

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

EMILLY RABEL

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO: COMPÓSITO DE POLI(ÁCIDO LÁTICO)
COM CARGA DE RESÍDUO DE MADEIRA DE PINUS**

GUARAPUAVA

2023

EMILLY RABEL

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO: COMPÓSITO DE POLI(ÁCIDO LÁTICO)
COM CARGA DE RESÍDUO DE MADEIRA DE PINUS**

**OBTAINING AND CHARACTERIZATION: POLY(LACTIC ACID) COMPOSITE
WITH PINE WOOD WASTE FILLER**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Nome do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Aldo Przybysz.

Coorientador(a): Lucas Franco Wrege.

GURAPUAVA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

EMILLY RABEL

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO: COMPÓSITO DE POLI(ÁCIDO LÁTICO)
COM CARGA DE RESÍDUO DE MADEIRA DE PINUS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Nome do Curso de Engenharia Mecânica
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 12 dezembro 2023

Aldo Przybysz
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Lucas franco Wrege
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Henrique Ajuz Holzmann
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

GUARAPUAVA

2023

Dedico este trabalho à minha família, meus amigos e especialmente a minha faisquinha.

AGRADECIMENTOS

Durante os cinco anos da graduação incontáveis pessoas participaram dessa trajetória e certamente essas poucas palavras não vão abranger a todos que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Mas reforço que todos estarão sempre presentes na minha memória e gratidão.

Primeiramente gostaria de agradecer a minha família, especialmente meus pais que me apoiaram a vencer os desafios que apareceram no caminho.

Aos meus amigos, principalmente aqueles que entraram junto comigo nessa instituição onde passamos por muitas horas de estudo.

Agradeço aos meus orientadores Prof. Dr. Aldo Przybysz e Me. Lucas Franco Wrege. Por me guiarem, durante esse percurso.

Enfim, a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar e avaliar a utilização dos resíduos de madeira descartado da indústria de moldura como carga junto ao polímero Poli(ácido láctico), buscando estudar os efeitos da interação matriz/carga. Os resíduos de madeira, como material biodegradável, se apresentam viáveis para substituir cargas não renováveis e mais nocivas ao meio ambiente. O compósito foi processado utilizando a técnica de mistura termomecânica, tornando-o semelhante ao processo industrial de extrusão mecânica de polímeros. Os compósitos foram confeccionados com 5% e 10% de proporção de massa/massa. O polímero e os compósitos obtidos foram caracterizados por ensaios mecânicos de tração. Nos ensaios mecânicos de tração realizados foi notado uma queda na tensão máxima de tração em todas as amostras e referente ao módulo de elasticidade dos compósitos algumas amostras apresentaram reduções significativas de 12% e 25%. Dessa forma a adição da carga deixou os compósitos relativamente menos rígidos e quebradiços, suportando maiores deformações e conseqüentemente maior resistência a impactos deixando o PLA mais atraente para muitas aplicações que necessitam de um polímero oriundo de fontes renováveis, que pode ser utilizado nas áreas automotiva e de bens de consumo.

Palavras-chave: Poli(ácido láctico). Resíduo da Madeira. Compósito. Pó de madeira.

ABSTRACT

The present work aimed to characterize and evaluate the use of wood waste discarded from the framing industry as filler together with the Poly(lactic acid) polymer, seeking to study the effects of the matrix/filler interaction. Wood waste, as a biodegradable material, is viable to replace non-renewable loads that are more harmful to the environment. The compound was processed using a thermomechanical mixing technique, making it similar to the industrial process of mechanical polymer extrusion. The compounds were made with 5% and 10% mass/mass ratios. The polymer and compounds obtained were characterized by mechanical tensile tests. In the mechanical tensile tests carried out, a drop in the maximum tensile stress was noted in all samples and regarding the specification modulus of the compounds, some samples showed significant reductions of 12% and 25%. In this way, the addition of the filler left the compounds relatively less rigid and brittle, supporting greater deformations and consequently greater resistance to impacts, making PLA more attractive for many applications that occur from a polymer originating from renewable sources, which can be used in the automotive and of consumer goods.

Keywords: Poly(lactic acid). Wood Waste. Composite. Wood dust.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma do Processamento da Madeira.....	16
Figura 2 - Resíduos provenientes do processamento de uma tora para produzir tábuas.....	17
Figura 3 - Classificação dos polímeros	18
Figura 4 - Estrutura química de um mero de PLA.....	19
Figura 5 - Fluxograma de classificação para vários tipos de compósitos	20
Figura 6 - Fluxograma com as etapas para obtenção do compósito	23
Figura 7 - Pellets de PLA.....	24
Figura 8 - A esquerda o Pó de Madeira e a direita Serragem de Madeira Verde de Pinus.....	24
Figura 9 - Injetora de polímeros	25
Figura 10 - Molde para corpo de prova de tração	26
Figura 11 - Dimensões, em milímetros, do corpo de prova para ensaio de tração	26
Figura 12 - Misturador termomecânico de polímeros.....	26
Figura 13 - Estufa com circulação e renovação de ar	27
Figura 14 - Material passando pelo peneiramento.....	27
Figura 15 - Máquina Universal de Ensaio (a), acessórios para ensaio de tração (b)	28
Figura 16 - Corpos de prova	30
Figura 17 - Visão microscópica da ruptura do coposito	33
Gráfico 1 - Resistência à tração dos compósitos (MPa)	32
Gráfico 2 - Módulo de elasticidade dos compósitos (GPa).....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Códigos das amostras	31
Tabela 2 - Módulo de elasticidade dos compósitos (GPa).....	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Normas Brasileiras
PLA	Poli(ácido láctico)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	Setor de Molduras	15
2.2	Processamento da Madeira	15
2.2.1	Resíduos e sobras do processamento da madeira	16
2.3	Polimeros	17
2.3.1	PLA.....	19
2.4	Compósitos.....	19
2.4.1	Compósitos Poliméricos	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Materiais.....	23
3.2	Equipamentos.....	25
3.3	Processamento do composito	26
3.4	Técnicas de caracterização	28
3.4.1	Ensaio Mecânico de Tração	28
4	RESULTADOS.....	31
4.1	Corpos de Prova.....	31
4.2	Ensaio Mecanico de Tração	31
5	CONSIDERÇÕES FINAIS.....	31
	REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

É possível notar que ocorreu um aumento significativo de interesse nos últimos anos por parte das indústrias de diversas áreas como a automotiva, aeronáutica, construção civil, entre outras, pelo uso de compósitos poliméricos que utilizam biomassa vegetal como reforço ou carga em matrizes poliméricas.

Uma das opções de biomassa vegetal que vem sendo utilizadas como reforço, são os resíduos provenientes da grande quantidade de resíduos florestais e de resíduos das indústrias de transformação de madeira. Segundo o relatório desenvolvido pela Indústria Brasileira de Árvores, o Brasil está entre os principais produtores mundiais de papel, celulose e painéis de madeira, contribuindo positivamente para a balança comercial nacional com as exportações, consequentemente gerando empregos e renda no País.

O interesse no desenvolvimento de novos compósitos, está associado a alguns fatores, como substituir da utilização de recursos não renováveis, como o petróleo, para recursos naturais e renováveis. Tendo em vista que os compósitos desenvolvidos são materiais mais *ecofriendly*, pois utilizam de fases biodegradáveis ou fases em que sua produção exige menos consumo de energia.

Observa-se vantagens ao optar pelo uso de cargas celulósicas e lignocelulósicas no lugar de fibras inorgânicas, como a baixa densidade e baixa abrasão, reduzindo assim densidade dos compósitos produzidos e consequentemente diminuindo os gastos com manutenção dos equipamentos utilizados no processamento. Vale ressaltar que além de serem biodegradáveis não são nocivas à saúde, diferente das fibras de vidro por exemplo.

O PLA, polímero poli(ácido láctico), é um poliéster produzido pela polimerização do ácido láctico, gerado pela síntese química da lactonitrila ou pela fermentação bacteriana da glicose obtida de vegetais com grande quantidade de amido, como por exemplo a mandioca e a batata (REN, 2010). Por dispor de características de biodegradabilidade e biocompatibilidade, o PLA é uma alternativa viável para substituir polímeros obtidos a partir de fontes fósseis, como o petróleo.

Entretanto sua durabilidade, resistência térmica e mecânica não são suficientes para algumas aplicações que exijam mais do material, por consequência não atendem as demandas das indústrias de bens duráveis de consumo (AURAS et al., 2010).

O propósito deste trabalho é a busca por alterações nas propriedades mecânicas e térmicas do PLA, realizando o uso de pó de madeira e serragem como carga, material obtido do processamento da madeira em uma indústria de molduras. Tendo como objetivo desta monografia desenvolver e caracterizar um compósito de matriz polimérica de Poli(Ácido Lático) utilizando como carga o pó de madeira e serragem.

Dentre os objetivos específicos deste trabalho, estão tratar a serragem de madeira verde, utilizando uma estufa para a secagem e posteriormente fazer a seleção de resíduos com uniformidade de tamanho. Através da mistura termomecânica, realizar o processamento do compósito, e por fim, através dos ensaios mecânicos de tração, realizar a caracterização mecânica do compósito obtido.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Setor de Molduras

O setor de produção de molduras, utiliza do reprocessamento da madeira serrada, para que os seus produtos tenham um maior valor agregado (SILVA, 2012). Molduras, Block, blanks, pisos, pré-cortados são os principais produtos que surgem a partir do reprocessamento.

As molduras preponderantemente têm como o principal destino a indústria da construção civil, sendo usados para acabamentos internos, com elevado valor agregado e possuindo uma vasta gama de formas e especificações (ACR, 2019).

Sua comercialização em grande parte é direcionada para exportação, principalmente para o mercado Norte americano e Europeu. Segundo a Associação Catarinense de Empresas Florestais (2019), as molduras de madeira são confeccionadas na grande maioria a partir de madeira sólida de pinus, com os estados do Paraná e Santa Catarina tendo as maiores empresas nesse segmento.

2.2 Processamento da Madeira

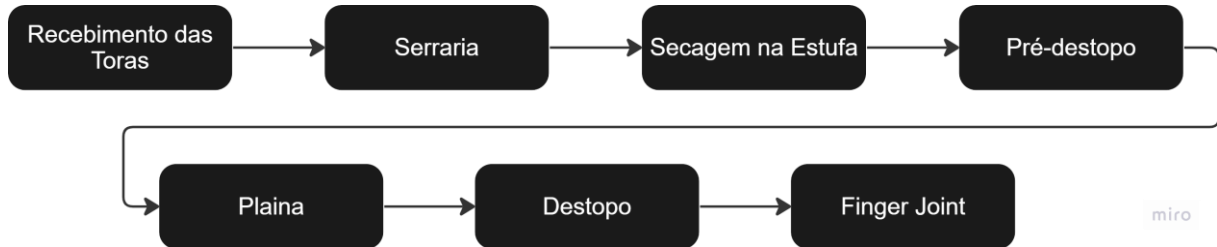
Para a produção das molduras é utilizada majoritariamente a madeira de pinus, entretanto podem ser utilizadas outras madeiras, como a do eucalipto, desde que a espécie escolhida tenha a cor e a densidade uniformes.

Conforme Olandoski, Bonduelle e Cunha (1998), o processo se inicia produtivo das molduras com a entrada das toras na serraria, de lá saem as tábuas já descascadas e com dimensões pré-definidas, seguindo para a secagem nas estufas. Depois de secas as peças de madeira passam por um pré-destopo, no qual serão cortadas em diversos comprimentos para reduzir defeitos, como a tortuosidade, auxiliando no manuseio e melhorando a capacidade da madeira trabalhar.

Quando chegam na indústria, as peças são colocadas perto das plainas, onde passam uma por vez, tendo sua largura e espessura uniformizadas. Posteriormente vão para as destopadeiras, sendo destopadas em vários comprimentos, deixando apenas as partes livres de defeitos. O material que pode aproveitado é depositado na mesa de classificação, onde são separadas conforme a demanda dos produtos. Na sequência são encaminhadas para serem unidas topo a topo em uma *finger joint*. Os blanks são formados a partir da união dos topos de clears blocks na *finger joint*,

formando assim peças mais longas (NUHUZ, 2002). Na figura 1 é possível visualizar o fluxograma do processo.

Figura 1 – Fluxograma do Processamento da Madeira



Fonte: Autoria própria (2022)

2.2.1 Resíduos e sobras do processamento da madeira

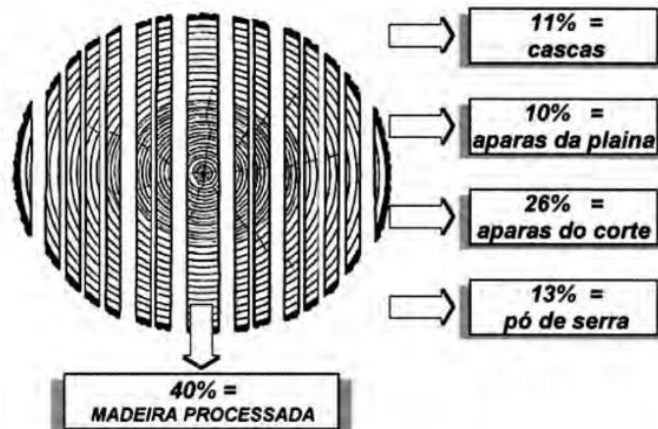
Segundo Barbosa (2001), um significativo indicador de sustentabilidade que está diretamente ligado a classificação dos materiais no que se refere ao impacto ao meio ambiente é a quantidade de resíduos sólidos gerados no processo, levando em conta a capacidade de reutilização e reciclagem do material, no final do processo de produção ou em cada uma das etapas da cadeia produtiva.

Durante a produção da madeira serrada para qualquer um dos seus fins, gera-se um volume expressivo de sobras e resíduos provenientes dos processos que as toras passam até chegarem ao produto final. Observa-se que tanto do ponto de vista ambiental como econômico, a criação de projetos que envolvem incentivos e facilidades, para agregar valor aos resíduos criando linhas de aproveitamento deles. É possível calcular o volume de resíduos gerados no processamento da madeira realizando a diferença entre o volume de madeira em toras que entra na serraria e o volume de madeira serrada que sai. Diversos fatores podem influenciar o volume de resíduos gerados durante o processo, como:

- matéria-prima florestal de má qualidade;
- adoção de técnicas menos apuradas de desdobro;
- utilização de velocidade de corte incorreta;
- falta de qualificação do operador do processo;
- ferramentas de corte inadequadas;
- Secagem de forma inadequada da madeira serrada.

Tendo em vista o processo de transformação de tora com casca em tábuas, é considerado um aproveitamento quantitativo de aproximadamente de 40%, e os outros 60% tornam-se resíduo do processo, sendo divididos conforme é mostrado na figura 2.

Figura 2 - Resíduos provenientes do processamento de uma tora para produzir tábuas



Fonte: Adaptado (FERREIRA, 1989)

Pode-se observar na figura 2 que 11% estão nas cascas, 10% nas aparas de plaina, 26% nas aparas do corte e 13% pó de serra (FERREIRA et al., 1989).

2.3 Polimeros

Segundo Canevarolo (2006), um polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) de unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente, fazendo jus a origem da palavra que vem do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição). O monômero é matéria prima para a produção de um polímero, ou seja, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição. Os polímeros são divididos em três grupos: Plásticos, Borrachas e Fibras. Ainda sobre o mesmo autor a definição de polímeros:

“Material orgânico (ou inorgânico) de elevada massa molar (acima de dez mil, podendo chegar a dez milhões), cuja estrutura consiste na repetição de pequenas unidades (meros). Macromolécula formada pela união de moléculas simples ligadas por ligação covalente.” (CANAVAROLO, 2006, p. 21)

A produção de polímeros se inicia com a criação de monômeros, que podem ser obtidos a partir de três grandes grupos: os produtos naturais, o carvão mineral e o

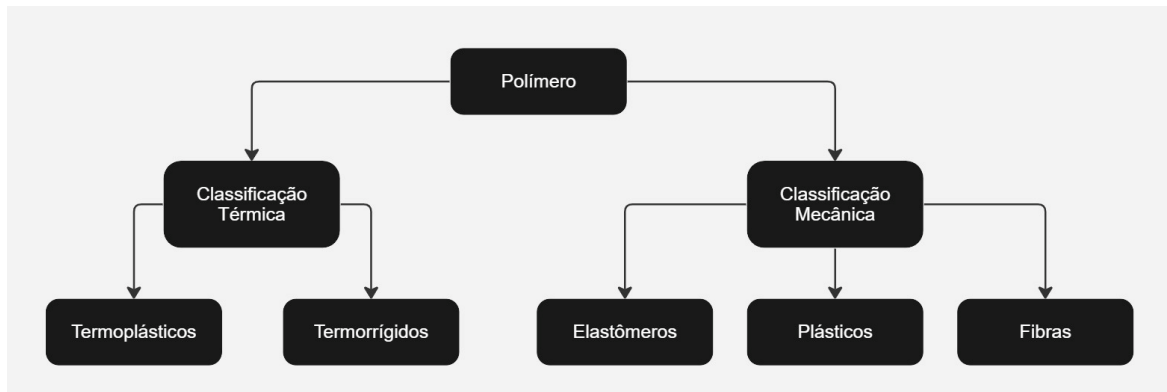
petróleo, utilizados nas reações de polimerização (CANEVAROLO, 2006). Pode se classificar os polímeros de diferentes formas. Quanto a sua estrutura molecular, quanto ao número de metros e quanto ao comportamento mecânico.

A estrutura molecular dos polímeros pode ser classificada como lineares, ramificados, com ligações cruzadas ou reticulados. Segundo Callister (2012), os polímeros lineares são aqueles em que as unidades repetidas estão ligadas lado a lado do início ao fim da cadeia, apresentam a forma de um espaguete. Polímeros ramificados são polímeros que apresentam ramificações em suas cadeias principais. Essas ramificações são consideradas parte da molécula da cadeia principal, e influenciam diretamente no empacotamento e na massa específica do polímero. Polímeros com ligações cruzadas são polímeros com cadeias lineares que estão unidas umas às outras através de ligações cruzadas covalentes em diversas posições. Essas ligações são geradas durante sua síntese e são irreversíveis. Polímeros reticulados são polímeros que apresentam um grande número de ligações cruzadas formando uma rede tridimensional. Em geral, não são compostos por apenas um tipo estrutural específico.

Também existe a divisão entre termorrígidos e termoplásticos, onde os termorrígidos, só se solidificam por aquecimento e/ou pressão, fazendo com que eles possuam a estrutura do tipo reticulada, com fortes ligações covalentes, do tipo cruzadas. Por conta de suas ligações os polímeros termorrígidos não são facilmente fundidos, o que dificulta sua reciclagem. Já os termoplásticos podem se fundir através do aquecimento e solidificar conforme resfriam, tornando uma ótima opção para processos reversíveis, e tornando sua reciclagem e reutilização, mais viável. (MANO e MENDES, 1999; CANEVAROLO, 2006)

Na figura 3 pode se visualizar as possíveis classificações dos polímeros de acordo com suas características térmicas e mecânicas.

Figura 3 - Classificação dos polímeros



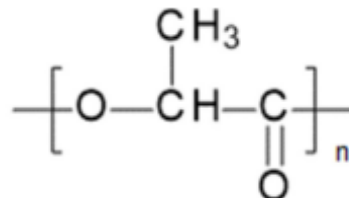
Fonte: Adaptado de (CANEVAROLO, 2006)

2.3.1 PLA

Para minimizar o impacto ambiental gerado pelo descarte indevido de resíduos plásticos uma das estratégias utilizadas é o uso de polímeros biodegradáveis. O poli(ácido láctico) (PLA) é um polímero biodegradável com elevada resistência mecânica e alto módulo de elasticidade, e uma baixa deformação.

O PLA é um poliéster alifático, termoplástico, semicristalino ou amorfo, biodegradável e biocompatível, que pode ser obtido da sintetização de fontes renováveis como milho, batata e cana-de-açúcar. Ele é uma alternativa viável para substituir polímeros convencionais como polietileno (PE) e polipropileno (PP) (KOPINKE, 1996; CASARIN, 2012). Sua degradação no meio ambiente é relativamente rápida, de seis semanas a dois anos. A estrutura molecular do PLA está ilustrada na Figura 4.

Figura 4 - Estrutura química de um mero de PLA



Fonte: Stefaniak e Masek (2021)

2.4 Compósitos

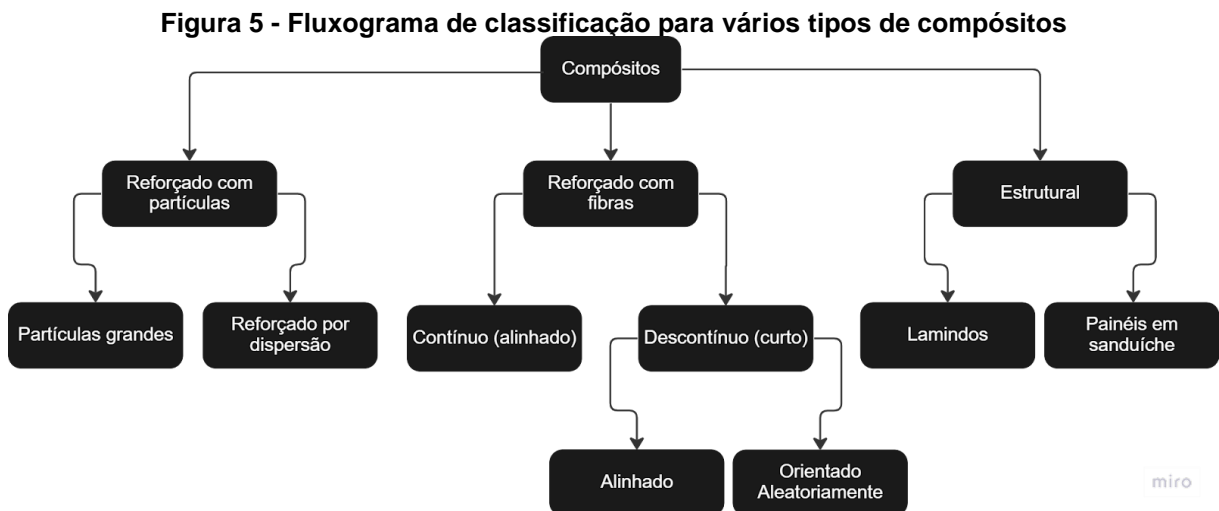
Os compósitos são misturas macroscópicas de fases, com morfologias distintas onde a fase contínua é chamada de matriz, geralmente ela é o constituinte

menos rígido, envolvendo a fase descontínua (formada por fibras, partículas ou laminados). O objetivo ao desenvolver um material compósito é o de chegar nas melhores combinações de propriedades que cada um dos componentes pode oferecer (CALLISTER, 2007).

Algumas das propriedades que podem ser melhoradas no desenvolvimento dos compósitos são por exemplo a rigidez, tenacidade, resistência à corrosão, estabilidade térmica, inércia química e densidade, variando de acordo com a combinação escolhida polímero/reforço (WIEBECK e HARADA, 2005). De acordo com Callister (2007), outros fatores que interferem nos compósitos além das propriedades dos materiais constituintes são a geometria, a distribuição uniforme das fases, a interação entre o reforço e polímero. O autor também afirma que materiais compósitos podem ser classificados em:

- compósitos fibrosos, onde várias fibras são distribuídas em uma matriz;
- compósitos particulados, várias são partículas distribuídas em uma matriz;
- compósitos estruturais, são camadas laminadas de vários materiais usando a combinação de até três formas.

Na figura 5, é apresentado o fluxograma da classificação dos compósitos:



2.4.1 Compósitos Poliméricos

Compósitos poliméricos podem possuir dois tipos de matrizes termoplásticas e termorrígidas. As matrizes têm o papel de manter as fibras unidas, distribuindo uniformemente a carga aplicada garantindo a sustentação do material. A relação entre

os componentes acontece por conta do envolvimento do polímero da matriz com cada filamento de fibra, evitando danos superficiais nelas (CALLISTER, 2007).

Os termoplásticos têm as propriedades diretamente influenciadas pelo grau de cristalinidade, morfologia e orientação da rede polimérica, e essas estão relacionadas às condições de processamento dos materiais (NETO e PARADINI, 2006; SAWPAN, PICKERING e FERNYHOUGH, 2011).

A interface entre o reforço e a matriz é tão importante quanto as propriedades específicas de seus componentes principais, reforço e matriz, ajudando a explicar o comportamento de um compósito, a interface é considerada por muitos o terceiro componente de um compósito (NETO e PARADINI, 2006; REZENDE, COSTA e BOELHO, 2011).

Porém pesquisas atuais vêm mostrando que para certas aplicações, as fibras naturais têm apresentado um bom desempenho nas indústrias automotiva, moveleira, de componentes eletrônicos, aeroespacial, embalagens, construção civil e outras diversas aplicações (OKSMAN; SKRIFVARS e SELIN, 2003; BENGTSSON, BAILLIF e OKSMAN, 2007 ; ZHAO et al., 2010; SINGH, MOHANTY e MISRA, 2010).

Estudos referentes à utilização de PLA junto às fibras naturais apontam que a utilização das fibras, em uma matriz de PLA, varia de 0 a 50 % em massa de fibra. É possível observar que para obter às propriedades mecânicas (resistência à tração, ao impacto e à flexão) com os melhores resultados, foram obtidos nos compósitos que usavam valores perto ao de 30 % em massa de fibra. Também muitas vezes são utilizados agentes de acoplamento para melhorar a adesão entre matriz polimérica, geralmente hidrofóbica, e fibra natural, geralmente hidrofílica (Af RAÚJO, WALDMAN e DE PAOLI, 2008; BLEDZKI, JASZKIEWICZ, 2010; MANSOR et al., 2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

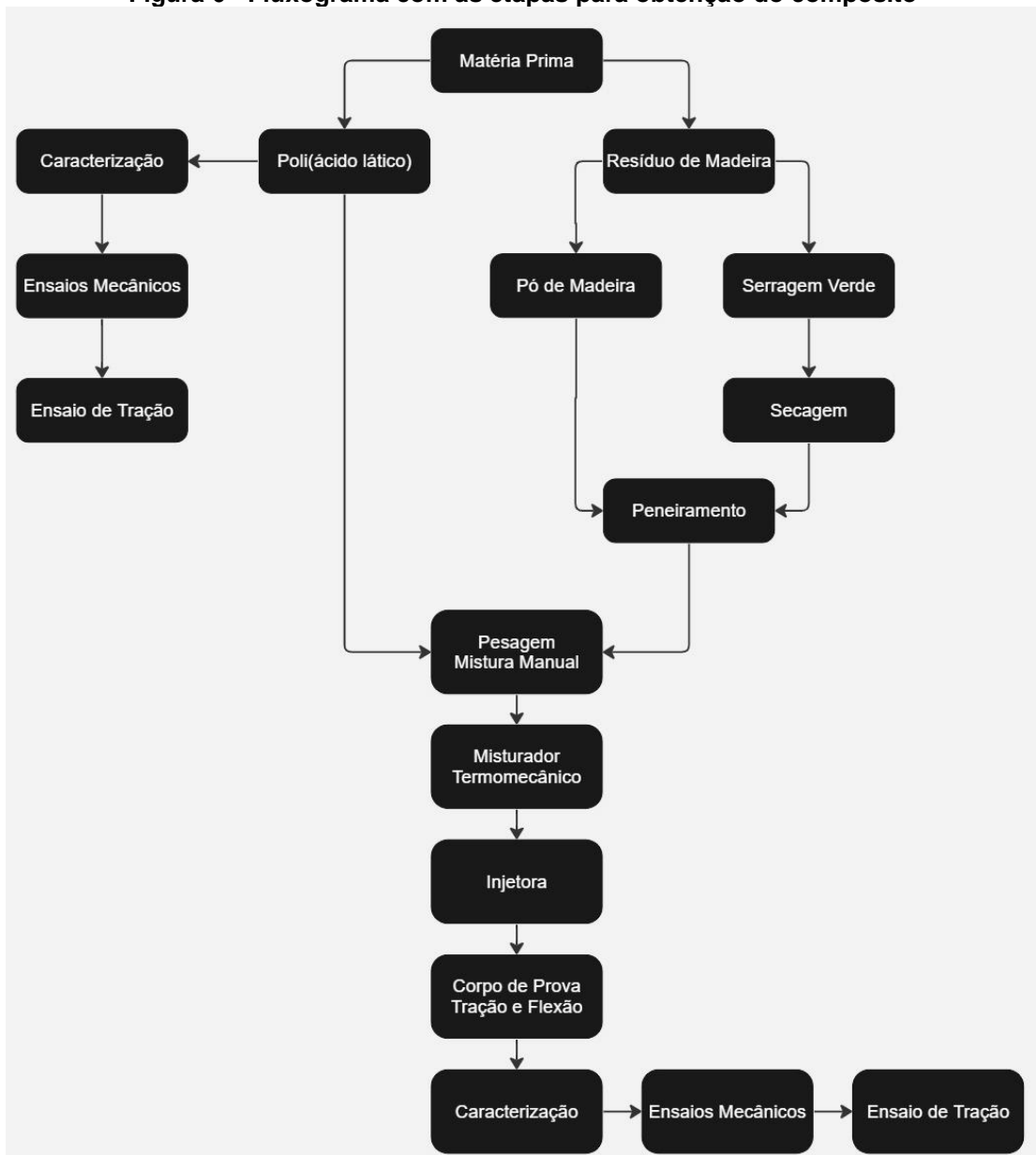
Nesse capítulo será exposto os materiais, procedimentos de tratamento da serragem verde, processamento do compósito e técnicas de caracterização.

A mistura e homogeneização do polímero poli(ácido láctico) junto a carga de resíduos de madeira, foi realizada por meio de processo termomecânico, isto é, pela fusão do polímero com a carga em câmara aquecida, onde um rotor realizou a agitação da massa carga/polímero simultaneamente ao aquecimento, chegando a um composto homogêneo, onde na sequência ele será adicionado em uma injetora para a formação dos corpos de prova de tração, seguindo a norma ASTM D638 (2022).

A extrusora dupla rosca é a mais indicada para este processo pois se assemelha ao processo de fabricação industrial, em que a mistura e peletização do compósito é feito por ela. Como não foi possível encontrar uma extrusora dupla rosca de pequeno porte na região, um equipamento de mistura foi desenvolvido especialmente para essa finalidade.

A figura 6 apresenta o fluxograma do processo.

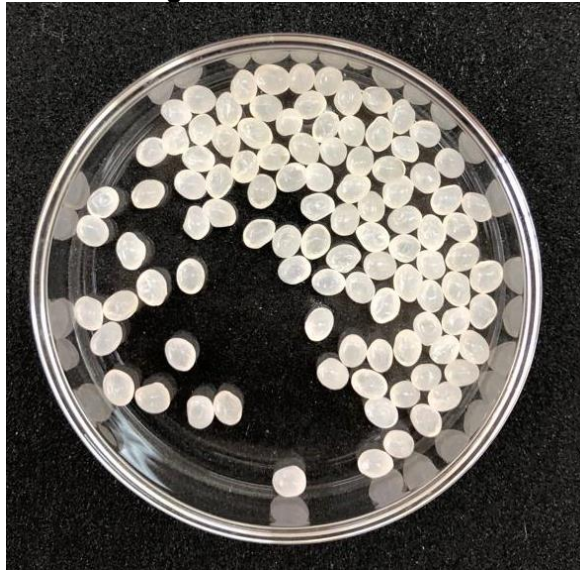
Figura 6 - Fluxograma com as etapas para obtenção do compósito



Fonte: Autoria própria

3.1 Materiais

Polímero Poli(ácido láctico) – PLA obtido do laboratório da UTFPR, do campus de Guarapuava, estado do Paraná, em forma de pellets, os quais foram armazenados em recipiente fechado, longe de fontes de calor, para evitar a contaminação, absorção de umidade e alterações na sua estrutura.

Figura 7 - Pellets de PLA

Fonte: Autoria própria

Tanto o pó de madeira quanto a serragem de madeira verde de pinus, foram coletados de uma empresa madeireira da região, ambos foram armazenados em recipientes fechados, longe de fontes de calor, para evitar a contaminação, absorção de umidade e alterações na sua estrutura.

Figura 8 - A esquerda o Pó de Madeira e a direita Serragem de Madeira Verde de Pinus

Fonte: Autoria própria

3.2 Equipamentos

Para o processamento do compósito foi necessário a utilização de dois equipamentos desenvolvidos por Wrege (2022).

Uma injetora de polímeros: com capacidade de injeção de até 25 g de pellets e uma pressão de trabalho de 40 bar, com acionamento hidráulico, temperatura ajustável até 300 °C. Permitindo a injeção dos corpos de provas de acordo com a norma ASTM D638 (2022), para a correta caracterização mecânica do compósito.

Figura 9 - Injetora de polímeros

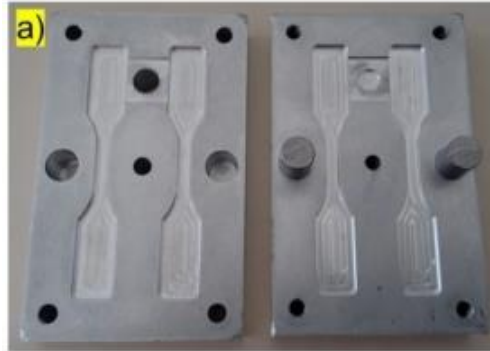


Fonte: (WREGE, 2022)

Os moldes para os corpos de prova foram produzidos em alumínio 6001, que foram usinados utilizando um Centro de Usinagem CNC modelo D600 da marca ROMI, que pertence a UTFPR Câmpus Guarapuava. O projeto do molde, assim como a geração do código G para execução da usinagem, foram realizados utilizando o software CAD/CAM da Autodesk® Fusion 360®, em sua licença acadêmica.

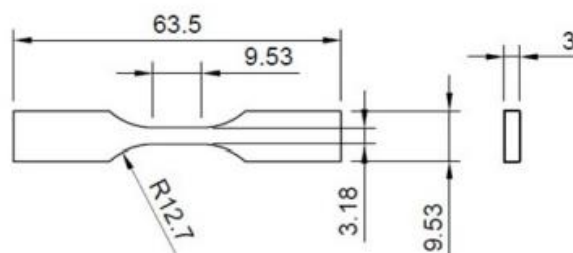
Foi escolhido um corpo de prova do modelo do tipo V, para o ensaio de tração, presente na norma ASTM D638, já que ele tem dimensões menores, reduzindo a quantidade de material necessário na injeção, as Figuras 9 e 10 apresentam os moldes usinados e as dimensões, em milímetros, dos corpos de prova de acordo com normas descritas acima.

Figura 10 - Molde para corpo de prova de tração



Fonte: (WREGE, 2022)

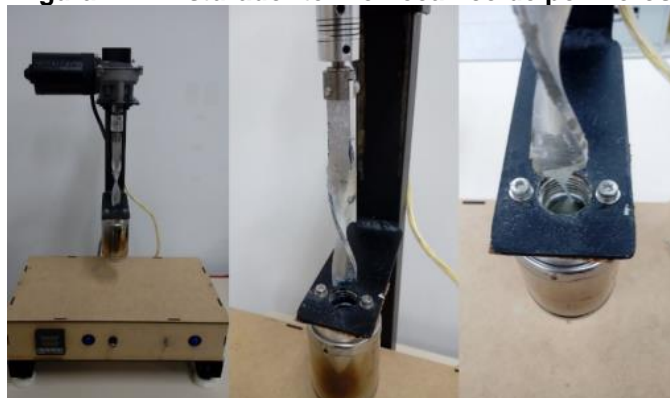
Figura 11 - Dimensões, em milímetros, do corpo de prova para ensaio de tração.



Fonte: (WREGE, 2022)

E também utilizado um misturador de polímero por fusão, com capacidade de fusão de até 15g de pellets, temperatura máxima de operação de 250 °C, rotor com velocidade variável de até 75 RPM.

Figura 12 - Misturador termomecânico de polímeros



Fonte: (WREGE, 2022)

3.3 Processamento do composto

Para iniciar o processamento do composto, garantindo assim a uniformidade da granulometria das amostras foi realizada a secagem da serragem de madeira verde na estufa com circulação e renovação de ar, modelo TE-394/1, marca TECNAL. O

material permaneceu nela durante 24 horas a temperatura de 100 °C com circulação de ar.

Figura 13 – Estufa com circulação e renovação de ar



Fonte: Autoria propria

Posteriormente os resíduos passaram pelo peneiramento, figura 14, tanto a estufa quanto as peneiras utilizadas pertencem a UTFPR Câmpus Guarapuava. Os resíduos escolhidos para carga passaram pelas peneiras e as granulometrias escolhidas, para o pó de madeira foi utilizada 150 μm e 212 μm e para serragem 300 μm e 600 μm .

Figura 14– Material passando pelo peneiramento



Fonte: Autoria própria

Foram realizadas oito misturas de compósitos, uma usando o pó de madeira e outro com serragem de diferentes granulometrias, ambos foram mixados manualmente a princípio aos pellets de PLA utilizado, da marca NatureWorks®, modelo 4043D, para ajudar a melhor dispersão inicial, em sequência foi processado na misturadora por fusão, com percentuais de massa/massa de 5% e 10%.

Após mixada a massa foi repartida manualmente em partes menores, se aproximando ao tamanho dos pellets de PLA, para utilização na injetora hidráulica. O processo de injeção consiste na adição de aproximadamente 15 gramas do compósito

no cilindro de aquecimento da injetora, a temperatura de 185 °C, é necessário aguardar cerca de 15 minutos para que aconteça fusão do polímero e seja possível injetá-lo em um molde a 40 bar de pressão, com retenção de 5 segundos. Inicialmente a temperatura do molde é igual a ambiente, durante o processo de injeção sua temperatura se eleva, sendo resfriado com ar comprimido, para acelerar a solidificação da peça injetada.

Foram utilizados de 3 a 4 corpos de prova de cada compósito para levantamento de dados e análise estatística, a partir dos valores encontrados foi realizada uma média aritmética.

Para garantir uma estabilização térmica e de cristalização, os corpos de prova obtidos, foram deixados em temperatura ambiente por 48 horas, antes de serem ensaiados.

3.4 Técnicas de caracterização

3.4.1 Ensaio Mecânico de Tração

Os corpos de prova foram submetidos a caracterização mecânica, por meio de ensaios de tração, utilizando uma Máquina Universal de Ensaio, marca EMIC, modelo DL30000.

Foram analisados nos ensaios de tração os dados de tensão máxima na tração e módulo de elasticidade, utilizando célula de carga de 5 kN, velocidade do ensaio de 5 mm/min constantes, para um corpo de prova do tipo V da norma ASTM D638, em temperatura ambiente.

Figura 15 - Máquina Universal de Ensaios (a), acessórios para ensaio de tração (b)



Fonte: (WREGE, 2022)

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de mecânicos, assim como a sua discussão com a literatura disponível.

4.1 Corpos de Prova

Figura 16 - Corpos de prova



Fonte: Autoria Própria

Os nomes dos novos compósitos podem ser compreendidos observando a tabela 1.

Tabela 1: Códigos das amostras

P5F	PO DE MADEIRA + FINO 5%
P10F	PO DE MADEIRA + FINO 10%
P5N	PO DE MADEIRA NORMAL 5%
P10N	PO DE MADEIRA NORMAL 10%
S5F	SERRAGEM DE MADEIRA + FINO 5%
S10F	SERRAGEM DE MADEIRA + FINO 10%
S5N	SERRAGEM DE MADEIRA NORMAL 5%
S10N	SERRAGEM DE MADEIRA NORMAL 10%

Fonte: Autoria própria

Os compósitos obtidos, a partir dos dois tipos de carga apresentaram alteração em sua coloração, obtendo um tom marrom, semi opaco quando utilizado com uma quantidade de 5% de carga, chegando a um composto totalmente opaco quando utilizado com 10% de carga.

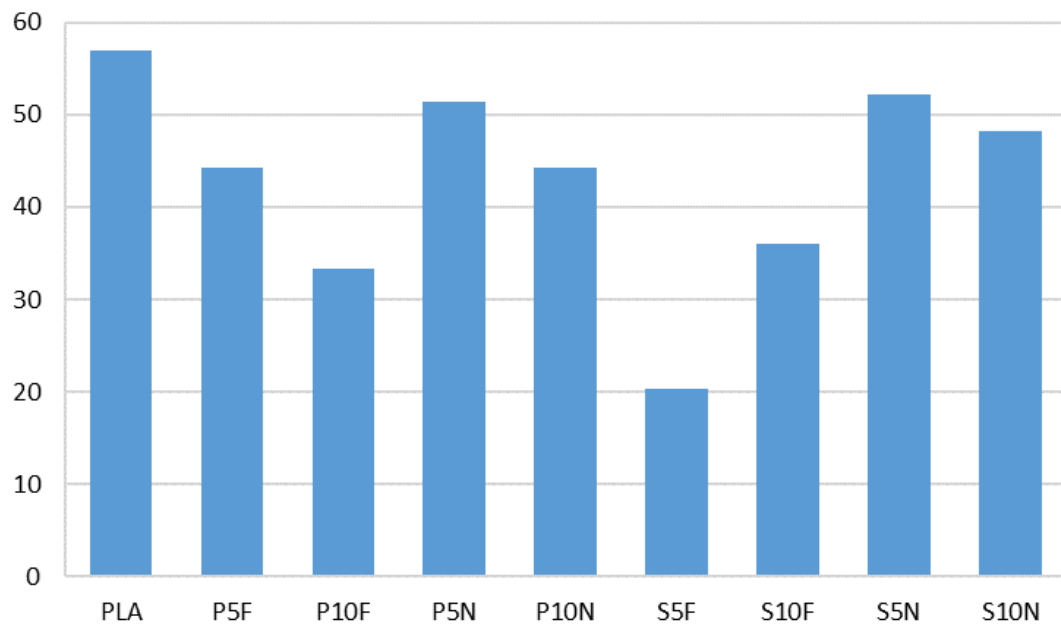
4.2 Ensaio Mecânico de Tração

Para realizar o ensaio de tração, foi seguida a norma ASTM D638 (2022) o qual se utilizou para a análise de resistência mecânica dos compósitos obtidos.

O grafico 1 apresenta a tensão máxima de tração, com os valores médios obtidos e suas variações a partir do desvio padrão.

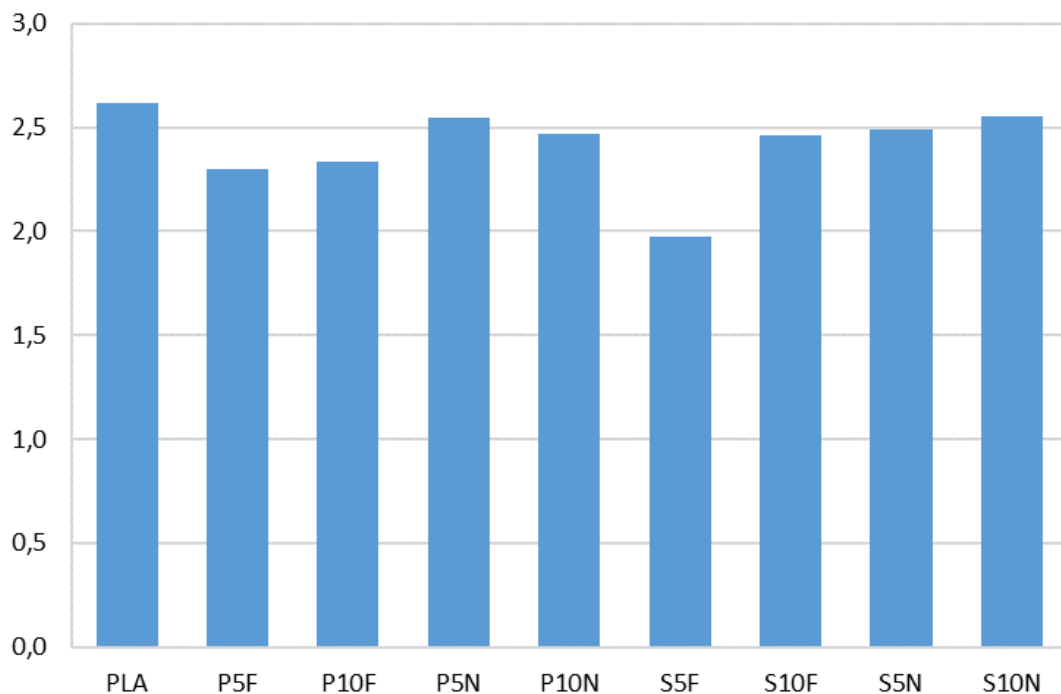
No gráfico se pode verificar que os compósitos apresentaram redução na tensão máxima a tração em relação ao PLA puro, uma das possíveis causas da queda é a maior ocorrência de discordâncias no interior do polímero. Dos resultados obtidos os compósitos que apresentaram o melhor desempenho foram o P5N e S5N, porém eles ainda ficaram abaixo dos resultados do polímero puro.

Com exceção dos compósitos que foram obtidos usando a granulometria maior, ambas amostras de serragem e pó de madeira, todos os demais apresentaram perda de resistência à tração quando utilizado carga em massa/massa maiores que 5 % e de granulometria menor. O padrão se repete para os dois tipos de carga, isso pode estar relacionado a crescente dificuldade na homogeneização da carga junto ao polímero, acarretando em aglomerados com maior ocorrências de discordâncias, resultando na ruptura antecipada do compósito.

Gráfico 1: Resistência à tração dos compósitos (MPa)

Fonte: Autoria própria

O gráfico 2 apresenta o módulo de elasticidade, com os valores médios obtidos.

Gráfico 2: Módulo de elasticidade dos compósitos (GPa)

Fonte: Autoria própria

Com relação ao módulo de elasticidade, pode-se observar que ocorreu certa estabilidade e redução pontual em algumas amostras. Essa redução do módulo de

elasticidade, se traduz em um material mais dúctil, dessa forma menos rígida, sendo assim da perspectiva mecânica essas características são bem interessantes, pois a baixa resistência à deformação é uma desvantagem do PLA.

As amostras do compósito S5F e P5F, apresentaram uma redução respectiva de até 25% e 12% no valor do módulo, apontando que essas amostras suportariam maiores deformações e conseqüentemente maior resistência a impactos, ou seja, deixaram os compósitos relativamente menos rígidos e quebradiços.

A Tabela 1 tras os resultados numéricos, junto a taxa de variação de cada tipo de compósito, sobre o valor obtido do polímero PLA puro, sem cargas.

Tabela 2: Módulo de elasticidade dos compósitos (GPa).

Material	Resistência a tração dos compósitos (Mpa)	Variação (%)	Módulo de elasticidade dos compósitos (Gpa)	Variação (%)
PLA	56,940	0,0%	2,620	0,0%
P5F	44,330	9,1%	2,297	3,4%
P10F	33,368	24,1%	2,334	10,8%
P5N	51,430	8,6%	2,543	2,8%
P10N	44,190	9,6%	2,470	1,6%
S5F	20,317	6,7%	1,973	0,9%
S10F	35,958	0,6%	2,462	5,1%
S5N	52,238	3,1%	2,492	3,8%
S10N	48,273	7,2%	2,553	3,4%

Fonte: Autoria própria

Na figura 17 é possível visualizar o local da ruptura de um dos corpos de prova visto com microscópio, onde é visível a adesão das fibras ao PLA.

Figura 17 - Visão microscópica da ruptura do coposito.



Fonte: Autoria própria

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que a utilização como carga da serragem de madeira e do pó de madeira em conjunto ao polímero Poli(ácido láctico), altera as suas propriedades e mecânicas.

É apresentado nos ensaios mecânicos de tração uma queda na tensão máxima de tração em todas as amostras, as que se mantiveram mais estáveis são a P5N e S5N e atingiram uma redução de 25% no módulo de elasticidade do compósito S5F.

No geral, a adição da carga deixou os compósitos relativamente menos rígidos e quebradiços, suportando maiores deformações e conseqüentemente maior resistência a impactos deixando o PLA mais atraente para muitas aplicações que necessitam de um polímero oriundo de fontes renováveis, que pode ser utilizado nas áreas automotiva e de bens de consumo.

O presente trabalho demonstra que a serragem de madeira e pó de madeira de pinus oriundos indústria madeireira, pode ser usado como carga em um compósito com matriz de PLA, porém um aprofundamento na melhora da adesão entre carga e matriz deve ser estudado.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 10004. **Resíduos Sólidos – Classificação**, 2004.

ARAÚJO, J.R.; WALDMAN, W.R.; De PAOLI, M.A. **Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibers: Coupling agent effect**. *Polymer Degradation and Stability*, n.93, p.1770-1775, 2008.

ASTM D638-14. **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**, 2014.

ASTM D790-10. **Standart Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**, 2010.

AURAS, R. et al. **Poly(Lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications**. [s.l.] Wiley Series, 2010.

BARBOSA, J. C.; INO, A. **Madeira, material de baixo impacto ambiental na construção - análise do ciclo da vida**. In: ENCONTRO NACIONAL E ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 2., Canela. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2001. p. 139-146.

BENGTSSON, M.; LE BAILLIF, M.; OKSMAN, K. **Extrusion and mechanical properties of highly filled cellulose fiber-polypropylene composites**. *Composites: Part A*, 38, p.1922- 1931, 2007.

BLEDZKI, A.K.; JASZKIEWICZ, A. **Mechanical performance of biocomposites based on PLA and PHBV reinforced with natural fibers – A comparative study to PP**. *Composites Science and Technology*, 70, p. 1687 – 1697, 2010.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. Grupo GEN, 2020. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637325/>. Acesso em: 26 set. 2022.

CALLISTER, W. D. Jr. **Materials Science and Engineering, an Introduction. 7ª ed.**, 2007.

CANEVAROLO JR., S. **Ciência dos Polímeros**, Artliber Editora, 2ª edição, São Paulo, 2006.

CASARIN, A. S. AGNELLI J. A. M. **Blendas PHB/Copoliésteres Biodegradáveis – Biodegradação em Solo. Polímeros**, vol. 23, n. 1, p. 115-122, 2012.

CHEUNG, H.Y.; LAU, K.T.; POW, Y.F.; ZHAO, Y.Q.; HUI, D. **Biodegradation of a silkworm silk/PLA composite**. *Composites: Part B* n.41, p. 223–228, 2010.

FERREIRA, C. E. M.; CARRASCO, E. V. M.; HELMEISTER, J. C. **Tecnologia de adesivos poliuretanos: propriedades e aplicações em madeiras**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 3., São Carlos. Anais... São Carlos: LaMEM/EESC-USP, 1989. p. 39-74.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBA 2020**. São Paulo: IBÁ, 2020.

IWAKIRI, S., SILVA, L.S., TRIANOSKI, R., et al., **“Avaliação do potencial de utilização da madeira de Schizolobium amazonicum “Paricá” e Cecropia hololeuca “Embaúba” para produção de painéis cimentomadeira”**, *Cerne*, v.18, n. 2, pp. 303-308, abr./jun. 2012

KOPINKE, F.D.; REMMLER, M; MACKENZIE K.; MILDER, M.; WACHSEN, O. **Thermal decomposition of biodegradable polyesters -11. Poly(lactic acid). Polymer Degradation and Stability**. v. 53, p. 329-342, 1996.

MANO, Eloisa B.; MENDES, Luis C. **A natureza e os polímeros**. Editora Blucher, 2013. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521207405/>. Acesso em: 16 out. 2022.

MANSOR, M.K.L.; IBRAHIM, N.A.; YUNUS, W.MD.Z.W.; RATNAM, C.T. **Effect Of Triacetin On The Mechanical Properties, Morphology and Water Absorption Of Poly(Lactic Acid)/Tapioca Starch Composites**. Malaysian Polymer Journal, v. 6, n. 2, p 165-175, 2011

NAHUZ, M. A. R. PMVA. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 68, dez. 2002

NETO, F.L; PARADINI, L.C. **Compósitos Estruturais, Ciência e Tecnologia**. Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1ª edição, 2006.

OKSMAN, K.; SKRIFVAR, M.; SELIN, J.F. **Natural fibers as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites**. Composites Science and Technology, v.63, p. 1317-1324, 2003.

OLANDOSKI, D. P.; BONDUELLE, G. M.; CUNHA, A. B. **Os custos da má qualidade na secagem de madeira em estufa. 1998**. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1998_ART066.pdf . Acesso em: 10 nov. 2022.

REN, J. **Biodegradable Poly(Lactic Acid): Synthesis, Modification, Processing and Applications**. [s.l.] Springer, 2010. v. 148.

SAWPAN, M.A.; PICKERING, K.L.; FERNYHOUGH, A. **Improvement of mechanical performance of industrial hemp fibre reinforced polylactide biocomposites**. Composites Part A, v.42, p.310-319, 2011.

SINGH, S.; MOHANTY, A.; MISRA, M., **Hybrid bio-composite from talc, wood fiber and bioplastic: Fabrication and characterization**. Composites Part A, V.41, p.304-312, 2010.

STEFANIAK, K.; MASEK, A. **Green copolymers based on poly(Lactic acid)—short review**. Materials, v. 14, n. 18, 2021

WIEBECK, H. & HARADA, J. **Plásticos de Engenharia**. Artliber: São Paulo, 2005.

WREGGE, Lucas Franco. **Lodo Primário do Processamento de Papel como Carga em Compósito de Poli(Ácido Láctico): Obtenção e Caracterização**. Guarapuava, v.

1, f. 95, 2022. 95 p Dissertação (Química) - Universidade Estadual do Centro Oeste, Guarapuava, 2022.

ANEXO A - Lei n. 9.610, de 19 de fevereiro de 1998



**Presidência da República
Casa Civil
Subchefia para Assuntos Jurídicos**

LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998¹.

Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

O PRESIDENTE DA REPÚBLICA Faço saber que o Congresso Nacional decreta e eu sanciono a seguinte Lei:

Título I - Disposições Preliminares

Art. 1º Esta Lei regula os direitos autorais, entendendo-se sob esta denominação os direitos de autor e os que lhes são conexos.

Art. 2º Os estrangeiros domiciliados no exterior gozarão da proteção assegurada nos acordos, convenções e tratados em vigor no Brasil.

Parágrafo único. Aplica-se o disposto nesta Lei aos nacionais ou pessoas domiciliadas em país que assegure aos brasileiros ou pessoas domiciliadas no Brasil a reciprocidade na proteção aos direitos autorais ou equivalentes.

Art. 3º Os direitos autorais reputam-se, para os efeitos legais, bens móveis.

Art. 4º Interpretam-se restritivamente os negócios jurídicos sobre os direitos autorais.

Art. 5º Para os efeitos desta Lei, considera-se:

I - publicação - o oferecimento de obra literária, artística ou científica ao conhecimento do público, com o consentimento do autor, ou de qualquer outro titular de direito de autor, por qualquer forma ou processo;

II - transmissão ou emissão - a difusão de sons ou de sons e imagens, por meio de ondas radioelétricas; sinais de satélite; fio, cabo ou outro condutor; meios óticos ou qualquer outro processo eletromagnético;

III - retransmissão - a emissão simultânea da transmissão de uma empresa por outra;

IV - distribuição - a colocação à disposição do público do original ou cópia de obras literárias, artísticas ou científicas, interpretações ou execuções fixadas e fonogramas, mediante a venda, locação ou qualquer outra forma de transferência de propriedade ou posse;

V - comunicação ao público - ato mediante o qual a obra é colocada ao alcance do público, por qualquer meio ou procedimento e que não consista na distribuição de exemplares;

VI - reprodução - a cópia de um ou vários exemplares de uma obra literária, artística ou científica ou de um fonograma, de qualquer forma tangível, incluindo qualquer armazenamento permanente ou temporário por meios eletrônicos ou qualquer outro meio de fixação que venha a ser desenvolvido;

VII - contrafação - a reprodução não autorizada;

VIII - obra:

a) em co-autoria - quando é criada em comum, por dois ou mais autores;

b) anônima - quando não se indica o nome do autor, por sua vontade ou por ser desconhecido;

c) pseudônima - quando o autor se oculta sob nome suposto;

d) inédita - a que não haja sido objeto de publicação;

e) póstuma - a que se publique após a morte do autor;

f) originária - a criação primígena;

g) derivada - a que, constituindo criação intelectual nova, resulta da transformação de obra originária;

h) coletiva - a criada por iniciativa, organização e responsabilidade de uma pessoa física ou jurídica, que a publica sob seu nome ou marca e que é constituída pela participação de diferentes autores, cujas contribuições se fundem numa criação autônoma;

i) audiovisual - a que resulta da fixação de imagens com ou sem som, que tenha a finalidade de criar, por meio de sua reprodução, a impressão de movimento, independentemente dos processos de sua captação, do suporte usado inicial ou posteriormente para fixá-lo, bem como dos meios utilizados para sua veiculação;

IX - fonograma - toda fixação de sons de uma execução ou interpretação ou de outros sons, ou de uma representação de sons que não seja uma fixação incluída em uma obra audiovisual;

X - editor - a pessoa física ou jurídica à qual se atribui o direito exclusivo de reprodução da obra e o dever de divulgá-la, nos limites previstos no contrato de edição;

XI - produtor - a pessoa física ou jurídica que toma a iniciativa e tem a responsabilidade econômica da primeira fixação do fonograma ou da obra audiovisual, qualquer que seja a natureza do suporte utilizado;

XII - radiodifusão - a transmissão sem fio, inclusive por satélites, de sons ou imagens e sons ou das representações desses, para recepção ao público e a transmissão de sinais codificados, quando os meios de decodificação sejam oferecidos ao público pelo organismo de radiodifusão ou com seu consentimento;

XIII - artistas intérpretes ou executantes - todos os atores, cantores, músicos, bailarinos ou outras pessoas que representem um papel, cantem, recitem, declamem, interpretem ou executem em qualquer forma obras literárias ou artísticas ou expressões do folclore.

Art. 6º Não serão de domínio da União, dos Estados, do Distrito Federal ou dos Municípios as obras por eles simplesmente subvencionadas.

¹ Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19610.htm.