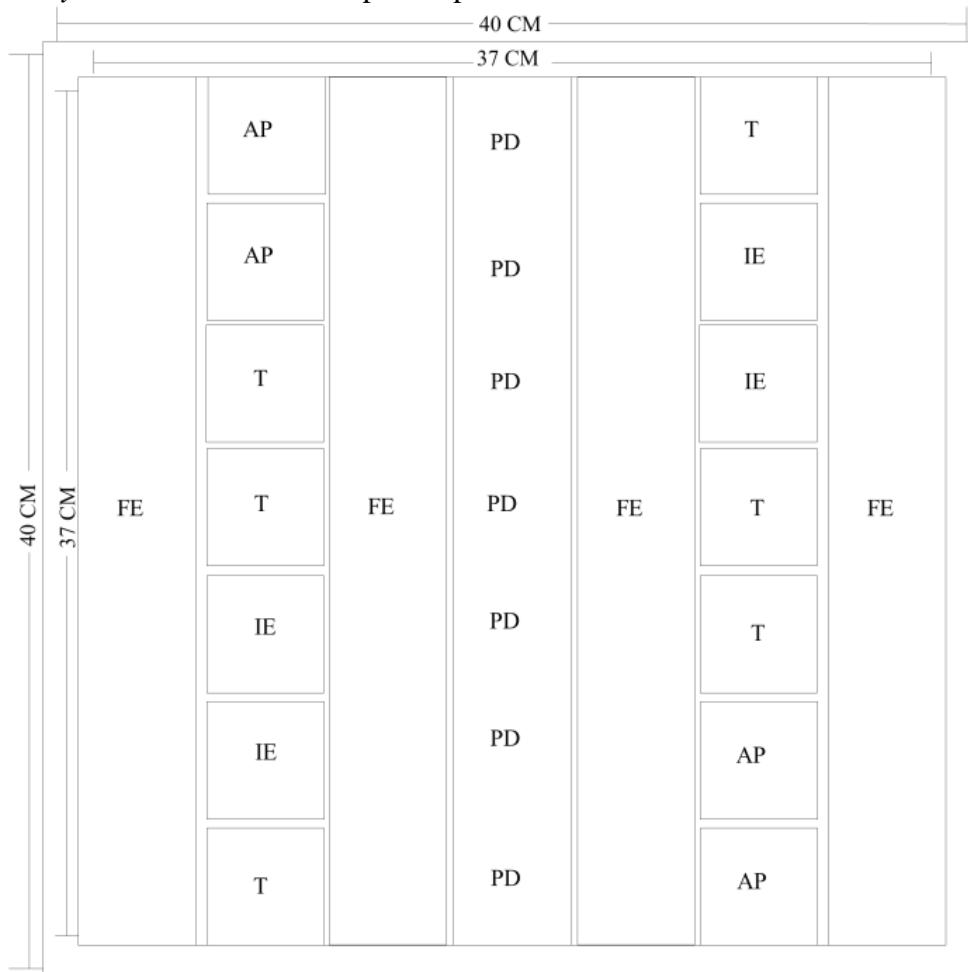
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

3.2.4 Caracterização Tecnológica dos Painéis

Após a climatização, os painéis foram esquadrejados nas dimensões de 37 cm x 37 cm, de modo a diminuir possíveis efeitos de borda. O dimensionamento dos corpos-de-prova, bem como os procedimentos para os ensaios tecnológicos seguiram a norma brasileira NBR 15316:2-2015 (ABNT, 2015), de acordo com o *layout* apresentado na Figura 9. Foram realizados os testes de absorção de água, inchamento em espessura, tração perpendicular, arrancamento de parafuso e flexão estática, além de ser determinada a densidade para cada corpo-de-prova avaliado e para a determinação da razão de compactação para cada tratamento. Os corpos de prova empregados no teste de inchamento em espessura também foram utilizados para medição da absorção de água e taxa de não-retorno em espessura.

Também foi retirada uma fileira central de cada painel para análise do perfil vertical de densidade, a ser realizada posteriormente.

Figura 9 – *Layout* de retirada dos corpos de prova.



Legenda: FE:flexão estática; AP: arrancamento de parafuso; T: Tração; IE: inchamento em espessura; PD: perfil de densidade. Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

3.2.4.1 Razão de compactação

A razão de compactação foi determinada pela relação entre a densidade de cada painel e a densidade da matéria-prima (Equação 2) utilizada para a produção do mesmo, de modo a fornecer informações importantes sobre a formação do colchão, o que reflete diretamente nas propriedades relacionadas a estabilidade dimensional dos painéis (absorção de água e inchamento em espessura) e nas propriedades de resistência e rigidez.

A RC média de cada tratamento foi obtida pela determinação da razão de compactação para todos os corpos de prova.

Para a determinação da variável, a densidade do *Pinus* spp foi de 399 kg.m⁻³, conforme relatório técnico enviado pela empresa fornecedora desta matéria-prima, a do PEAD foi de 956 kg.m⁻³, e a do compósito PEAD / *Pinus* spp de 928 kg.m⁻³, a qual foi estabelecida pela relação das duas matérias-primas (95% de PEAD e 5% de fibras de *Pinus* spp). Para cálculo da densidade das matérias-primas de cada painel (DMP), foi estabelecida a proporção das densidades utilizadas em cada tratamento.

$$RC = \frac{DP}{DMP} \quad (2)$$

Em que:

RC= razão de compactação;

DP= densidade do painel;

DMP= densidade das matérias-primas;

3.2.4.2 Taxa de Não-Retorno em Espessura

A taxa de não-retorno em espessura (TNRE) é a medida do inchamento residual após os corpos-de-prova utilizados no ensaio de inchamento em 24 horas serem estabilizados novamente em câmara com temperatura (20°C) e umidade relativa controlados (65%). Assim, a TNRE é calculada pela relação entre a espessura inicial do painel e a espessura após a realização do teste de inchamento em 24 horas e posterior climatização, conforme apresentado na equação 3.

$$TNRE = \frac{Ef - Ei}{Ei} * 100 \quad (3)$$

Em que:

$TNRE$: taxa de não-retorno em espessura (%);

Ef = espessura final (mm);

Ei = espessura inicial (mm).

3.2.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

Os painéis de cada tratamento foram submetidos à análise morfológica por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). As imagens foram obtidas em um microscópio Jeol, JSM - 6610LV, do Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul – CEME – SUL / FURG.

As amostras analisadas por MEV foram retiradas a partir da seção transversal da região da fratura dos corpos de prova submetidos ao teste de tração perpendicular. Esta escolha foi definida de modo a possibilitar a visualização da região fraturada e a forma de interação entre os constituintes do painel.

3.2.5 Análise Estatística

O delineamento experimental aplicado no estudo foi o inteiramente casualizado com arranjo fatorial, considerando como fatores os dois tipos de cargas poliméricas (PEAD puro ou compósito PEAD/*Pinus* spp) e como níveis as porcentagens diferenciadas em cada tratamento (10%, 20%, 30%, 40% ou 50%), totalizando 10 tratamentos. Além destes, também foram produzidos painéis constituídos apenas por fibras de *Pinus* spp, o qual foi utilizado como testemunha, tendo em vista que é a matéria-prima mais utilizadas pelas empresas do setor para a produção de painéis de fibra de média densidade.

Os resultados das propriedades avaliadas para os 10 tratamentos foram correlacionados por regressão múltipla com a densidade do corpo-de-prova considerada como variável dependente. Após a transformação, os dados foram submetidos as análises preliminares para verificação dos pressupostos da utilização da estatística paramétrica, por meio da verificação da presença de *outliers*, da normalidade da distribuição dos dados e da homogeneidade das variâncias. Os *outliers* foram verificados por meio de análise gráfica (*box-plot*) e descritiva, a normalidade da distribuição dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. Com os pressupostos atendidos, foi realizada a análise de variância e o teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade de erro.

Para a comparação com o tratamento testemunha, foi aplicado o teste de Dunnett. Todos os resultados também foram comparados com a literatura especializada e com a norma brasileira, NBR 15316:2-2015 (ABNT, 2015), de qualidade para painéis de fibras de madeira na faixa de espessura de 12 à 19 milímetros e uso em condições secas.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Propriedades Físicas dos Painéis

3.3.1.1 Densidade e Razão de Compactação

Na Tabela 5 constam os valores médios de densidade dos painéis dos 10 tratamentos avaliados, bem como o tratamento testemunha, na qual pode ser observado que houve diferença significativa entre os tratamentos, tanto em relação à composição, quanto ao tipo de polímero incorporado.

Tabela 5 – Valores médios de densidade para todos os tratamentos.

Composição (%)	Densidade [kg.m ⁻³]	
	<i>Pinus spp : PEAD</i>	<i>Pinus spp : Compósito</i>
90:10	P ¹⁰ 757 _(4,74) aB α	C ¹⁰ 752 _(9,30) bB
80:20	P ²⁰ 781 _(6,45) aA α	C ²⁰ 773 _(7,27) bA α
70:30	P ³⁰ 794 _(6,13) aA α	C ³⁰ 775 _(8,73) bA α
60:40	P ⁴⁰ 795 _(7,23) aA α	C ⁴⁰ 780 _(6,33) bA
50:50	P ⁵⁰ 777 _(7,27) aB α	C ⁵⁰ 736 _(8,10) bB
Test.	Testemunha 793 _(4,32) α	
Densidade Nominal	750	

Legenda: Sobrescrito: nome do tratamento, Subscrito: coeficiente de variação (%). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para composição dentro de uma mesma matéria-prima; médias seguidas de mesma letra minúscula na mesma linha não diferem estatisticamente entre si para matéria-prima dentro de uma mesma composição, ambos pelo Teste de Scott-Knott a 95% de probabilidade. Médias seguidas por α não diferem estatisticamente do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett a 95% de probabilidade.

De acordo com a NBR 15316:2-2015 (ABNT, 2015), todos os painéis podem ser classificados como média densidade. No entanto, os tratamentos diferenciaram-se da densidade nominal de 750 kg.m⁻³, variando entre 736 kg.m⁻³ e 795 kg.m⁻³.

O único tratamento que teve média de densidade menor que a nominal foi o C50, entretanto, apresenta similaridade com o tratamento C10, que obteve média acima da densidade nominal. Para os tratamentos que receberam adição do PEAD puro, os tratamentos

que receberam as maiores e menores porcentagens de polímero (P50 e P10) também foram similares estatisticamente.

Para todas as composições, o tipo de polímero influenciou significativamente, com os tratamentos que receberam adição de PEAD puro apresentando médias de densidade superiores. Já em comparação ao tratamento Testemunha, apenas os tratamentos C10, C40 e C50 diferiram estatisticamente, de acordo com o teste de Dunnett a 95% de probabilidade.

As condições laboratoriais são os fatores que podem ter influenciado na diferença entre a densidade nominal e os valores encontrados, pois os tratamentos que apresentaram diferença significativa foram encontrados nos limites superiores (P50 e C50) e inferiores (P10 e C10) de incorporação dos polímeros. O processo de adição e dispersão das cargas poliméricas entre as fibras foi um fator de complexidade de controle, o que pode ter ocasionado esta diferença de densidades.

Gonçalves et al. (2018) reportaram que as condições laboratoriais envolvendo perda de material na encoladeira e a condição da prensa foram fatores determinantes para haver diferença significativa na produção de diferentes painéis aglomerados. Os autores também atribuem estas diferenças ao processamento manual de fabricação.

Belini et al. (2011), trabalhando com painéis de fibra de *Eucalyptus grandis* em diferentes combinações com fibras de cana-de-açúcar, encontraram valores de densidade variando de 628 kg.m⁻³ até 781 kg.m⁻³ embora a densidade nominal fosse de 750 kg.m⁻³. Da mesma maneira, Belini e Tomazello Filho (2010) encontraram valores de densidade diferentes da nominal para painéis de fibras, tanto produzidos em laboratório, quanto aos confeccionados em linha de produção industrial, demonstrando assim, que a densidade final do painel é uma condição que deve ser considerada, independente do processo de manufatura.

A dificuldade em manter a homogeneidade da densidade também é reportada em diferentes trabalhos, não apenas de painéis de fibras (KOJIMA et al., 2013; KOJIMA et al., 2015, KOJIMA et al., 2016), mas também em outros painéis reconstituídos de madeira, como nos estudos de Santos, Mende e Mori (2009) e Trianoski et al. (2013) sobre painéis de partículas.

A razão de compactação (Tabela 6) apresenta a relação entre a densidade final do painel e a densidade das matérias-primas. Embora o PEAD puro tenha densidade de 956 kg.m⁻³, maior que a densidade do compósito, de 928 kg.m⁻³, não foi observada diferença estatística nessa variável dentro de uma mesma proporção. Entretanto, o aumento da proporção de polímero em cada painel influenciou significativamente em todos os tratamentos, sendo aqueles com maior quantidade de polímero adicionada, os de menores

valores de razão de compactação, devido a maior densidade das cargas poliméricas em relação ao *Pinus* spp e menor volume de material adicionado na formação de cada painel.

Tabela 6 – Razão de compactação para todos os tratamentos.

Composição (%)	Razão de Compactação	
	<i>Pinus</i> spp : PEAD	<i>Pinus</i> spp : Compósito
90:10	P ₁₀ 1,7 (4,74) aA	C ₁₀ 1,7 (9,30) aA
80:20	P ₂₀ 1,5 (6,45) aB	C ₂₀ 1,5 (7,27) aB
70:30	P ₃₀ 1,4 (6,13) aC	C ₃₀ 1,4 (8,73) aC
60:40	P ₄₀ 1,3 (7,23) aD	C ₄₀ 1,3 (6,33) aD
50:50	P ₅₀ 1,1 (7,27) aE	C ₅₀ 1,1 (8,10) aE
Test.		Testemunha 1,98 (4,32) α
Moslemi (1974) e Maloney (1993)		≥ 1,30

Legenda: Sobrescrito: caracterização do tratamento, Subscrito: coeficiente de variação (%). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para composição dentro de uma mesma matéria-prima; médias seguidas de mesma letra minúscula na mesma linha não diferem estatisticamente entre si para matéria-prima dentro de uma mesma composição, ambos pelo Teste de Scott-Knott a 95% de probabilidade. Médias seguidas por α não diferem estatisticamente do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett a 95% de probabilidade.

Moslemi (1974) e Maloney (1993) propõem valores de razão de compactação acima de 1,3, o que propicia uma melhor densificação e consolidação do painel final. Desta maneira, os tratamentos que receberam até 40% de cargas poliméricas se adequam a esta recomendação.

Pelo teste de Dunnett a 95% de probabilidade, todos os tratamentos se diferenciaram da testemunha, que apresentou a maior razão de compactação, atribuída ao uso da matéria-prima de menor densidade.

Oliveira e Freitas (1995) reinteram que a melhor maneira de otimizar as propriedades de painéis reconstituídos é com o aumento da razão de compactação. Assim, espécies de baixa densidade são as mais recomendadas para a fabricação de painéis, com espécies de valores que variam de 300 kg.m⁻³ à 500 kg.m⁻³ (MALONEY, 1977).

Woodson (1976) relata que o aumento da razão de compactação eleva os valores de propriedades mecânicas, enquanto as características das propriedades físicas podem ser diminuídas.

Oliveira e Freitas (1995) explicam que existe uma forte correlação entre a densidade e as demais propriedades dos painéis de partículas. Porém, no caso dos painéis de fibras, as

variáveis de fabricação são as principais determinantes das propriedades finais do painel, a exemplo da razão de compactação.

3.3.2 Estabilidade Dimensional dos Painéis

3.3.2.1 Absorção de Água

Os valores de absorção de água por 2 horas e 24 horas são apresentados na Tabela 7, na qual verifica-se que o tipo de carga polimérica utilizada influenciou nos resultados de absorção de água, tanto a 2 horas, quanto a 24 horas, sendo as médias dos tratamentos com incorporação de compósito PEAD/*Pinus* spp sempre maiores, quando comparadas à mesma porcentagem de PEAD puro.

Tabela 7 - Valores médios de absorção de água após 2 horas e 24 horas.

Composição (%)	Absorção 2 horas [%]		Absorção 24 horas [%]	
	<i>Pinus</i> spp : PEAD	<i>Pinus</i> spp: Compósito	<i>Pinus</i> spp : PEAD	<i>Pinus</i> spp: Compósito
90:10	P ¹⁰ 61,67 _(11,3) aE α	C ¹⁰ 65,74 _(10,7) bE α	P ¹⁰ 73,66 _(16,8) aE α	C ¹⁰ 74,58 _(9,8) bE α
80:20	P ²⁰ 49,60 _(13,06) aD	C ²⁰ 53,06 _(23,31) bD	P ²⁰ 54,99 _(12,64) aD	C ²⁰ 60,57 _(23,31) bD
70:30	P ³⁰ 35,23 _(13,32) aC	C ³⁰ 37,82 _(17,40) bC	P ³⁰ 40,19 _(11,76) aC	C ³⁰ 43,47 _(15,41) bC
60:40	P ⁴⁰ 29,07 _(12,90) aB	C ⁴⁰ 29,56 _(19,36) bB	P ⁴⁰ 34,34 _(11,4) aB	C ⁴⁰ 35,14 _(15,88) bB
50:50	P ⁵⁰ 19,67 _(30,50) aA	C ⁵⁰ 26,83 _(20,28) bA	P ⁵⁰ 24,88 _(22,3) aA	C ⁵⁰ 32,66 _(16,94) bA
Test.	64,46 _(9,05) α		76,59 _(7,47) α	

Legenda: Sobrescrito: caracterização do tratamento. Subscrito: coeficiente de variação (%). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para composição dentro de uma mesma matéria-prima; médias seguidas de mesma letra minúscula na mesma linha não diferem estatisticamente entre si para matéria-prima dentro de uma mesma composição, ambos pelo Teste de Scott-Knott a 95% de probabilidade. Médias seguidas por α não diferem estatisticamente do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett a 95% de probabilidade.

O comportamento dos painéis dos tratamentos que receberam adição do compósito, em relação à mesma porcentagem do painel pode ser explicada pois painéis mais densos absorvem menos água, conforme evidenciado pela Tabela 5, em que os tratamentos com PEAD apresentaram diferença estatística. Além disso, este fato pode ser explicado por uma

possível característica hidrofílica que o compósito polimérico adquire quando processado com um material lignocelulósico.

Ahmad et al. (2010) e Ghasemi e Kord (2009) relatam que a absorção de umidade em compósitos lignocelulósicos de matriz polimérica ocorre por três mecanismos principais: difusão de moléculas de água dentro de micro-espacos entre as cadeias poliméricas; capilaridade das moléculas de água entre os espaços e falhas na interface entre as fibras e polímeros, devido a baixa molhabilidade e impregnação da matriz e o transporte de moléculas de água por rachaduras formadas durante o processamento.

Em um estudo envolvendo compósitos de matriz polimérica com adição de fibra de palmeira, Sreekala, Kumaran e Thomas (2002) explicam que a incorporação de fibras naturais em polímeros geralmente aumenta a habilidade de sorção de água, pois as fibras são altamente higroscópicas, devido a polaridade dos grupos hidroxila da celulose e da lignina, que podem sorver moléculas de água por meio de pontes de hidrogênio.

Diante deste fato, um aumento da porcentagem de carga polimérica promoveu um mesmo padrão de diminuição da absorção de água, de acordo com o aumento da quantidade de polímero. Esta redução da absorção de água acontece, principalmente, pela característica químicas apolar do polietileno, que torna este polímero muito pouco sensível à água, com taxas de absorção menores que 0,01% (TORRES, 2007).

Os resultados apresentados na Tabela 7 demonstram que a absorção de água ocorre de maneira muito rápida nas primeiras horas de contato com a água, com valores bastante elevados, já na primeira medição às 2 horas de submersão.

Este fenômeno pode ser atribuído à cinética da absorção de água, em razão da baixa resistência das fibras a absorção de água, que leva a efeitos diretos nas propriedades mecânicas e estabilidade dimensional (ESPERT; VILAPLANA; KARLSSON, 2004).

Mesmo com o ensaio de absorção de água não seja normatizado pela norma brasileira, este ensaio é bastante comum e sua realização justificada, com seus valores podendo ser comparados com diferentes pesquisas. Silva et al. (2013) encontraram valores de absorção de água que variaram de 33,97% para painéis MDF de *Pinus caribaea* à 75,92% para MDF de *Eucalyptus grandis*, ambos produzidos com resina poliuretana a base de mamona e densidade variável entre 700 kg/m³ e 800 kg/m³. Ayrilmes (2012) produziu painéis de fibras de *Pinus* spp com resina de ureia-formaldeído e 1% de parafina apresentando 67,5% de absorção de água.

Ressalta-se que não foi utilizada parafina em nenhum dos tratamentos, sendo esta diminuição da absorção de água atribuída unicamente à adição da carga polimérica, com o

tratamento C50 o de menor absorção tanto a 2 horas quanto a 24 horas, na utilização do compósito PEAD/*Pinus* spp e o tratamento P50 o de menor absorção entre todos.

Além disso, o uso de 20% ou mais de qualquer tipo de carga polimérica demonstrou diferença estatística com o tratamento Testemunha, de acordo com o teste de Dunnett a 95% de probabilidade.

3.3.2.2 Inchamento em Espessura e Taxa de Não-Retorno em Espessura

A Tabela 8 apresenta os valores médios de inchamento em espessura para todos os tratamentos analisados, após submersão em água após 2 horas e 24 horas.

Tabela 8 – Valores médios de inchamento em espessura após 2 horas e 24 horas de submersão em água.

Composição (%)	Inchamento 2 horas [%]		Inchamento 24 horas [%]	
	<i>Pinus</i>	<i>Pinus</i> spp : Compósito	<i>Pinus</i> spp : PEAD	<i>Pinus</i> spp: Compósito
	P ¹⁰	C ¹⁰	P ¹⁰	C ¹⁰
90:10	P ¹⁰ 13,19 _(17,2) aE	C ¹⁰ 12,60 _(0,6) aD	P ¹⁰ 17,43 _(0,3) bE α	C ¹⁰ 16,44 _(25,4) aE
80:20	P ²⁰ 8,85 _(6,5) bD	C ²⁰ 6,15 _(8,0) aC	P ²⁰ 11,26 _(2,5) bD	C ²⁰ 10,19 _(7,4) aD
70:30	P ³⁰ 6,00 _(1,1) aC	C ³⁰ 6,80 _(3,2) bC	P ³⁰ 8,59 _(0,4) aC	C ³⁰ 9,31 _(4,9) aC
60:40	P ⁴⁰ 3,72 _(13,4) aB	C ⁴⁰ 3,91 _(24,45) aB	P ⁴⁰ 6,64 _(7,6) aB	C ⁴⁰ 6,47 _(12,7) aB
50:50	P ⁵⁰ 2,20 _(27,5) aA	C ⁵⁰ 2,41 _(3,7) aA	P ⁵⁰ 4,33 _(2,7) aA	C ⁵⁰ 4,32 _(2,6) aA
Test.	Testemunha	14,32 _(4,4) α	Testemunha	18,23 _(5,9) α

Legenda: Sobrescrito: caracterização do tratamento. Subscrito: coeficiente de variação (%). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para composição dentro de uma mesma matéria-prima; médias seguidas de mesma letra minúscula na mesma linha não diferem estatisticamente entre si para matéria-prima dentro de uma mesma composição, ambos pelo Teste de Scott-Knott a 95% de probabilidade. Médias seguidas por α não diferem estatisticamente do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett a 95% de probabilidade.

Embora nos resultados de absorção de água tenha sido possível uma melhor observação do efeito do tipo de carga polimérica utilizada, bem como seu percentual, nos resultados para inchamento em espessura não é observado este mesmo comportamento, que pode ser atribuída a razão de compactação, por ser a mesma entre os tratamentos.

Para as medições após 2 horas de submersão, percebe-se que o tipo de polímero utilizado influenciou significativamente apenas nas proporções 80:20 e 70:30. Já o percentual de PEAD adicionado gerou uma diferença significativa, após 2 horas, em todos os tratamentos, sendo observada uma redução do percentual de inchamento com o incremento de

sua quantidade. Nos tratamentos com adição do compósito PEAD/*Pinus* spp observou-se uma mesma tendência, porém, com os tratamentos C20 e C30 sendo significativamente iguais.

Entretanto, após 24 horas de submersão, foi possível perceber o mesmo comportamento entre as composições do mesmo tipo de polímero, com uma classificação das médias de acordo com a composição percentual, em que é possível observar uma diminuição das médias de inchamento, com o aumento dos percentuais de polímero. Após 24 horas, o tipo de polímero influenciou apenas nos tratamentos com adição de até 20% de carga polimérica, sendo os tratamentos que receberam percentuais de PEAD puro, os que apresentaram maiores inchamentos.

Além disso, o teste de Dunnett, a 95% de probabilidade, demonstrou que todos os tratamentos se diferenciaram da testemunha após 2 horas de submersão, indicando que a adição dos polímeros exerce influência no inchamento inicial dos painéis, retardando a velocidade de inchamento inicial. Após as 24 horas de submersão em água, também pelo teste de Dunnett a 95% de probabilidade, apenas o tratamento P10 não diferenciou significativamente da testemunha.

O parâmetro indicado na NBR 15316:2-2015 (ABNT, 2015) preconiza que os painéis MDF devem possuir um inchamento máximo de 12% após 24 horas de submersão em água. Considerando que não foi utilizada parafina para diminuir o inchamento em espessura nos tratamentos estudados, nem na testemunha, percebe-se que a adição de 20% ou mais de polímero no painel de fibra é suficiente para a adequação dos tratamentos na norma, demonstrando o efeito da carga polimérica nos painéis.

Diferentes trabalhos com painéis de fibras demonstram que os valores de inchamento em espessura é bastante variável e que envolve diferentes fatores, como matéria-prima, tipo de resina e uso de parafina. Calegari et al. (2017) estudaram a aplicação de uma resina poliuretana à base de mamona em recobrimento de painéis MDF e, comparando com verniz acrílico e verniz marinho, obtiveram resultados de inchamento em espessura em 2 e 24 horas de 1,54% e 2,00%, respectivamente, para a poliuretana, 0,80% à 2 horas e 13,52% à 24 horas para o verniz acrílico, 24,55% à 2 horas e 37,97% à 24 horas, para o verniz marinho e 36% à 2 horas e 40,97% à 24 horas, para o MDF sem recobrimento. Painéis MDF de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* com resina poliuretana a base de mamona apresentaram inchamento médio de 11,32% à 15,83%, respectivamente, após 24h de submersão em água (SILVA et al., 2013). Belini e Tomazello Filho (2010) obtiveram resultados de 9,5% de inchamento em espessura à 24 horas de painéis MDF. Entretanto, estes painéis foram produzidos utilizando fibras de *Eucalyptus grandis* e adição de 0,37% de parafina. Já Ayrilmis (2012), produzindo

MDF de *Pinus* spp com 11% de resina de ureia-formaldeído, observou inchamento em espessura de 23,7% após 24 horas, mesmo com a adição de 1% de parafina.

Observa-se também, que há uma ligação entre a razão de compactação (Tabela 6) e os resultados de inchamento, nas quais os painéis que apresentaram os maiores valores de razão de compactação, foram aqueles que mais incharam. Este fenômeno pode ser atribuído a consequente maior densificação dos painéis de maior RC, o que leva a uma diminuição dos espaços vazios no interior do painel. Assim, para que haja o transporte da água, ocorre um maior inchamento em espessura. Este fenômeno também foi observado por Geimer (1982), que concluiu que independentemente do nível de exposição à umidade, sempre ocorre um inchamento maior em chapas reconstituídas de densidade mais elevadas e com alta razão de compactação.

Após o teste de inchamento em 24 horas de submersão, as peças foram climatizadas novamente e o inchamento residual mensurado está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores médios da taxa de não-retorno em espessura para todos os tratamentos.

Composição (%)	TNRE [%]	
	<i>Pinus</i> spp:PEAD	<i>Pinus</i> spp:Compósito
90:10	P ¹⁰ 13,93 _(13,66) bE α	C ¹⁰ 11,44 _(3,38) aD
80:20	P ²⁰ 8,80 _(3,68) bD	C ²⁰ 6,75 _(4,67) aC
70:30	P ³⁰ 6,70 _(3,45) aC	C ³⁰ 7,23 _(5,88) aC
60:40	P ⁴⁰ 5,01 _(6,57) aB	C ⁴⁰ 4,57 _(11,41) aB
50:50	P ⁵⁰ 2,99 _(2,63) aA	C ⁵⁰ 2,44 _(3,49) aA
Test.	Testemunha 14,31 _(7,64) α	

Legenda: Sobrescrito: caracterização do tratamento. Subscrito: coeficiente de variação (%). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para composição dentro de uma mesma matéria-prima; médias seguidas de mesma letra minúscula na mesma linha não diferem estatisticamente entre si para matéria-prima dentro de uma mesma composição, ambos pelo Teste de Scott-Knott a 95% de probabilidade. Médias seguidas por α não diferem estatisticamente do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett a 95% de probabilidade.

A Tabela 9 demonstra que os menores valores de inchamento residual foram apresentados pelos tratamentos da proporção 50:50, enquanto o maior inchamento residual foi apresentado pelo tratamento P10, com a menor quantidade percentual de PEAD puro.

A TNRE manteve o mesmo padrão de comportamento para os tratamentos que demonstraram os maiores valores de absorção de água (Tabela 7) e inchamento em espessura (Tabela 8), já que P10 e C10 também foram os tratamentos que mantiveram o maior

inchamento residual, enquanto os tratamentos com menor absorção e inchamento, P50 e C50, foram os que apresentaram o menor inchamento residual.

Os valores também estão inversamente relacionados à razão de compactação. Isso ocorre pois quando acontece o inchamento em espessura, dois processos físicos estão envolvidos, um referente a própria natureza higroscópica do material lignocelulósico e o outro relacionado à tensões de compressão. Quando o painel incha, há a liberação das tensões de compressão, provenientes do processo de prensagem. Como este processo é definitivo e irreversível, o painel adquire este inchamento residual, mesmo após o desaparecimento do inchamento residual proveniente da natureza da madeira (MELO, 2013). No entanto, observa-se que a adição do material polimérico ocupa o espaço das fibras, diminuindo a característica higroscópica do painel, devido a menor fração de fibras. Também pode ser atribuído à adição do polímero, uma diminuição das tensões de compressão, o que também diminui o inchamento residual.

O tratamento Testemunha foi o que apresentou a maior TNRE, e apenas o tratamento P10 não se diferenciou da testemunha, pelo teste de Dunnett a 95% de probabilidade.

O tipo de polímero incorporado influenciou significativamente nos tratamentos das proporções 90:10 e 80:20, que apresentaram inchamento residual maior para os tratamentos que receberam adição do PEAD puro. Já para o mesmo polímero, a porcentagem de compósito incorporada não diferenciou significativamente entre os tratamentos C20 e C30, pelo teste de Scott-Knott a 95% de probabilidade.

3.3.4 Propriedades Mecânicas

3.3.4.1 Flexão Estática

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) dos tratamentos analisados, tendo sido verificado os menores valores de MOR para os tratamentos que receberam a inclusão de PEAD puro nas proporções de 30%, 40% e 50. Já o percentual de polímero adicionado influenciou significativamente nos tratamentos P40 e P50 para o PEAD puro e C10 e C20 nos tratamentos que receberam adição de compósito. Para os dois tipos de polímero, as composições com 50% de adição de cargas foram as que apresentaram as menores médias.

Tabela 10 – Módulo de elasticidade e módulo de ruptura pelo teste de flexão estática.

Composição (%)	Flexão Estática			
	MOR [MPa]		MOE [MPa]	
	<i>Pinus spp :</i> PEAD	<i>Pinus spp :</i> Compósito	<i>Pinus spp :</i> PEAD	<i>Pinus spp :</i> Compósito
90:10	P ¹⁰ 24,77 _(15,3) aA	C ¹⁰ 25,81 _(6,25) aB	P ¹⁰ 2289 _(16,56) aA	C ¹⁰ 2302 _(6,79) aA
80:20	P ²⁰ 22,98 _(15,4) aA	C ²⁰ 23,71 _(6,52) aB	P ²⁰ 2045 _(14,97) aB	C ²⁰ 1956 _(10,79) aB
70:30	P ³⁰ 22,57 _(12,4) bA	C ³⁰ 27,63 _(17,66) aA	P ³⁰ 1952 _(12,25) bB	C ³⁰ 2373 _(12,08) aA
60:40	P ⁴⁰ 17,25 _(21,3) bB	C ⁴⁰ 28,00 _(10,53) aA	P ⁴⁰ 1735 _(17,59) bC	C ⁴⁰ 2207 _(10,28) aA
50:50	P ⁵⁰ 15,67 _(2,82) bB	C ⁵⁰ 19,26 _(20,05) aC	P ⁵⁰ 1461 _(2,05) aD	C ⁵⁰ 1477 _(13,81) aC
Test.	Testemunha	34,41 _(11,79) α	Testemunha	3304 _(8,66) α

Legenda: Sobrescrito: caracterização do tratamento. Subscrito: coeficiente de variação (%). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para composição dentro de uma mesma matéria-prima; médias seguidas de mesma letra minúscula na mesma linha não diferem estatisticamente entre si para matéria-prima dentro de uma mesma composição, ambos pelo Teste de Scott-Knott a 95% de probabilidade. Médias seguidas por α não diferem estatisticamente do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett a 95% de probabilidade.

O tratamento P50 apresentou a menor média de MOR dentre todos os tratamentos, com 15,67 MPa, porém sem diferença estatística com o tratamento P40, que apresentou média de 17,25 MPa e o maior coeficiente de variação dentre todos os tratamentos. Para todas as composições, os tratamentos que receberam adição do compósito PEAD/*Pinus spp*, apresentaram média maior que sua composição respectiva com adição de PEAD puro.

Em relação ao MOE, o tipo de polímero influenciou significativamente nos tratamentos P30 e P40. Já o aumento do percentual de PEAD puro adicionado ocasionou a diminuição do módulo de elasticidade até o valor de 1461 MPa. Nas composições que receberam o compósito, o tratamento com maior percentual também apresentou a menor média dentro desta mesma matéria-prima, porém os tratamentos C10, C30 e C40 foram estatisticamente iguais. Também houve diferença entre a testemunha, que apresentou valores superiores de MOE e MOR, e todos os tratamentos, pelo teste de Dunnett a 95% de probabilidade.

Askeland e Phulé (2011) explicam que o módulo de elasticidade na flexão é a medida da dificuldade de deformar um material e depende da resistência das ligações atômicas e da composição química, não sendo, entretanto, muito afetado pela microestrutura do material. Assim, percebe-se que a incorporação de um material polimérico diminuiu esta resistência, o que pode ser relacionado com a diminuição de interação interna no painel, o que leva a um

cisalhamento das camadas durante o ensaio de flexão, devido à força de compressão na parte superior e tração na parte inferior do corpo de prova, acarretando a diminuição do módulo de elasticidade.

A norma brasileira NBR 15316:2-2015 (ABNT, 2015) recomenda valores mínimos de 20 MPa para MOR e 2200 MPa para MOE, enquadrando os tratamentos P10, P20, P30, C10, C20, C30 e C40, para MOR e P10, C10, C30 e C40 para MOE, além do tratamento Testemunha, para ambas variáveis, que diferiu estatisticamente de todos os outros tratamentos, de acordo com o teste de Dunnett a 95% de probabilidade.

A literatura apresenta informações bastante variáveis para análise de MOE e MOR de painéis de fibras. Ayrilmis (2012) encontrou valores de 17,2 MPa para módulo de ruptura e 1544 MPa para módulo de elasticidade em painéis 100% fibras de *Pinus spp*, além de valores de até 21,8 MPa (MOR) e 1971 MPa (MOE) para painéis com resíduo de papel melamínico, até resultados de 3591 MPa (MOE) e 39,98 MPa (MOR) para painéis MDF de *Eucalyptus grandis* produzidos com resina poliuretana a base de mamona e densidade aparente de 800 kg.m⁻³ (SILVA et al., 2013). Shupe et al. (2006) verificaram que painéis de fibras produzidos com *Triadica sebifera* syn. *Sapium sebiferum* apresentaram valores de para 23 MPa para MOR e 2362 MPa para MOE, e Garcia, Cloutier e Riedl (2005) encontraram valores que variaram de 20,9 MPa à 25,9 MPa (MOR) e de 2187 MPa à 2870 MPa (MOE), analisando painéis de fibras tratadas com cera de polipropileno. Estes estudos demonstram que tanto o módulo de elasticidade, quanto o módulo de ruptura sofrem alterações consideráveis, quando há a incorporação de materiais não comumente utilizados.

Foi observado que houve um aumento do módulo de ruptura com a adição do compósito, até o valor máximo no tratamento C40. Binoj e Bibin (2019) indicam que o aumento do MOR ocorre devido à diminuição da natureza frágil do material inicial, indicando assim, que a incorporação do compósito nos painéis pode ter reduzido a fragilidade do painel, até a proporção máxima de 40%. Acima disto, foi observada uma grande diminuição do módulo de ruptura, indicando que pode ter acontecido uma ligação inadequada entre o reforço e a matriz, o mesmo observado por Binoj e Bibin (2019). Além disso, a razão de compactação destes tratamentos também foi abaixo do valor de 1,3, recomendado por Moslemi (1974) e Maloney (1993).

3.3.4.2 Tração Perpendicular

A Tabela 11 apresenta os dados relativos à resistência da ligação interna dos tratamentos submetidos ao ensaio de tração perpendicular, na qual observa-se que o tipo de polímero utilizado influenciou significativamente na redução desta propriedade nos tratamentos com adição do compósito nas proporções de 30% e 50%.

Tabela 11 – Valores médios de ligação interna pelo teste de tração perpendicular para todos os tratamentos.

Composição (%)	Tração Perpendicular [MPa]	
	<i>Pinus spp : PEAD</i>	<i>Pinus spp : Compósito</i>
90:10	P ^I 0 0,42 _(12,09) aC	C ^I 0 0,42 _(7,76) aB
80:20	P ² 0 0,60 _(17,35) aB α	C ² 0 0,58 _(11,04) aA α
70:30	P ³ 0 0,82 _(19,20) aA	C ³ 0 0,42 _(20,48) bB
60:40	P ⁴ 0 0,56 _(13,91) aB α	C ⁴ 0 0,56 _(9,66) aA α
50:50	P ⁵ 0 0,82 _(18,60) aA	C ⁵ 0 0,54 _(22,08) bA α
Test.	Testemunha 0,56 _(7,59) α	

Legenda: Sobrescrito: caracterização do tratamento. Subscrito: coeficiente de variação (%). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para composição dentro de uma mesma matéria-prima; médias seguidas de mesma letra minúscula na mesma linha não diferem estatisticamente entre si para matéria-prima dentro de uma mesma composição, ambos pelo Teste de Scott-Knott a 95% de probabilidade. Médias seguidas por α não diferem estatisticamente do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett a 95% de probabilidade.

Além disso, é percebida uma influência em relação à porcentagem de polímero adicionado, com o tratamento P10 apresentando o menor valor dentre os tratamentos que receberam adição de PEAD puro. Já para os tratamentos que receberam o compósito, os tratamentos C10 e C30 apresentaram o mesmo valor médio do tratamento que recebeu adição de 10% de PEAD puro.

Os tratamentos P30 e P50 apresentaram os maiores valores de resistência à tração perpendicular, dentre todos os tratamentos, enquanto para os tratamentos com adição de compósito, os tratamentos C20, C40 e C50 não diferiram estatisticamente pelo teste de Scott-Knott a 95% de probabilidade.

Embora não seja percebida uma relação direta entre o tipo de polímero ou o percentual utilizado, nota-se que os tratamentos que possuíam menores quantidades de polímero (P10 e C10) apresentaram os menores valores, enquanto os tratamentos com maior percentual (P50 e C50) de maneira geral apresentaram maior resistência à tração. Este aumento da resistência à

tração pode ser explicado pelo teor de resina disponível para fazer o ancoramento entre as fibras lignocelulósicas do painel, já que os tratamentos com maiores quantidades de polímero, possuíam menor massa de fibras, aumentando a quantidade de resina por fibra.

Mesmo que a incorporação de polímero possa ser interpretada como a inserção de pontos sem interação no interior do painel, a quantidade de resina disponível por fibra pode agir como um compensador, impedindo que a resistência do painel diminua.

Em comparação ao tratamento testemunha, os tratamentos P20, P40, C20, C40 e C50 não diferenciaram estatisticamente, pelo teste de Dunnett, a 95% de probabilidade.

Diferentes estudos indicam valores bastante variáveis para a resistência à tração perpendicular de painéis, tanto produzidos com matéria-prima convencional, quanto os produzidos com materiais alternativos. Campos e Lahr (2004) produziram painéis de fibras de *Pinus* spp com 12% de resina ureia-formaldeído e *Eucalyptus* spp e obtiveram valor médio de 0,84MPa para ambos tratamentos. Em um estudo comparativo entre painéis MDF comerciais, Torquato et al. (2010) encontraram valores que variaram de 0,34 MPa à 0,53 MPa para painéis de *Pinus* spp com densidades variando de 693 kg.m⁻³ à 736 kg.m⁻³, e 0,30 MPa para um painel de *Eucalyptus* spp com densidade de 756 kg.m⁻³. Também analisando painéis comerciais de fibras, Belini e Tomazello Filho (2010) encontraram valores de 1,00 MPa para um painel comercial de *E. grandis* e 1,01 MPa para um painel similar, produzido em laboratório.

Em estudos de matérias-primas alternativas, Ayrilmis (2012) encontrou resultado de força de ligação interna de 0,40 MPa em painéis de fibras de *Pinus* spp e valor de até 0,61MPa em painéis utilizando resíduo de papel melamínico. Já Marinho et al. (2013), produzindo painéis MDF de bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus*), encontrou valores que variaram de 0,10 MPa à 0,26 MPa. Shupe et al. (2006) observaram uma resistência à tração perpendicular de painéis de fibras produzidos com *Triadica sebifera* syn. *Sapium sebiferum* de 0,33 MPa. Já Garcia, Cloutier e Riedl (2005) produziram painéis MDF de fibras tratadas com cera de polipropileno e observou valores de ligação interna que variaram de 0,58 MPa à 0,89 MPa. Assim, verifica-se que tanto para painéis produzidos com matérias-primas convencionais, quanto nos que recebem algum tipo de material alternativo, a ligação interna também é uma propriedade bastante variável nos diferentes estudos.

A norma brasileira indica que os painéis MDF devam apresentar resistência à tração perpendicular de, no mínimo, 0,55 MPa. Assim, apenas os tratamentos P10, C10, C30 e C50 não se enquadram neste parâmetro. No entanto, ressalta-se que o tratamento C50 apresenta

média muito próxima da norma, e possui um coeficiente de variação maior que os demais tratamentos, sendo classificada entre o grupo de maiores médias, pelo teste de Scott-Knott.

3.3.4.3 Arrancamento de Parafuso

Foram realizados testes de arrancamento de parafuso na superfície e no topo de todos os tratamentos, com os resultados apresentados na Tabela 12. De maneira geral, neste ensaio, os tratamentos com menor porcentagem de carga polimérica apresentaram as menores médias, tanto no arrancamento de parafuso na superfície quanto no topo. Entretanto, no ensaio de topo, não houve diferenciação estatística entre os tratamentos que receberam até 30% de PEAD puro. Nos tratamentos com incorporação de compósito, os tratamentos C10 e C30 também não apresentaram diferença significativa, possuindo as menores médias dentre estes tratamentos

Tabela 12 – Valores médios de resistência ao arrancamento de parafuso em superfície e topo.
Arrancamento de Parafuso

Comp. (%)	Superfície [N]		Topo [N]	
	<i>Pinus spp :</i> PEAD	<i>Pinus spp :</i> Compósito	<i>Pinus spp :</i> PEAD	<i>Pinus spp:</i> Compósito
90:10	P ¹⁰ 1122 _(4,84) bD α	C ¹⁰ 1248 _(9,09) aC α	P ¹⁰ 1068 _(16,03) aB α	C ¹⁰ 1005 _(1,49) aB α
80:20	P ²⁰ 1316 _(0,69) bC	C ²⁰ 1564 _(1,86) aA	P ²⁰ 1233 _(18,92) aB	C ²⁰ 1279 _(21,55) aA
70:30	P ³⁰ 1482 _(5,93) aB	C ³⁰ 1338 _(2,91) bB	P ³⁰ 1267 _(23,01) aB	C ³⁰ 847 _(18,05) bB α
60:40	P ⁴⁰ 1539 _(0,84) aB	C ⁴⁰ 1347 _(11,93) bB	P ⁴⁰ 1434 _(18,94) aA	C ⁴⁰ 1223 _(22,03) aA
50:50	P ⁵⁰ 1644 _(5,98) aA	C ⁵⁰ 1329 _(6,58) bB	P ⁵⁰ 1407 _(12,89) aA	C ⁵⁰ 1180 _(27,58) bA α
Test.	Testemunha	1211 _(0,02) α	Testemunha	894 _(6,02) α

Legenda: Sobreescrito: caracterização do tratamento. Subscrito: coeficiente de variação (%). Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para composição dentro de uma mesma matéria-prima; médias seguidas de mesma letra minúscula na mesma linha não diferem estatisticamente entre si para matéria-prima dentro de uma mesma composição, ambos pelo Teste de Scott-Knott a 95% de probabilidade. Médias seguidas por α não diferem estatisticamente do tratamento testemunha pelo teste de Dunnett a 95% de probabilidade.

Pecebe-se que o tipo de polímero influenciou significativamente em todos os tratamentos para ensaio de superfície, apresentando resultados superiores para os tratamentos com incorporação de compósito até a taxa de 20%.

O teste de Dunnett indicou que os tratamentos P10 e C10 não diferenciaram estatisticamente da testemunha, na superfície e topo, e os tratamentos C30 e C50 no ensaio de topo.

Não é percebida uma relação direta entre a resistência ao arrancamento de parafuso com o tipo ou percentual de polímero adicionado. Porém, o mesmo comportamento observado no ensaio de tração perpendicular pode ser verificado para o arrancamento de parafuso, em que os tratamentos com menor percentual de polímero apresentaram as menores médias, o que também pode ser explicado pelo teor de resina disponível para fazer o ancoramento entre as fibras lignocelulósicas, acarretando uma melhor densificação do painel, e elevando a resistência ao arrancamento de parafuso.

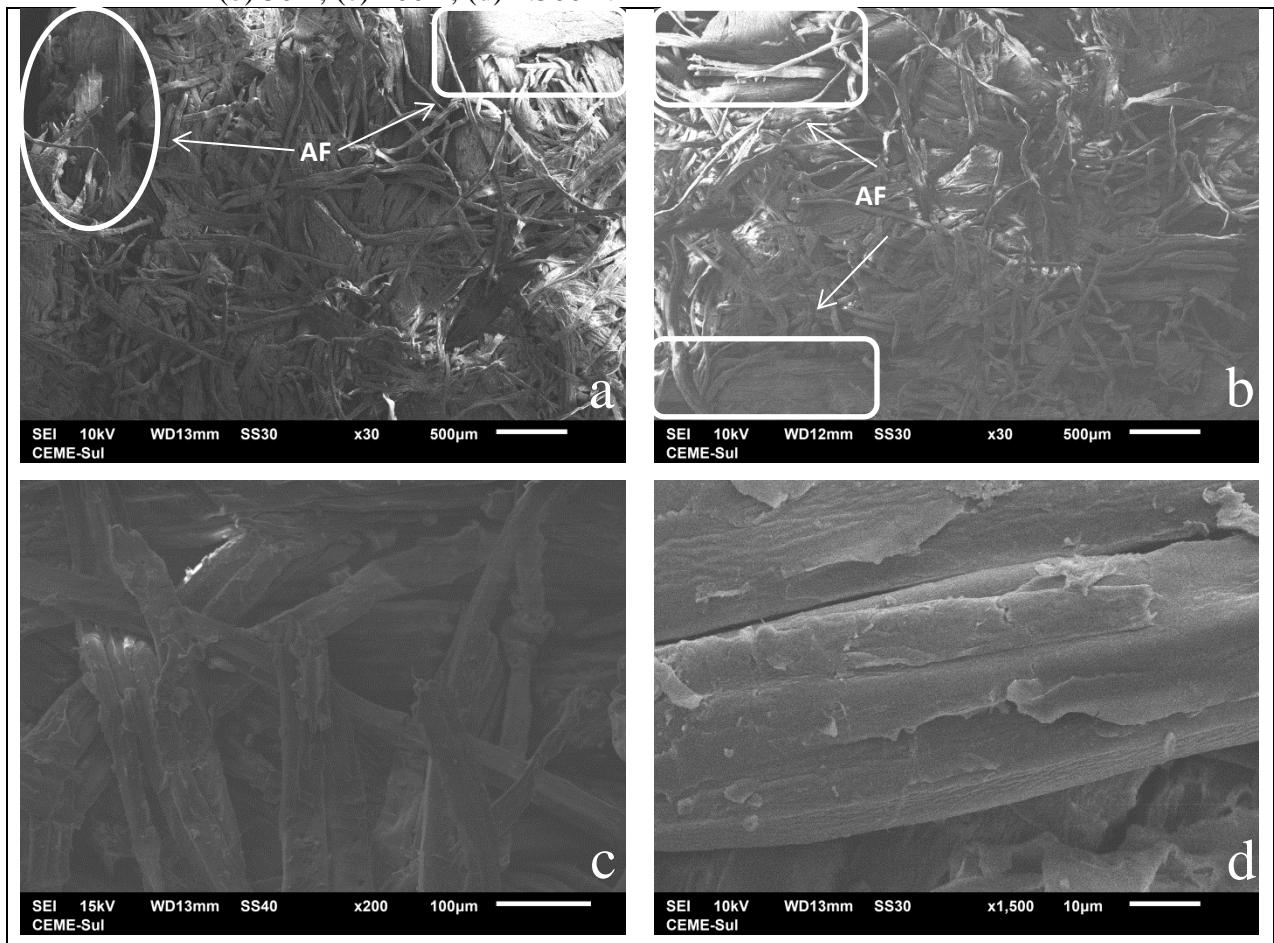
Contudo, mesmo os tratamentos que apresentaram as menores médias, possuem valores em conformidade com outras pesquisas envolvendo painéis de fibras. Painéis MDF de *Eucalyptus grandis* produzidas com diferentes métodos de desfibramento apresentaram valores que variaram de 1049,31 N a 1461,19 N para topo e 941,44 N a 1382,74 N para superfície (BELINI et al., 2008). Belini e Tomazello Filho (2010) obtiveram valores de 1333,7 N de resistência para arrancamento de topo e 1206,22 N para arrancamento de superfície em painéis de fibras de *E. grandis* produzidos em laboratório. Um estudo piloto de painéis MDF de *E. grandis* com bagasso de cana-de-açúcar encontrou resultados que variaram de 774,72 N em painéis 100% bagasso de cana-de-açúcar à 1529,84 N para MDFs 100% *E. grandis*, para resistência ao arrancamento de parafuso (BELINI et al., 2011). Sassoni et al. (2015) encontraram um valor de aproximadamente 796N de resistência em painéis MDF produzidos com fibras de *Canabis sativa* e Vassiliou e Barboutis (2005) observaram que a resistência ao arrancamento de parafuso de painéis MDF variou de 962N à 1000N, com aumento proporcional ao aumento de densidade.

A instrução informativa do teste de resistência ao arrancamento de parafuso, de acordo com a NBR 15316:2-2015 (ABNT, 2015) não estabelece um requisito mínimo de resistência para painéis MDF. No entanto, existem especificações técnicas que apresentam essa característica como valores mínimos de 750 N para topo e 1000N para superfície (GUARARAPES, 2018). Considerando esta especificação, todos os tratamentos estão acima dos valores mínimos recomendados.

3.3.5 Análise Morfológica

A Figura 10 apresenta as imagens obtidas por MEV apenas para o tratamento testemunha, sem adição de nenhum tipo de carga polimérica, em magnificações variando de 30X à 1500X. Na Figura 11 são apresentadas imagens dos tratamentos com adição do compósito PEAD/*Pinus* spp e as imagens do compósito antes da incorporação nos painéis são apresentados na Figura 12. Já a Figura 13 apresenta imagens dos tratamentos que receberam adição do PEAD puro.

Figura 10 – Micrografias do tratamento Testemunha em diferentes magnificações: (a) 30X; (b) 30X; (c) 200X; (d) 1.500X.



Legenda: AF= aglomerado de fibras.

A Figura 10 ilustra a região da fratura dos corpos de prova do tratamento Testemunha, formados 100% por fibras de *Pinus* spp. As Figuras 10a e 10b apresentam uma visão geral da distribuição das fibras, sendo percebido, em um primeiro plano, algumas fibras deslocadas devido ao ensaio de tração. Já em segundo plano, é verificado uma maior aglomeração lateral

das fibras devido ao processo de prensagem e utilização de resina. Esses aglomerados podem ser mais claramente percebidos nos cantos superiores da Figura 10a, e nos cantos esquerdos da Figuras 10b.

O detalhamento das fibras na região fraturada é apresentado na Figura 10c, em que podem ser percebidas três fibras fraturadas devido ao ensaio de tração. As fibras da Figura 10c apresentam escamas em sua superfície, devido à impregnação da resina ureia-formaldeído, que, conforme verificado na Figura 10d apresentam uma boa distribuição e influencia diretamente nas propriedades finais do painel.

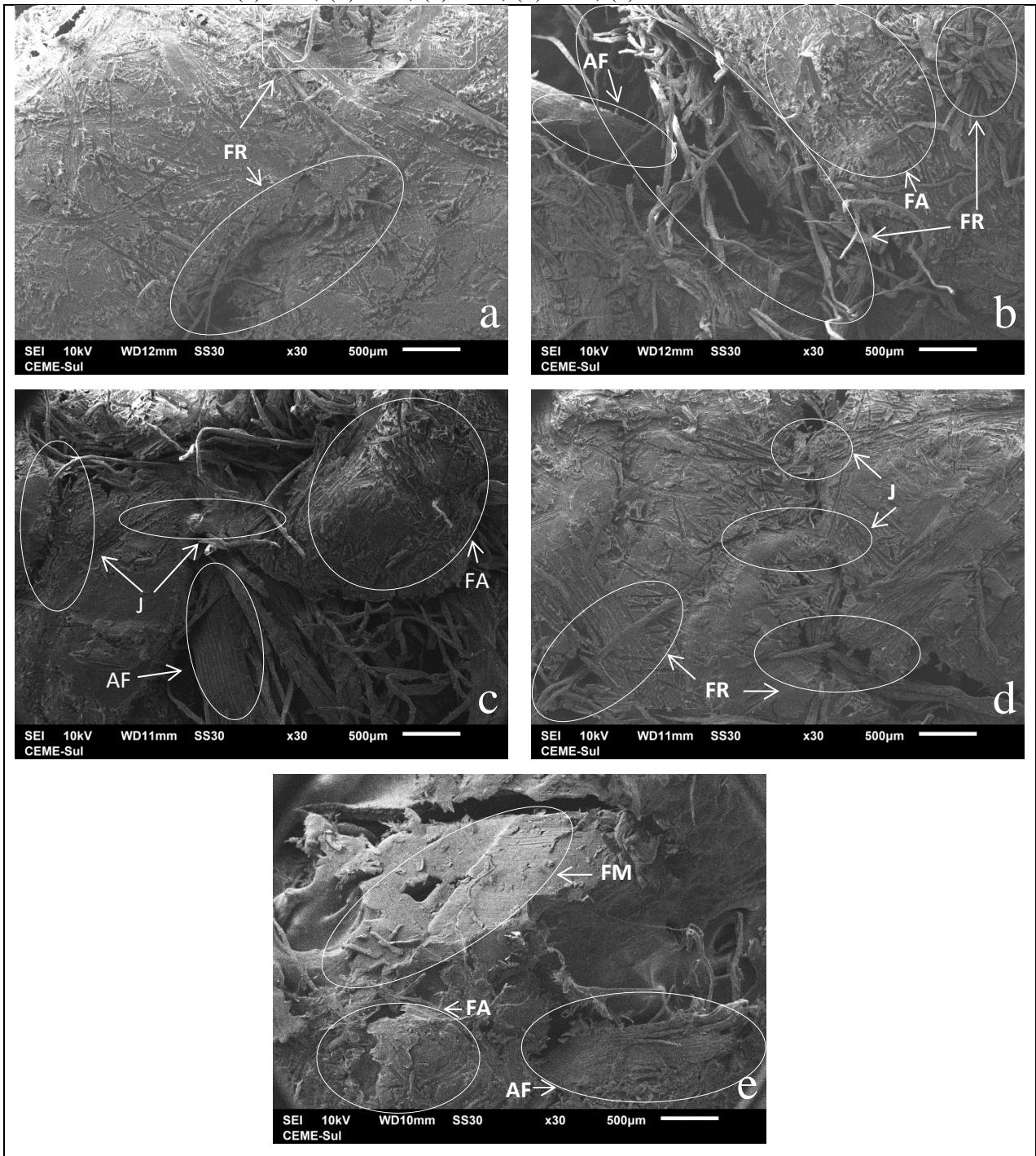
Já a Figura 11 apresenta micrografias representativas dos tratamentos que receberam adição do compósito PEAD/*Pinus* spp. Na Figura 11a, do tratamento C10, é demonstrada a superfície do compósito, em que também podem ser percebidas marcas de fibras arrancadas durante o ensaio de tração perpendicular, representadas por sulcos em toda região superficial da imagem. Na parte central superior e inferior também são percebidos fibras remanescentes em interação com o compósito.

A Figura 11b, do tratamento C20, apresenta de maneira mais perceptível a interação entre o compósito PEAD/*Pinus* spp e as fibras lignocelulósicas, permitindo observar uma boa relação da quantidade de fibras arrancadas e as fibras remanescentes na superfície do polímero. Percebe-se um aglomerado de fibras no canto esquerdo da imagem, além de fibras emergindo do interior do compósito na parte central. Da mesma forma, o tratamento C30 (Figura 11c) também apresenta uma boa relação entre as fibras arrancadas e as fibras ainda na superfície do compósito. A imagem também apresenta grãos distintos de compósito, em que é possível perceber que há uma conexão efetiva entre as partes poliméricas. Também na parte central são percebidos aglomerados e fibras saindo do interior da matriz polimérica.

A interação entre as partículas de compósito também é percebida na Figura 11d, com a união, na parte central da imagem, de duas partículas de compósito. Também são percebidos resquícios de fibras não arrancadas, principalmente na parte inferior da imagem, além de fibras entre as partículas e a matriz na parte central inferior da imagem.

Já o tratamento C50 demonstrado na Figura 11e, apresenta pedaços de fibras na matriz polimérica, além de pequenas fibras aderidas na superfície e emergindo da matriz. Na parte inferior direita da imagem é percebido um aglomerado de fibras e sulcos de fibras arrancadas na parte inferior esquerda. A Figura 11e, embora apresente esse padrão visto também nas imagens anteriores, apresenta uma parte mais detalhada do compósito, devido a maior porcentagem neste tratamento.

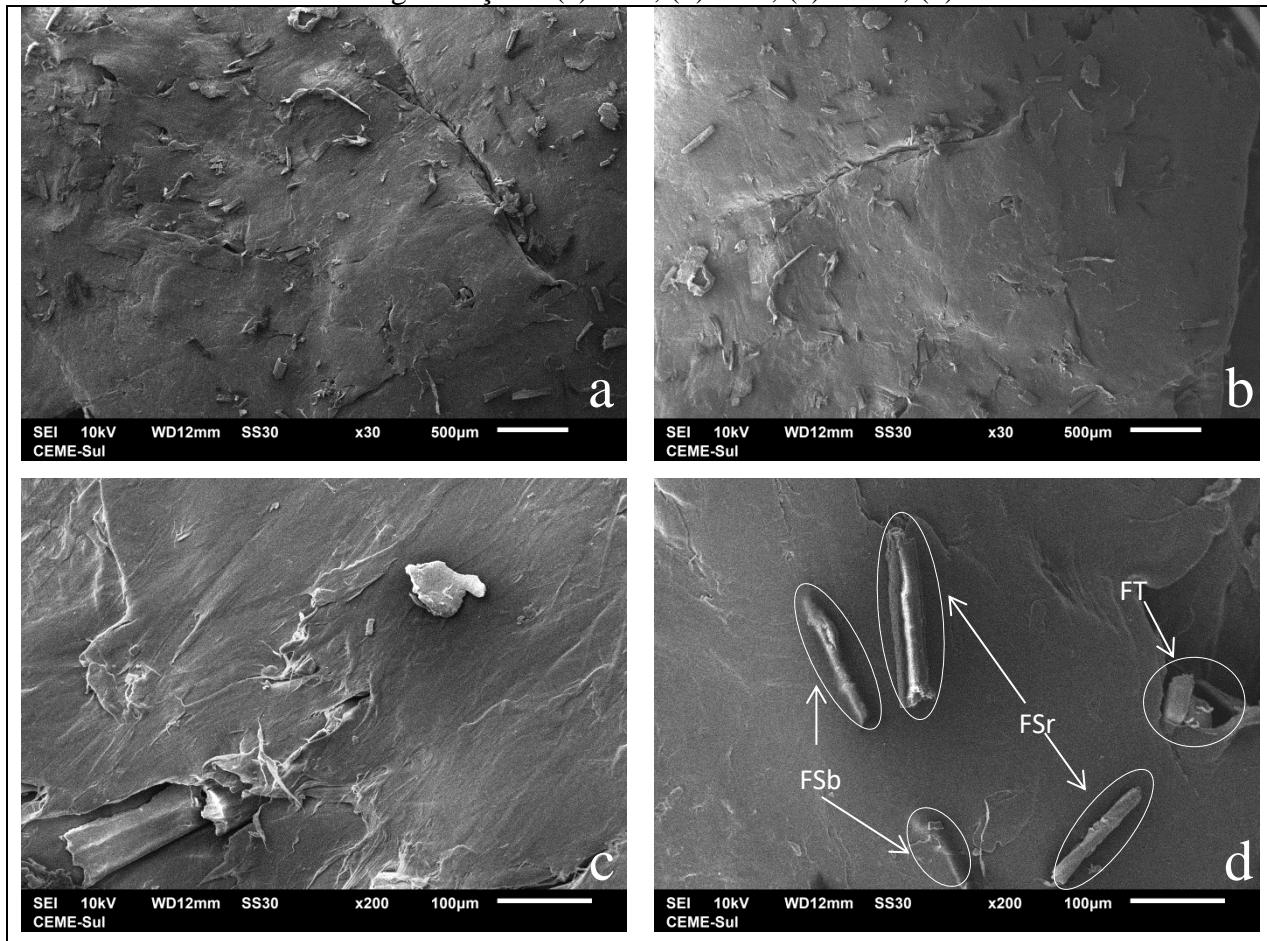
Figura 11 – Tratamentos com adição do compósito PEAD/*Pinus* spp com magnificação de 30X: (a) C10; (b) C20; (c) C30; (d) C40; (e) C50.



Legenda: AF= aglomerado de fibras, FA= fibras arrancadas, FM= fibras da matriz, FR= fibras remanescetes, J= junções.

Devido a presença das fibras lignocelulósicas e da resina ureia-formaldeído, pode ocorrer um mascaramento do compósito. De modo a verificar melhor o compósito PEAD/*Pinus* spp, a Figura 12 apresenta as micrografias da superfície do compósito, antes da incorporação nos painéis de fibras.

Figura 12 – Imagens do compósito PEAD/*Pinus* spp antes da incorporação nos painéis, em diferentes magnificações: (a) 30X; (b) 30X; (c) 200X; (d) 200X.

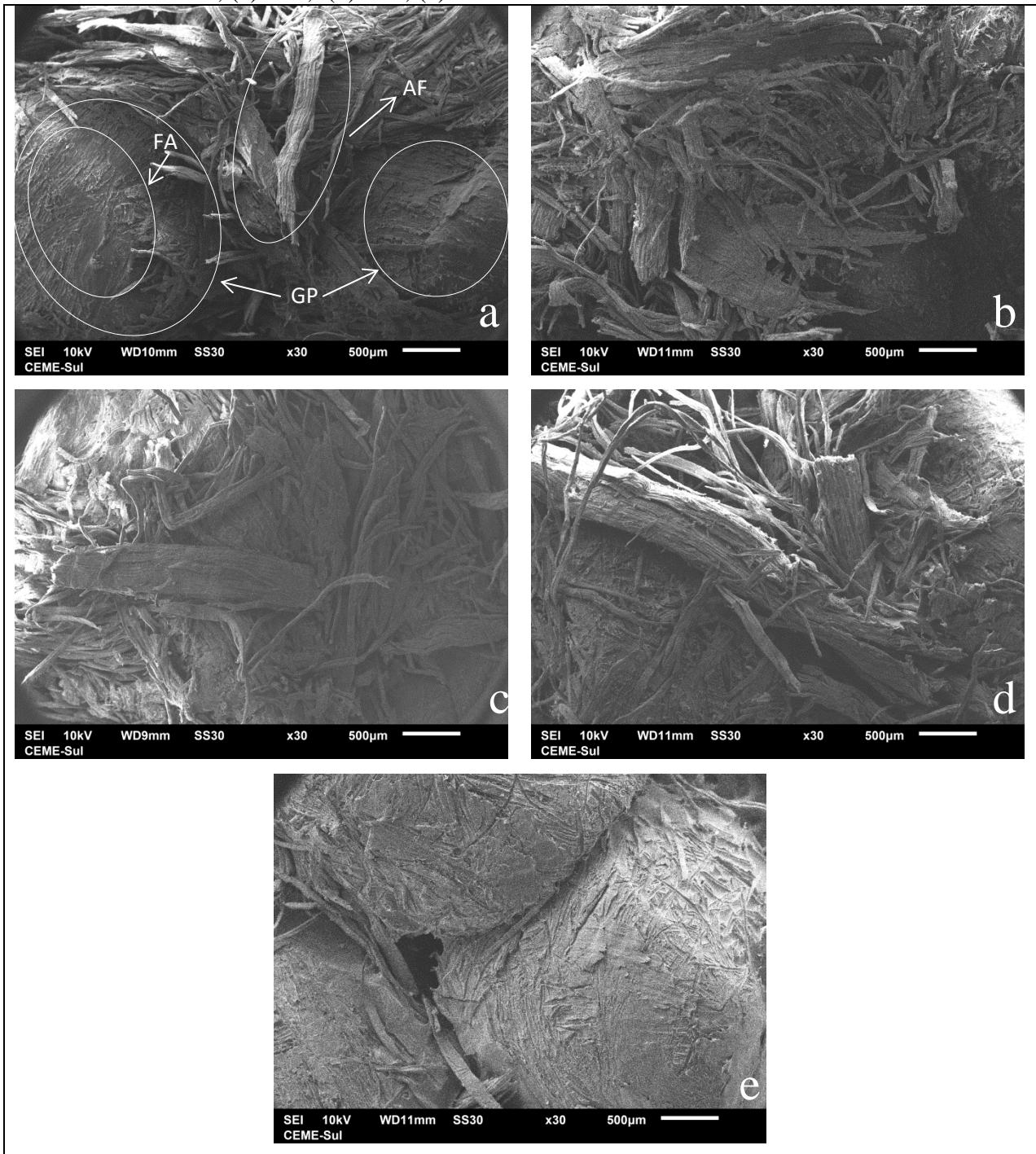


Legenda: FSb= fibra sob a matriz, FSr= fibra sobre a matriz, FT= fibra transversal.

Assim, percebe-se nas Figuras 12a e 12b, que há uma boa distribuição das fibras lignocelulósicas na matriz polimérica. Também é notável que há uma grande fragmentação das fibras lignocelulósicas que foram incorporadas na matriz. Essa fragmentação é proveniente do processamento por extrusão que causa o cisalhamento dos materiais, levando a uma diminuição do tamanho de fibra no compósito.

Já nas Figuras 12c e 12d, nota-se mais detalhadamente partes das fibras emergindo do interior da matriz. A Figura 12d apresenta na mesma imagem diferentes formas da distribuição das fibras na matriz polimérica. Na parte inferior direita, percebe-se a fibra na parte externa na matriz, enquanto na parte central inferior, é verificada uma fibra na parte interna. Na parte central, nota-se uma fibra paralela a superfície, com cobertura parcial da matriz e à sua esquerda, é visto uma fibra recoberta pela matriz polimérica, com uma pequena abertura da matriz. Além disso, na lateral direita, percebem-se dois fragmentos de fibra emergindo da transversalmente da matriz polimérica.

Figura 13 – Tratamentos com adição de PEAD puro, com magnificação de 30X: (a) P10; (b) P20; (c) P30; (d) P40; (e) P50.



Legenda: AF= aglomerado de fibras, FA= fibras arrancadas, GP= grão de PEAD.

A Figura 13 apresenta imagens dos tratamentos que receberam a adição do PEAD puro. No tratamento P10 (Figura 13a) percebe-se dois grãos de PEAD, com sulcos de fibras arrancadas durante o ensaio de tração. Na parte central da imagem, percebe-se uma grande porção de fibras aglomeradas e unidas lateralmente. Esta mesma característica também é

verificada nas Figuras 13b, 13c e 13d, nas quais os aglomerados fibrosos cobrem grande parte da imagem. Porém a Figura 13e, referente ao tratamento P50, apresenta de maneira mais detalhada a superfície de três partículas de PEAD, em que é possível perceber que há o arrancamento, quase completo das fibras da superfície, além disso, nota-se que não há a conexão entre as partículas, indicando que as partículas de polietileno podem não ter se fundido durante o processo de prensagem dos painéis.

A presença de *pull out*, que é um mecanismo de falha de desprendimento das fibras no interior da matriz, deixando vazios no polímero (GOMES et al., 2017), não foi observada pelas micrografias. Além de *pull outs*, a delaminação é outro mecanismo de falha recorrente em materiais com mais de uma fase, entretanto, este fenômeno também não foi observado a nível microestrutural.

Além de delaminação e *pull out*, Cantwell e Morton (1991) citam como principais mecanismos de falha em compósitos reforçados por fibras, a quebra intralaminar da matriz, divisão longitudinal da matriz, descolamento de fibra/matriz e fratura de fibra. Sendo o descolamento fibra/matriz e a fratura de fibra os mecanismos de fratura observados nas micrografias das Figuras 10, 11 e 13, e responsáveis pela falha dos corpos de prova no ensaio de tração perpendicular. Aggarwal et al. (2017) ressaltam que fibras com superfície lisa e a presença de vazios decorrentes de *pull out* são um indicativo de uma baixa adesão entre fibras e a matriz. Assim, a ausência de *pull outs* sugere que houve uma boa adesão entre os constituintes do painel, conforme evidenciado pela Figura 11.

Gomes et al. (2017) demonstram que a distribuição aleatória das fibras na matriz não contribui para o reforço do compósito e pode diminuir as propriedades mecânicas. Esse fenômeno ocorre pois as fibras que estão orientadas em direção a fratura não contribuem para o mecanismo de reforço. Entretanto, as fibras aleatórias promovem uma maior isotropia das propriedades (ASKELAND; PHULÉ, 2011), podendo atenuar as forças envolvidas nos processos de esforço mecânico.

3.3.6 Comparação Entre os Resultados e a Instrução Normativa Brasileira

O Quadro 1 apresenta o resumo comparativo dos resultados obtidos para cada tratamento produzido e a norma brasileira vigente para painéis de fibras de média densidade (NBR 15316:2-2015 (ABNT, 2015)).

Os valores são referentes aos painéis de fibras com faixa de espessura de 12 mm à 19 mm e densidade de 651 kg.m⁻³ à 800 kg.m⁻³.

Quadro 1 - Resumo comparativo dos valores estipulados na norma brasileira e os valores obtidos em cada tratamento.

TRATAMENTO	Inchamento em Espessura 24h [%]	Resistência à Tração Perpendicular [MPa]	Módulo de Ruptura [MPa]	Módulo de Elasticidade [MPa]
P10	17,43	0,42	24,77	2289
P20	11,26	0,60	22,98	2045
P30	8,59	0,82	22,57	1952
P40	6,64	0,56	17,25	1735
P50	4,33	0,82	15,67	1461
C10	16,44	0,42	25,81	2302
C20	10,19	0,58	23,71	1956
C30	9,31	0,42	27,63	2373
C40	6,47	0,56	28,00	2207
C50	4,32	0,54	19,26	1477
Testemunha	18,23	0,56	34,41	3304
NBR 15316:2015	12 (máximo)	0,55 (mínimo)	20 (mínimo)	2200 (mínimo)

Legenda: Os valores em negrito expressam as médias incluídas nos requisitos da norma NBR 15316:2-2015 (ABNT, 2015).

Dentre os valores obtidos nos tratamentos realizados, destaca-se o tratamento C40, sendo o único que apresentou todos os valores dentro dos requisitos mínimos indicados pela norma brasileira. Similarmente, Binoj e Bibin (2019), também definiram a proporção 40:60 como a mais vantajosa para compósitos de poliéster e fibras de *Agave tequilana*.

Tanto o tratamento P20 quanto C20 somente não se enquadram em relação ao módulo de elasticidade, estando de acordo em relação aos demais requisitos.

Todos os tratamentos se adequaram, no mínimo, à dois requisitos da norma. Para o módulo de elasticidade, somente o tratamento P10 se enquadrou à norma, dentre os tratamentos que receberam adição de PEAD puro, porém não se adequando aos requisitos de inchamento em espessura e resistência à tração perpendicular.

Ressalta-se ainda, que o tratamento Testemunha não se enquadrou no requisito de inchamento em espessura, devido a não utilização de parafina ou algum outro material hidrofóbico na fabricação dos painéis.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

3.4.1 Conclusões

O processo manual de fabricação dos painéis pode ter influenciado na diferença entre a densidade nominal e a densidade observada nos tratamentos;

Os painéis com incorporação de polímero apresentaram maior densidade;

A incorporação das cargas poliméricas influenciou positivamente na estabilidade dimensional dos painéis, demonstrado pelos ensaios de absorção de água, inchamento em espessura e taxa de não-retorno em espessura;

A inserção das cargas poliméricas atuou como um agente hidrofóbico, sendo indicada para diminuição do inchamento em espessura, especialmente em taxa a partir de 20%;

O módulo de elasticidade e de ruptura foram influenciados negativamente com o aumento do teor de PEAD puro;

Tratamentos com maiores porcentagens de adição do polímero apresentaram maiores valores de resistência à tração perpendicular, que pode ser atribuída a uma maior quantidade de resina disponível por volume de fibra, com os maiores valores para tratamentos com PEAD puro;

A maior quantidade de resina disponível por volume de fibra também pode ser relacionado com a resistência ao arrancamento de parafuso, embora não tenha sido verificada uma relação tão clara entre a resistência com o tipo ou percentual de polímero adicionado;

A análise do compósito por microscopia eletrônica de varredura, antes de ser incorporado nos painéis, possibilitou uma melhor visualização da distribuição das fibras na matriz polimérica, já que as fibras do compósito poderiam ser confundidas com as fibras dos painéis;

Nos tratamentos com PEAD puro, as imagens de MEV indicaram que existem grãos poliméricos não fundidos, demonstrando que o processo de prensagem e aquecimento dos tratamentos não foi efetivo. Já nos tratamentos com incorporação do compósito, foi observada a adesão entre os particulados poliméricos, demonstrando uma continuidade entre as partículas, devido à um processo efetivo de prensagem e aquecimento;

A incorporação do polietileno, tanto na forma pura, quanto como compósito, surge como uma alternativa para o uso de polímeros em conjunto aos produtos da indústria de painéis;

O tratamento C40 foi o que atendeu todos os requisitos na norma vigente brasileira, sendo o mais indicado para uso como alternativa aos tradicionais painéis MDF de fibras de *Pinus spp*;

De maneira geral, o uso do compósito produziu painéis com maior número de parâmetros em atendimento a norma utilizada.

3.4.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Realizar a caracterização mecânica do compósito PEAD/*Pinus spp*, de modo a avaliar a influência das fibras lignocelulósicas nas propriedades mecânicas do material extrudado;

Investigar a utilização de compósitos com diferentes tipos de matrizes poliméricas e compósitos com diferentes porcentagens de cargas de fibras lignocelulósicas;

Testar parâmetros distintos de prensagem, com variação das temperaturas de prensagem para formação do painel MDF, diferentes forças de prensagem à quente e diferentes tempos de prensagem à quente na formação e propriedades dos painéis MDF com incorporação de materiais poliméricos;

Realizar a comparação dos dados com uma testemunha utilizando parafina;

Analizar a influência da incorporação de compósitos de matriz polimérica em diferentes tipos de painéis de madeira reconstituída, como em painéis de partículas.

REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, Lakshya et al. Mixer design optimization with fractured surface topography of mechanical properties of polymer biocomposites. **Journal Of The Taiwan Institute Of Chemical Engineers**, [s.l.], v. 74, p.272-280, maio 2017. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2017.02.007>.
- AHMAD, S.h. et al. Polyester-Kenaf Composites: Effects of Alkali Fiber Treatment and Toughening of Matrix Using Liquid Natural Rubber. **Journal Of Composite Materials**, [s.l.], v. 45, n. 2, p.203-217, 15 out. 2010. SAGE Publications.
<http://dx.doi.org/10.1177/0021998310373514>.
- ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P.. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: Cengage, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15316-2:2015**: Painéis de fibras de média densidade Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2015. 78 p.
- AYRILMIS, Nadir. Enhancement of dimensional stability and mechanical properties of light MDF by adding melamine resin impregnated paper waste. **International Journal Of Adhesion And Adhesives**, [s.l.], v. 33, p.45-49, mar. 2012. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.11.001>.
- BELINI, Ugo Leandro et al. EFFECT OF Eucalyptus grandis WOOD REFINING ON THE FIBER MORPHOLOGY AND ON MDF PANELS PROPERTIES. **CERNE**, [S.l.], v. 14, n. 3, p. 227-233, set. 2008. ISSN 2317-6342. Disponível em:
<http://www.cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/view/257>. Acesso em: 18 dez. 2018.
- BELINI, Ugo Leandro; TOMAZELLO FILHO, Mario. Avaliação tecnológica de painéis MDF de madeira de Eucalyptus grandis confeccionados em laboratório e em linha de produção industrial. **Ciência Florestal**, [s.l.], v. 20, n. 3, p.493-500, 30 set. 2010. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/198050982063>.
- BELINI, Ugo Leandro et al. Pilot study for MDF manufacture from sugarcane bagasse and eucalyptus fibers. **European Journal Of Wood And Wood Products**, [s.l.], v. 70, n. 4, p.537-539, 17 set. 2011. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-011-0577-4>.
- BINOJ, J.s.; BIBIN, J.s.. Failure analysis of discarded Agave tequilana fiber polymer composites. **Engineering Failure Analysis**, [s.l.], v. 95, p.379-391, jan. 2019. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.09.019>.

CALEGARI, Eliana Paula et al. Experimental study on waterproofing MDF with castor oil-based vegetal polyurethane. **Matéria (rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 22, n. 3, p.1-10, 10 ago. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170003.0211>.

CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R.. Estudo Comparativo dos Resultados de Ensaio de Tração Perpendicular para MDF Produzido em Laboratório. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p.32-42, 2004.

CANTWELL, W.j.; MORTON, J.. The impact resistance of composite materials — a review. **Composites**, [s.l.], v. 22, n. 5, p.347-362, set. 1991. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0010-4361\(91\)90549-v](http://dx.doi.org/10.1016/0010-4361(91)90549-v).

ESPERT, Ana; VILAPLANA, Francisco; KARLSSON, Sigbritt. Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s.l.], v. 35, n. 11, p.1267-1276, nov. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.04.004>.

FLOORSAVE. **May Fibreboard - the Benefits and Disadvantages**. 2013. Disponível em: <<https://www.floorsave.co.uk/blog/fibreboard/>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

GARCIA, Rosilei A.; CLOUTIER, Alain; RIEDL, Bernard. Dimensional stability of MDF panels produced from fibres treated with maleated polypropylene wax. **Wood Science And Technology**, [s.l.], v. 39, n. 8, p.630-650, 29 set. 2005. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-005-0028-7>.

GEIMER, Robert L.. Dimensional stability of flakeboards as affected by board specific gravity and flake alignment. **Forest Products Journal**, [s.l.], v. 32, n. 8, p.44-52, 1982. Disponível em: <<https://www.fpl.fs.fed.us/documents/pdf1982/geime82c.pdf>>. Acesso em: 27 dez. 2018.

GHASEMI, Ismaeil; KORD, Behzad. Long-term Water Absorption Behaviour of Polypropylene/Wood Flour/Organoclay Hybrid Nanocomposite. **Iranian Polymer Journal**, [s.l.], v. 18, n. 9, p.683-691, ago. 2009.

GOMES, Jailton Weber et al. Absorção de água e propriedades mecânicas de compósitos poliméricos utilizando resíduos de MDF. **Polímeros**, [s.l.], v. 27, n. , p.48-55, 16 mar. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1915>.

GONÇALVES, Fabricio Gomes et al. DENSITOMETRIA DE RAIOS X NA AVALIAÇÃO DA DENSIDADE EM PAINÉIS DE PARTÍCULAS. **Ciência Florestal**, [s.l.], v. 28, n. 3, p.1151-1162, 1 out. 2018. Universidad Federal de Santa Maria.
<http://dx.doi.org/10.5902/1980509833382>. Disponível em:
<<http://www.scielo.br/pdf/cflo/v28n3/1980-5098-cflo-28-03-1151.pdf>>. Acesso em: 26 dez. 2018.

GUARARAPES. **Especificações Técnicas**. 2018. Disponível em:
<<http://www.guararapes.com.br/mdf-guararapes/#especificacoes>>. Acesso em: 18 dez. 2018.

HILL, Jayne. **MDF vs Plywood; which should you choose for your project?** 2014. Disponível em: <<https://georgehill-timber.co.uk/blog/mdf-vs-plywood-for-projects/>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **MDF – Medium Density Fiberboard – Painéis de Fibra de Média Densidade**. 2015. Disponível em: <<http://iba.org/pt/9-conteudo-pt/588-mdf-medium-density-fiberboard-paineis-de-fibra-de-media-densidade>>. Acesso em: 06 ago. 2018.

KOJIMA, Yoichi et al. Binding effect of cellulose nanofibers in wood flour board. **Journal Of Wood Science**, [s.l.], v. 59, n. 5, p.396-401, 26 maio 2013. Springer Nature.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10086-013-1348-0>.

KOJIMA, Yoichi et al. Reinforcement of wood flour board containing ligno-cellulose nanofiber made from recycled wood. **Journal Of Wood Science**, [s.l.], v. 61, n. 5, p.492-499, 20 jun. 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-015-1493-8>.

KOJIMA, Yoichi et al. Reinforcement of fiberboard containing lingo-cellulose nanofiber made from wood fibers. **Journal Of Wood Science**, [s.l.], v. 62, n. 6, p.518-525, 8 set. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-016-1582-3>. Disponível em: <<https://link-springer-com.ez66.periodicos.capes.gov.br/content/pdf/10.1007%2Fs10086-016-1582-3.pdf>>. Acesso em: 27 dez. 2018.

LINAUER, Kristi. **MDF vs. Plywood — Differences, Pros and Cons, and When To Use What**. 2014. Disponível em: <<https://www.addicted2decorating.com/mdf-vs-plywood-differences-pros-and-cons-and-when-to-use-what.html>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

LONG, Nancy. **The Pros and Cons of Medium-Density Fiberboard (MDF)**. 2016. Disponível em: <<https://sisupainting.com/pros-cons-medium-density-fiberboard-mdf/>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

MALONEY, T. M. Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing.
2.ed. São Francisco: Miller Freeman, 1993. 689 p.

MARINHO, Nelson Potenciano et al. Some physical and mechanical properties of medium-density fiberboard made from giant bamboo. **Materials Research**, [s.l.], v. 16, n. 6, p.1387-1392, 2 ago. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392013005000127>.

MELO, R.R. Estabilidade Dimensional de Compostos de Madeira. **Revista Ciência da Madeira - Rcm**, [s.l.], v. 4, n. 2, p.152-175, 30 nov. 2013. Revista de Ciencia de Madeira. <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830.v04n02a03>.

MOSLEMI, A. A. Particleboard. London: Southern Illinois University Press, 1974. 245 p.

MOU, Shanta Urmila. Advantages & Disadvantages of MDF - Fiber Board. Disponível em: <<https://civiltoday.com/civil-engineering-materials/timber/163-advantages-and-disadvantages-of-mdf>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

OLIVEIRA, J. T. S. ; FREITAS, A. R. Painéis à base de madeira. São Paulo, EPUSP, 1995. 44p. Boletim técnico do Departamento de Engenharia da Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, BT/PCC/149.

ROUGE, Vinnie. What The Heck Is MDF Anyway? 2015. Disponível em: <http://www.modgsi.com/What-The-Heck-Is-MDF-Anyway_b_24.html>. Acesso em: 20 ago. 2018.

SANTOS, Rosimeire Cavalcante dos; MENDE, Lourival Marin; MORI, Fábio Akira. Chapas de partículas aglomeradas produzidas a partir de resíduos gerados após a extração do óleo da. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 84, p.437-446, dez. 2009. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr84/cap11.pdf>>. Acesso em: 18 dez. 2018.

SASSONI, Enrico et al. Experimental study on the physical-mechanical durability of innovative hemp-based composites for the building industry. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 104, p.316-322, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.022>.

SHI, Sheldon Q.; GARDNER, Douglas J.. Hygroscopic thickness swelling rate of compression molded wood fiberboard and wood fiber/polymer composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s.l.], v. 37, n. 9, p.1276-1285, set. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.08.015>.

SHUPE, T. F.; GROOM, L. H . EBERHARFT. T. L.; RIALS, T. G.; HSE, C. Y.; PESACRETA, T. Mechanical and physical properties of composite panels manufactured from Chinese tallow tree furnish. *Forest products journal*, 2006. 13 p. (Nota Técnica, v. 56. N. 6).

SILVA, Sérgio Augusto Mello da et al. Medium density fiberboard manufactured with castor oil based polyurethane resin. **Revista Vértices**, [s.l.], v. 15, n. 1, p.7-19, 2013. Essentia Editora. <http://dx.doi.org/10.5935/1809-2667.20130002>.

SREEKALA, M.s.; KUMARAN, M.g.; THOMAS, S.. Water sorption in oil palm fiber reinforced phenol formaldehyde composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s.l.], v. 33, n. 6, p.763-777, jun. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1359-835x\(02\)00032-5](http://dx.doi.org/10.1016/s1359-835x(02)00032-5).

THE FURNITURE PEOPLE - TFP. WHAT ARE THE PROS AND CONS OF MEDIUM-DENSITY FIBREBOARD (MDF)?2017. Disponível em: <https://www.tfp.mu/index.php?route=blog/article&article_id=7>. Acesso em: 20 ago. 2018.

TORRES, Amelia Angelica Ulloa. ENVELHECIMENTO FÍSICO QUÍMICO DE TUBULAÇÕES DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE EMPREGADAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE DERIVADOS DE PETROLEO. **Puc-rio**, [s.l.], p.1-180, 2007. Faculdades Catolicas. <http://dx.doi.org/10.17771/pucrio.acad.11035>. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=11035@1&msg=28#>. Acesso em: 12 mar. 2019.

TRIANOSKI, Rosilani et al. Utilização da madeira de Cryptomeria japonica para produção de painéis aglomerados. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 97, p.57-64, mar. 2013. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr97/cap06.pdf>>. Acesso em: 26 dez. 2018.

VASSILIOU, Vassilios; BARBOUTIS, Ioannis. Screw withdrawal capacity used in the eccentric joints of cabinet furniture connectors in particleboard and MDF. **Journal Of Wood Science**, [s.l.], v. 51, n. 6, p.572-576, dez. 2005. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-005-0708-9>.

WOODSON, G. E. Properties of medium-density fiberboard related to hardwood specific gravity. In: TENTH PARTICLEBOARD SYMPOSIUM, 1976, Washington. **Proceedings**. Washington: Washington State University, 1976. p. 175-192. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/b538/044e75ad486b056f523489c6be23a2b66b57.pdf>>. Acesso em: 26 dez. 2018.