

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**Kaue Filipe Vergara**

**COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS  
DE PEBD COM PÓ DE SERRA PENSADOS EM CHAPAS POR COMPRESSÃO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**Londrina  
2019**

**Kaue Filipe Vergara**

**COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS  
DE PEBD COM PÓ DE SERRA PENSADOS EM CHAPAS POR COMPRESSÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Rosário  
Coorientador: Prof. Dr. Jean Halison de Oliveira

**Londrina  
2019**



---

## Apêndice 11 TERMO DE APROVAÇÃO

**Kaue Filipe Vergara**

### **COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS DE PEBD COM PÓ DE SERRA PENSADOS EM CHAPAS POR COMPRESSÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 11 de julho de 2019 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Francisco Rosário  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

---

Prof. Dr. Fabio Cezar Ferreira  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

---

Prof. Carlos Roberto Peraro  
(Colégio Estadual Antônio Garcez Novaes)

---

Profª. Drª. Silvia Midori Higa  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)  
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

*Dedico à Deus e minha família.*

## **Agradecimentos**

Primeiramente quero agradecer a Deus.

Aos meus pais Sergio e Roseli, minha vó Irene e irmão César, por todo suporte que me deram ao longo de toda a minha vida.

Aos meus amigos que estiveram ao meu lado, me ajudando sempre.

Ao meu orientador Prof Dr Francisco, obrigado por toda ajuda, ensinamentos e contribuições.

Ao meu co-orientador Prof Dr Jean, obrigado por toda ajuda, ensinamentos e contribuições.

À Prof. Dra Joice Erica Motezuki e Rodrigo Fior pela assistência e auxílio durante o trabalho.

Enfim a todos que se fizeram presentes, direta ou indiretamente, durante esse período.

## Resumo

VERGARA, Kaue. F. **Comparação Entre As Propriedades Mecânicas Dos Compósitos De PEBD Com Pó De Serra Prensados Em Chapas Por Compressão**. 2019. 39 F. Trabalho de conclusão de curso - Curso Superior em Bacharelado de Engenharia de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019.

A utilização de compósitos reforçados com pó de serra e outras fibras naturais tem aumentado, devido ao apelo ambiental, baixo custo, reciclabilidade e aplicações em diversos ramos da indústria. Pesquisas recentes têm como objetivo melhorar as propriedades dos compósitos termoplásticos reforçados com pó de serra. O presente trabalho utilizou polietileno de baixa densidade junto com pó de serra com o objetivo de avaliar as suas propriedades mecânicas através de ensaio de tração em 3 diferentes granulometrias e diferentes formulações assim como as características estruturas com base nos resultados espectroscópicos. Dessa forma, os resultados obtidos indicaram que ao inserir o pó de serra sobre a matriz de PEBD elevou a rigidez do material comparado com o polímero puro, atingindo maior valor na maior concentração da fase dispersa, utilizando partículas obtidas com *mesh* 48. Já os resultados de Limite de Resistência à Tração diminuíram em função da presença das partículas.

**Palavras-chave:** Compósitos. Polietileno de baixa densidade. Pó de serra.

## Abstract

VERGARA, Kaue. F. **Comparison Between Mechanical Properties of PEBD Composites with Sawdust Pressed on Hot Compression**. 2019. 39 P. Monography (Graduation) - Bachelor's Degree in Materials Engineering. Federal Technological University of Paraná, Londrina, 2019.

The use of composites reinforced with sawdust and other natural fibers has increased because of the environmental appeal, low cost, recyclability and applications in various branches of industry. Recent research aims to improve the properties of thermoplastic composites reinforced with sawdust. The present work used low density polyethylene with sawdust with the objective of evaluating its mechanical properties through tensile testing in 3 different granulometries and different formulations as well as the structural characteristics based on the spectroscopic results. In this way, the results indicated that the insertion of saw dust on the LDPE matrix increased the stiffness of the material compared to the pure polymer, reaching a higher value in the higher concentration of the dispersed phase, using particles obtained with mesh 48. The results of tensile strength decreased as a function of the presence of the particles.

**Keywords:** Composites. Low density polyethylene. Sawdust

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquema de compósitos com diferentes tipos de reforços. . . . .	11
Figura 2 – Exemplos de resíduos de madeira utilizados na produção de compósitos	16
Figura 3 – Micrografias dos compósitos PPr e pó de madeira sem (a) e com (b) compatibilizante . . . . .	16
Figura 4 – Autoclave (A) e Hidroclave (B) utilizados em processos de moldagem de compósitos poliméricos . . . . .	17
Figura 5 – Placas de compósito Polipropileno/Sisal confeccionadas por compressão à quente (a) PPpuro (b) C15% (c) C25% . . . . .	18
Figura 6 – Comportamento das amostras de PEBD Puro no ensaio de tração .	21
Figura 7 – Comportamento da curva média do PEBD Puro no ensaio de tração	22
Figura 8 – Comportamento do compósito PEBD/SW150-15 no ensaio de tração	23
Figura 9 – Comportamento do compósito PEBD/SW150-30 no ensaio de tração	23
Figura 10 – Comportamento do compósito PEBD/SW150-45 no ensaio de tração	24
Figura 11 – Comportamento das curvas médias dos compósitos PEBD/SW150 no ensaio de tração . . . . .	26
Figura 12 – Comportamento das curvas médias dos compósitos PEBD/SW150 e do PEBD Puro no ensaio de tração . . . . .	27
Figura 13 – Comportamento das curvas médias dos compósitos PEBD/SW150 e do PEBD Puro no ensaio de tração . . . . .	27
Figura 14 – Comportamento do compósito PEBD/SW48-15 no ensaio de tração	28
Figura 15 – Comportamento do compósito PEBD/SW48-30 no ensaio de tração	29
Figura 16 – Comportamento do compósito PEBD/SW48-45 no ensaio de tração	29
Figura 17 – Comportamento das curvas médias dos compósitos PEBD/SW48 no ensaio de tração . . . . .	31
Figura 18 – Comportamento das curvas médias dos compósitos PEBD/SW48 e do PEBD Puro no ensaio de tração . . . . .	32
Figura 19 – Comportamento das curvas médias dos compósitos PEBD/SW48 e do PEBD Puro no ensaio de tração . . . . .	32
Figura 20 – Espectros de infravermelho por transformada de fourier (FTIR) obtidos através das diferentes amostras dos compósitos e do PEBD Puro . . . . .	34



## Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação das propriedades entre termoplásticos e termorrígidos.	15
Tabela 2 – Formulações dos materiais desenvolvidos . . . . .	19
Tabela 3 – Propriedades de Modulo de Elasticidade e Limite de Resistencia à Tração de amostras de PEBD Puro . . . . .	22
Tabela 4 – Propriedades de Modulo de Elasticidade e Limite de Resistencia à Tração de compósitos de PEBD combinado com Pó de <i>Serramesh 150</i>	25
Tabela 5 – Propriedades de Modulo de Elasticidade e Limite de Resistencia à Tração de compósitos de PEBD combinado com Pó de <i>Serramesh 48</i>	30
Tabela 6 – Propriedades de Modulo de Elasticidade e Limite de Resistencia à Tração do PEBD Puro e de compósitos de PEBD combinado com Pó de <i>Serrame</i> . . . . .	33

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b> . . . . .	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos</b> . . . . .	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> . . . . .	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> . . . . .	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais Compósitos</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>3.2</b>	<b>Compósitos de Termoplásticos</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>3.3</b>	<b>PEBD</b> . . . . .	<b>15</b>
<b>3.4</b>	<b>Pó de madeira</b> . . . . .	<b>15</b>
<b>3.5</b>	<b>Processamento de compósitos</b> . . . . .	<b>16</b>
3.5.1	Compressão à quente . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Materiais e Métodos</b> . . . . .	<b>19</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiais</b> . . . . .	<b>19</b>
<b>4.2</b>	<b>Métodos</b> . . . . .	<b>19</b>
<b>4.3</b>	<b>Caracterizações</b> . . . . .	<b>20</b>
4.3.1	Ensaio de Tração . . . . .	20
4.3.2	Caracterização por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussão</b> . . . . .	<b>21</b>
<b>5.1</b>	<b>Resultados</b> . . . . .	<b>21</b>
5.1.1	Dados do ensaio de Tração . . . . .	21
5.1.2	Dados do ensaio de FTIR . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Conclusão</b> . . . . .	<b>35</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>36</b>

## 1 Introdução

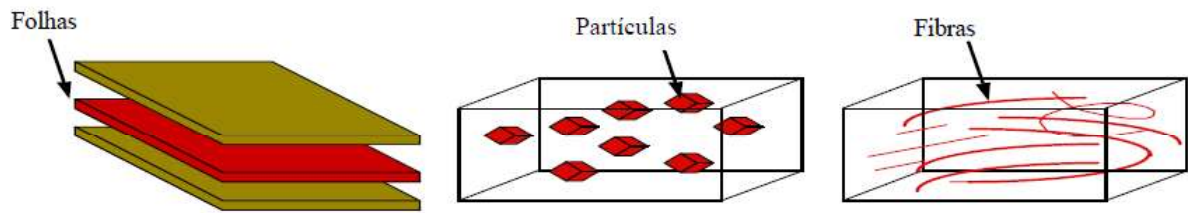
Com o crescente desenvolvimento tecnológico são precisos materiais cada vez mais eficientes e baratos de modo que possam atender as exigências do mercado. Por conta disso o estudo dos materiais compósitos vem crescendo cada vez mais, já que o material compósito consegue obter de dois materiais distintos outro material com características favoráveis que somente um deles isolado não apresentaria, materiais compósitos são aqueles que possuem pelo menos dois componentes ou duas fases, com propriedades físicas e químicas nitidamente distintas, em sua composição. Separadamente os constituintes do compósito mantêm suas características, porém quando misturados eles formam um composto com propriedades impossíveis de se obter com apenas um deles. Uma filosofia chave na seleção de materiais compósitos é de que eles devem fornecer o ‘melhor dos dois mundos’ (ou seja, as propriedades atraentes de cada componente) (TWE, 2003).

Os compósitos compreendem uma classe de materiais que a cada dia ganha mais importância tecnológica sua preparação visa imprimir melhores propriedades aos materiais. Quando um material é preparado usando materiais de natureza distinta é denominado compósito. Uma prancha de surfe é um exemplo típico de um compósito onde fibras de vidro são embebidas em um polímero. O concreto que apresenta uma boa resistência à compressão e baixa resistência à tração pode formar um compósito com o aço, que tem boa resistência à tração (BLEDZKI et al, 2001).

A natureza também tem os seus próprios compósitos, a madeira apresenta suas células envoltas em lignina, que confere propriedades como elevada resistência ao impacto, à compressão e à dobra. Sendo um material multifásico, um compósito exibe além das propriedades inerentes de cada constituinte, propriedades intermediárias decorrentes da formação de uma região interfacial (SILVA, 2014).

O compósito se divide em duas fases, matriz (pode ser de cerâmica, polimérica ou metálica) e a fase dispersa (pode ser fibras ou partículas que servem como carga). A matriz geralmente é um material contínuo que envolve a fase dispersa. As propriedades de um compósito são decorrentes de fatores como a geometria da fase dispersa, distribuição, orientação e também da compatibilidade interfacial entre os constituintes da mistura. É necessário que haja uma afinidade entre os materiais que foram unidos, pois devem trabalhar juntos respondendo aos esforços físicos do meio. Por isso é muito importante conhecer as propriedades químicas e físicas dos diferentes materiais que foram unidos. Como, as propriedades das interfaces destes materiais (NETO et al, 2007). A Figura 1 mostra esquematicamente as fases de um compósito.

**Figura 1 – Esquema de compósitos com diferentes tipos de reforços.**



Fonte: (SILVA, 2014, adaptado).

A utilização de compósitos reforçados com fibras naturais é o reflexo das preocupações com as questões ambientais, como a poluição causada por resíduos que não são biodegradáveis ou não podem ser incinerados, bem como as mudanças climáticas devido às emissões de CO<sub>2</sub> associadas aos processos de utilização intensiva de energia. Adicionalmente, vale também lembrar que estas fibras provêm de fontes renováveis, além de serem abundantes, de baixo custo e possuírem um conjunto relevante de propriedades mecânicas (CROCKER, 2008).

Nos compósitos com fibras vegetais as moléculas de água absorvidas pelas fibras atuam como plastificantes atuando nas fibras, na matriz e na interface simultaneamente. Podem ocorrer descolamentos na interface fibra/resina pelo desenvolvimento de bolsas de pressão osmótica na superfície da fibra devido ao lixiviamento de substâncias solúveis em água da superfície da fibra. Desta forma, a degradação do compósito ocorre devido não apenas à degradação dos constituintes individuais, matriz e fibra, mas também devido à perda de interface entre eles. Além de causar a diminuição das propriedades mecânicas a umidade pode ainda expor o compósito à ação de bactérias e fungos (SHACKELFORD, 2008).

Os compósitos poliméricos utilizando diferentes tipos de cargas são sempre uma alternativa no desenvolvimento de novos materiais, principalmente devido à possibilidade de modificação nas propriedades do polímero e ampliação do seu uso (ORELLANA et al., 2014). Nesse contexto, o polipropileno (PP) é um dos polímeros comerciais mais utilizados do mercado em produtos manufaturados em plásticos e tem despertado interesse de pesquisadores no estudo de misturas de PP com diversas cargas inorgânicas (RODRIGUES, 2009; SILVA et al., 2012). A obtenção de compósitos com matriz de PP tem sido uma forma de aumentar a sua utilização, considerando que o mesmo atinge cerca de 20% da produção mundial de poliolefinas e que seu potencial de reciclagem e baixo custo torna-o mais atraente comercialmente. Portanto, a procura de novas aplicações é o que tem motivado o interesse em melhorar suas propriedades por meio da mistura com cargas, formando os compósitos (SUN et al., 2005; ELLIS, 2003).

Nas últimas décadas a busca por materiais ecologicamente corretos tem

desenvolvido materiais de matrizes poliméricas com fibras naturais. A princípio as fibras naturais apresentaram poucas vantagens, pois geralmente as propriedades mecânicas são pioradas ou se mantêm quase inalteradas. No entanto a necessidade de custos mais baixos faz permanecer o interesse por estas fibras, que são originadas de fontes renováveis, possuem baixa densidade, menor abrasão causada nas máquinas de processamento e também por terem a capacidade de boa adesão à matriz. Em compósitos reforçados por fibras, tem-se um mecanismo de reforço por transferência de tensões da matriz polimérica às fibras que, são mais resistentes e apresentam módulo mais elevado do que o da matriz. O uso destas fibras em compósitos estruturais tem crescido no setor industrial (SILVA, 2014).

Assim, este trabalho apresenta um estudo sobre os conceitos na área de compósitos com foco nos compósitos termoplásticos desenvolvidos através de polietileno de baixa densidade com adição de pó de serra como reforço. Visando avaliar as suas propriedades mecânicas, ensaios de tração serão realizados em diferentes granulometrias e diferentes formulações, assim como análise espectroscópica para o estudo das características estruturais. Sendo o compósito de polietileno de baixa densidade reforçado com pó de serra um material com versatilidade para diversas aplicações, cada um com suas propriedades bem definidas e de acordo com a sua utilização, em diversos segmentos.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo Geral**

Reaproveitar resíduos de madeira descartados por indústrias utilizando-os como carga junto ao PEBD para testar as propriedades mecânicas do material.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar espectroscopicamente o compósito de PEBD e pó de serra.
- Estudar o comportamento mecânico do compósito por tração.

## **3 Revisão Bibliográfica**

### **3.1 Materiais Compósitos**

Segundo Jones (1999) e Mazumdar (2001) os compósitos são definidos como materiais multifásicos, que apresentam propriedades significativas das fases que o constituem. O material obtido possui uma melhor combinação de propriedades que não poderia ser alcançada com qualquer um dos constituintes agindo isoladamente.

Os compósitos são materiais formados por uma fase contínua, chamada de matriz, e por uma fase dispersa que é descontínua. A fase dispersa é aquela que contém o material de reforço, geralmente constituído por fibras ou partículas. A matriz pode ser composta por materiais metálicos, cerâmicos ou poliméricos, bem como a fase de reforço (ASTM, 2016).

Uma característica própria dos compósitos é a versatilidade de aplicações em função do largo espectro de propriedades físicas, químicas e mecânicas que podem ser obtidas pela combinação de diferentes tipos de matrizes e pelas várias opções de formas e tipos de reforços (LEVY NETO, 2006).

### **3.2 Compósitos de Termoplásticos**

Väisänen e Pickering (2016) citam que os materiais poliméricos utilizados como matrizes em compósitos podem ser classificados em termorrígidos ou termoplásticos. O fator limitante para a utilização de um polímero como matriz em compósitos reforçados com fibras naturais é a temperatura de processamento, a qual deve geralmente ser inferior a 200 °C para evitar a degradação térmica das fibras naturais.

Os polímeros termoplásticos apresentam uma série de vantagens sobre os termorrígidos, uma vez que os termorrígidos após passarem pelo processo de cura apresentam reticulação das cadeias poliméricas o que inviabiliza seu processo de reciclagem através de métodos mecânicos, tais como a moagem e posterior reprocessamento. Os termoplásticos por sua vez podem ser reciclados através de métodos mecânicos possibilitando a fabricação de novos produtos originando assim sua reinserção em novos ciclos de consumo (PICKERING, 2016). A Tabela 1 apresenta as principais características de polímeros termoplásticos e termorrígidos.

**Tabela 1 – Comparação das propriedades entre termoplásticos e termorrígidos.**

<b>Termoplásticos</b>	<b>Termorrígidos</b>
Reciclável mecanicamente	Não reciclável mecanicamente
Alta viscosidade quando fundido	Baixa viscosidade durante o processamento
Tempo ilimitado de armazenamento	Tempo limitado de armazenamento
Baixa resistência à fluência	Alta resistência à fluência
Temperatura de uso limitada à Tg e Tm. Baixa estabilidade térmica e dimensional	Alta resistência térmica e dimensional.

Fonte: (SANTOS, 2006)

### 3.3 PEBD

O PEBD tem uma combinação única de propriedades: tenacidade, alta resistência ao impacto, alta flexibilidade, boa processabilidade, estabilidade e propriedades elétricas notáveis. Apesar de ser altamente resistente à água e a algumas soluções aquosas, inclusive a altas temperaturas, o PEBD é atacado lentamente por agentes oxidantes. Além disso, apresenta muitas ramificações, as moléculas podem conter alguns monômeros de eteno, até centenas de milhares de monômeros. Os produtos desse material têm baixa reatividade química e são termoplásticos, isto é, sujeitos à mudança reversível de fase pela ação do calor (CANEVAROLO JR, 2006).

### 3.4 Pó de madeira

Kim *et al.* (2009) avaliaram o efeito de diferentes espécies de madeira nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno. Os autores observaram que os compósitos apresentaram resistência a tração variando entre 24 e 28 MPa e módulo elástico entre 2,8 e 3,7 GPa com a incorporação de 50% de pó de madeira. Os autores propõem que as diferenças observadas nas propriedades mecânicas podem ser provocadas por alterações na adesão interfacial uma vez que as diferentes espécies apresentam variações na sua composição. A Figura 2 mostra alguns exemplos de resíduos de madeira utilizados como reforços em matrizes poliméricas.



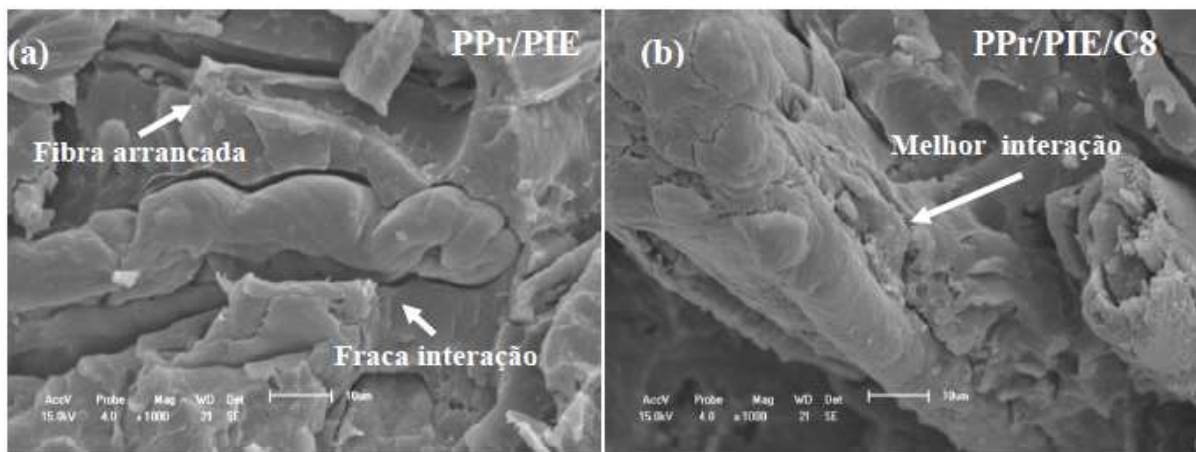
**Figura 2 – Exemplos de resíduos de madeira utilizados na produção de compósitos**



Fonte: (TEIXEIRA, 2005)

Shebani e colaboradores (2008) desenvolveram compósitos de polietileno de baixa densidade reforçados por quatro diferentes espécies de madeira com e sem extrativos. Os autores verificaram que os compósitos que utilizaram as madeiras sem extrativos apresentaram um aumento de, no mínimo, 10 °C na sua estabilidade térmica. Já Sheshmani e colaboradores (2012) verificaram que a remoção dos extrativos da madeira causou aumento das propriedades mecânicas de compósitos de PP reforçado com pó de madeira. Em consonância com os resultados de Shebani e colaboradores (2008) houve também um aumento da estabilidade térmica das amostras com a remoção dos extrativos da madeira. A Figura 3 mostra a micrografia de um compósito reforçado com pó de madeira.

**Figura 3 – Micrografias dos compósitos PPr e pó de madeira sem (a) e com (b) compatibilizante**



Fonte: (POLETTTO et al., 2013)

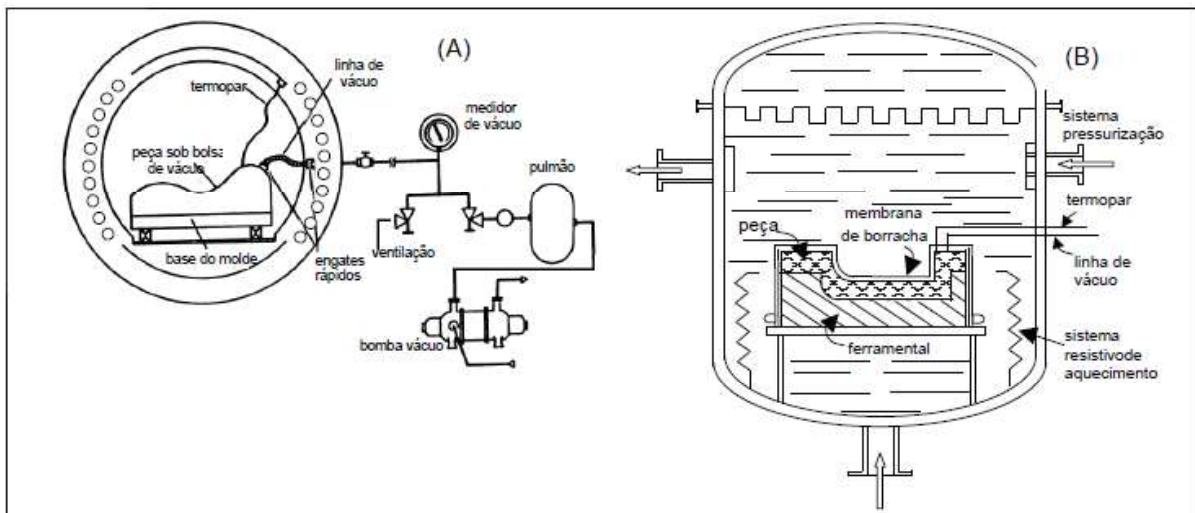
### 3.5 Processamento de compósitos

O processamento de compósitos termoplásticos pode ser realizado por meio da impregnação da fibra com a matriz termoplástica na forma de filmes ou pó, de pré-impregnados ou laminados já pré-fabricados. As matrizes termoplásticas apresentam valores mais elevados de viscosidade ( $10^3 - 10^6$  Pa.s), em comparação às

resinas termorrígidas ( $<100$  Pa.s) o que dificulta a molhabilidade do polímero no reforço e, conseqüentemente, a adesão entre as fibras e a matriz, gerando a formação de vazios e falhas na interface matriz/reforço. Essas dificuldades impostas pelo processamento de compósitos termoplásticos podem resultar em problemas quanto à distribuição/homogeneização da matriz sobre o reforço, que, por sua vez, podem gerar tensões térmicas residuais e defeitos na estrutura cristalina da matriz polimérica (no caso de matrizes semicristalinas) (SALEK, 2005; COSTA, 2006).

Para o processamento de compósitos termoplásticos podem ser utilizadas várias técnicas, tais como: moldagem em autoclave/hidroclave, como mostra a Figura 4, bobinagem contínua, moldagem a vácuo, tecnologia de pré-impregnados, processo de injeção para manufatura de compósitos e moldagem por compressão a quente. Os compósitos termoplásticos podem ser processados em duas etapas. Na primeira, eles são geralmente pré-consolidados em uma placa laminada e, na segunda etapa, conformados com a aplicação de calor e pressão. O processo, na segunda etapa, utiliza uma prensa acoplada a um sistema térmico, que permite ciclos rápidos de processamento (de 1 a 5 min), acarretando em elevados volumes de produção (NOGUEIRA, 2004; COSTA, 2006; PARDINI, 2006).

**Figura 4 – Autoclave (A) e Hidroclave (B) utilizados em processos de moldagem de compósitos poliméricos**



Fonte: (PARDINI, 2006, adaptado)

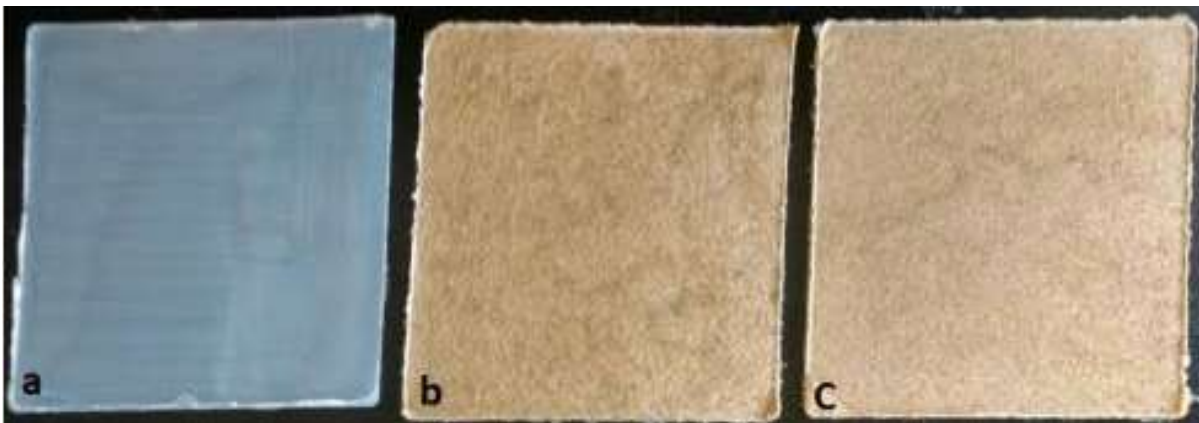
### 3.5.1 Compressão à quente

Os compósitos termoplásticos obtidos via moldagem por compressão a quente podem ser processados a partir do empilhamento intercalado de camadas de polímero e reforço (com orientação definida ou não), dentro de um molde metálico previamente preparado com desmoldante. Em seguida, faz-se o fechamento do molde pelo abaixamento da parte superior da prensa resultando na consolidação do material pela

pressão aplicada. A espessura do material resultante é previamente calculada, levando-se em consideração o número de camadas empilhadas (NOGUEIRA, 2004; PARDINI, 2006).

O processamento via moldagem por compressão a quente de compósitos termoplásticos encontra-se dividido, basicamente, em três etapas: aquecimento (ou fusão/amolecimento), consolidação e resfriamento (ou solidificação). Na primeira etapa, a temperatura do sistema é inicialmente elevada até um determinado ponto acima da temperatura de fusão ou amolecimento do polímero. Logo após esse período, na segunda etapa, ocorre a consolidação, onde a temperatura permanece constante por um determinado período, simultaneamente à aplicação da pressão (os valores de pressão e temperatura variam em função das matérias-primas utilizadas), mantida constante por todo o período de tempo, denominado tempo de residência. Na terceira etapa, durante a solidificação, o sistema é resfriado naturalmente mantendo-se a pressão constante até que se atinja a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) do polímero. Após esse período, a pressão é retirada, o molde é aberto e o compósito removido (MUZZY, 1997; BOURBAN, 2001). A Figura 5 apresenta alguns exemplos de compósitos obtidos por compressão à quente.

**Figura 5 – Placas de compósito Polipropileno/Sisal confeccionadas por compressão à quente (a) PPpuro (b) C15% (c) C25%**



Fonte: (PICCIN, 2018)

## 4 Materiais e Métodos

### 4.1 Materiais

Para confecção dos corpos de prova deste estudo foram utilizados polietileno de baixa densidade e pó de serra.

### 4.2 Métodos

O pó de serra foi submetido a classificação granulométrica, onde foram selecionados os materiais provenientes das separações mesh 150 e 48. Essa classificação foi feita a partir de peneiras com aberturas normalizadas pela ABNT.

Após a classificação granulométrica, foram realizadas 6 formulações diferentes de polietileno de baixa densidade pura e variações de Pó de Serra em massa e tamanho de partícula, podendo ser observada na Tabela 2.

**Tabela 2 – Formulações dos materiais desenvolvidos**

Amostra	PEBD (g)	Pó de Serra (g)	mesh Pó de Serra
PEBD	150	-	-
PEBD/SW150-15	150	15	150
PEBD/SW150-30	150	30	150
PEBD/SW150-45	150	45	150
PEBD/SW48-15	150	15	48
PEBD/SW48-30	150	30	48
PEBD/SW48-45	150	45	48

Fonte: Autoria própria

A mistura dos constituintes foi realizada em uma Extrusora mono rosca de bancada AX plásticos L/D = 25, com objetivo de atingir uma homogeneidade na sua mistura.

Para a fabricação das placas foi utilizado um molde de aço com processo de prensagem à quente com o auxílio de uma prensa térmica da marca Marconi de 30T, com o seguinte programa de aquecimento:

- Pré-aquecimento à 180 °C durante 5 minutos.

- Aquecimento à 180 °C e aplicação de 5 MPa durante 5 minutos;
- Alívio de pressão e retomada a 3 MPa à 180 °C repetida 3x;
- Aquecimento à 180 °C e 5 MPa durante 5 minutos; e
- Resfriamento até 60 °C e 5 MPa.

Ao final do processo foram obtidos os compósitos em diferentes formulações em placas, que em sequencia, foram submetidas à cunhagem para obtenção dos corpos de provas.

Com o objetivo de obter resultados eficazes, os corpos de prova foram confeccionados em triplicata para serem submetidos as caracterizações.

### **4.3 Caracterizações**

#### **4.3.1 Ensaio de Tração**

O ensaio para determinação da Resistência a Tração, Módulo de Elasticidade e Deformação na Ruptura foi realizado no Laboratório do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais (DAEMA) – UTFPR Campus - Londrina – PR na máquina universal de ensaios Shijin WDW-100E.

O Posicionamento do ponto de envase dos corpos de provas foram direcionados para cima com o intuito de uniformizar a posição do corpo de prova na máquina de ensaio de tração.

Os testes de tração foram realizados segundo a norma ASTM D-638, com a distância entre garras correspondente a 115 mm, velocidade de ensaio de 5 mm/min e célula de carga de 50 kN.

Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada amostra.

#### **4.3.2 Caracterização por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)**

Os compósitos com diferentes formulações de PEBD combinado com pó de serra foram caracterizados por espectroscopia no infravermelho (FTIR) por reflectância utilizando o Espectrômetro da marca Perkinelmer, modelo Spectrum Two do Laboratório de Análise de Materiais da UTFPR – Londrina – PR.

Foram analisadas 6 amostras em duplicata, na região de 450 a 4000  $\text{cm}^{-1}$  com uma resolução de 1  $\text{cm}^{-1}$  e 4 acumulações.

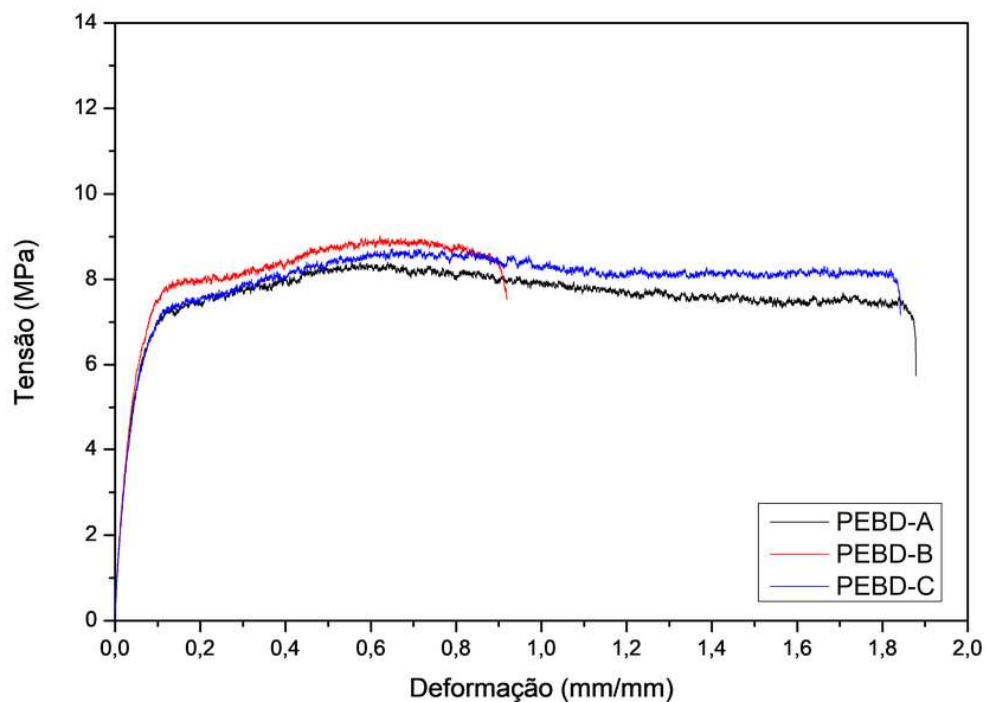
## 5 Resultados e Discussão

### 5.1 Resultados

#### 5.1.1 Dados do ensaio de Tração

A Figura 6 mostra os resultados obtidos nos ensaios mecânicos dos três corpos de prova da amostra de PEBD, ensaiados por tração.

**Figura 6 – Comportamento das amostras de PEBD Puro no ensaio de tração**



Fonte: Autoria própria

As curvas obtidas do PEBD Puro apresentaram comportamento característico de um material plástico, com deformação elástica inicial seguida por escoamento além de uma região de deformação plástica. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos dos diferentes corpos de prova de PEBD Puro e seus respectivos valores médios calculados.

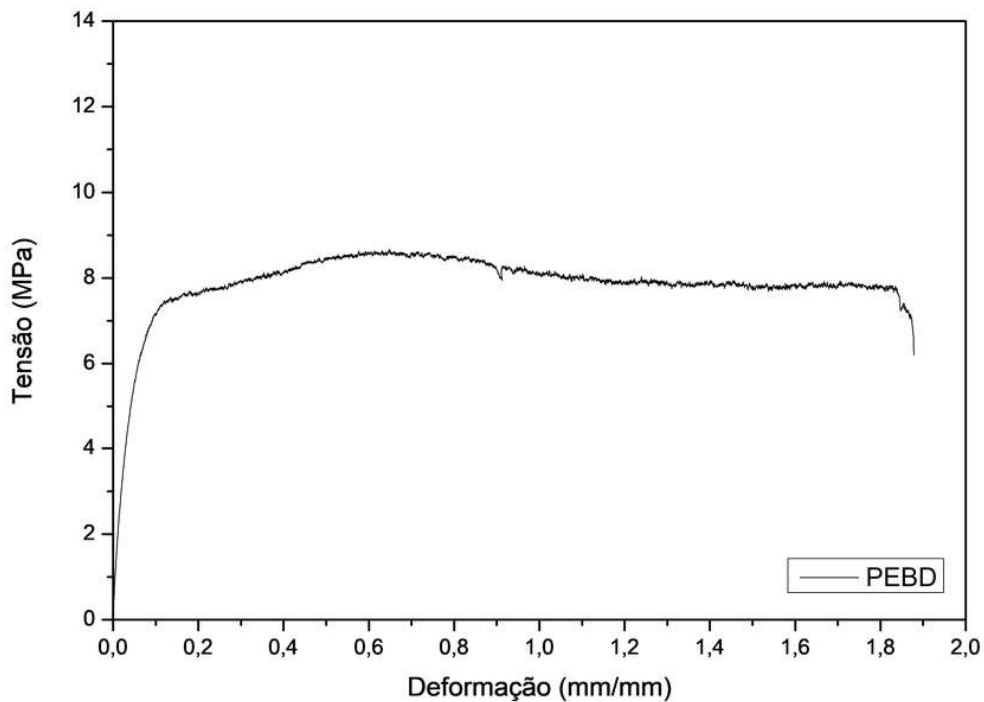
**Tabela 3 – Propriedades de Modulo de Elasticidade e Limite de Resistencia à Tração de amostras de PEBD Puro**

	Amostra	E (MPa)	$E_{medio}$ (MPa)	LRT (MPa)	$LRT_{medio}$ (MPa)
PEBD Puro	A	152,87	$158,74 \pm 4,65$	8,71	$8,71 \pm 0,25$
	B	159,09		9,02	
	C	164,24		8,40	

Fonte: Autoria própria

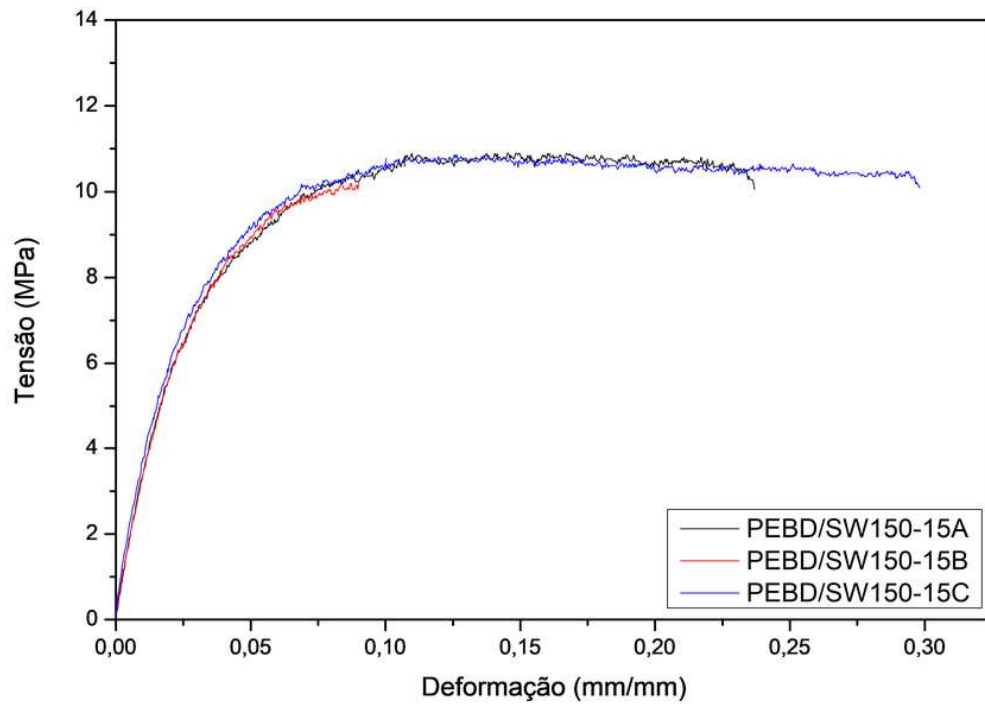
Na Figura 7 é possível observar a curva média para os valores encontrados com base nos ensaios realizados nos corpos de provas do PEBD Puro.

**Figura 7 – Comportamento da curva média do PEBD Puro no ensaio de tração**

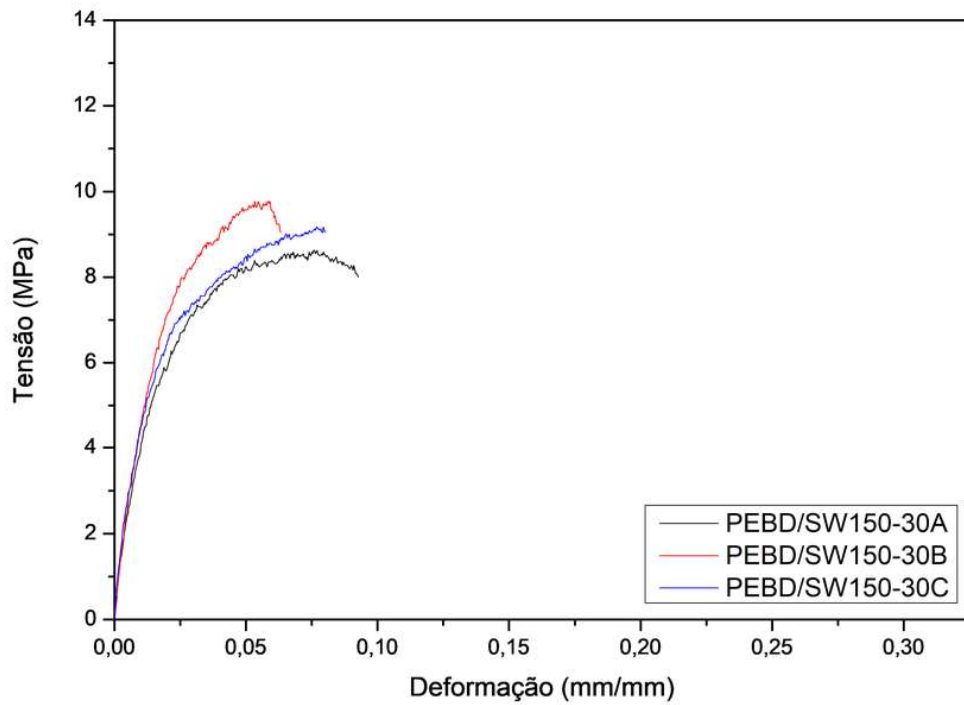


Fonte: Autoria própria

As Figuras 8, 9 e 10 mostram os resultados obtidos nos ensaios mecânicos dos três corpos de prova de cada amostra de PEBD e Pó de Serra (SW - sawdust) *mesh* 150 (15g, 30g e 45g respectivamente) ensaiados por tração.

**Figura 8 – Comportamento do compósito PEBD/SW150-15 no ensaio de tração**

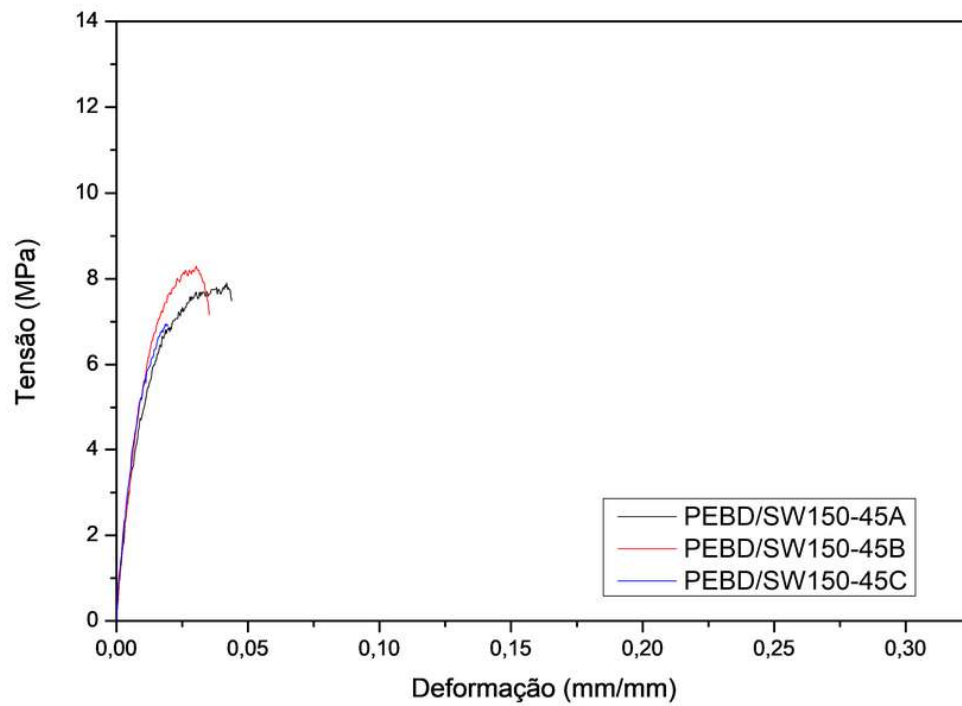
Fonte: Autoria própria

**Figura 9 – Comportamento do compósito PEBD/SW150-30 no ensaio de tração**

Fonte: Autoria própria



Figura 10 – Comportamento do compósito PEBD/SW150-45 no ensaio de tração



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 4 são apresentados os seus valores de Módulo de Elasticidade (E) e Limite de resistência à Tração (LRT) juntamente às médias obtidas para cada composição do compósito produzido a partir do peneiramento em *mesh* 150.

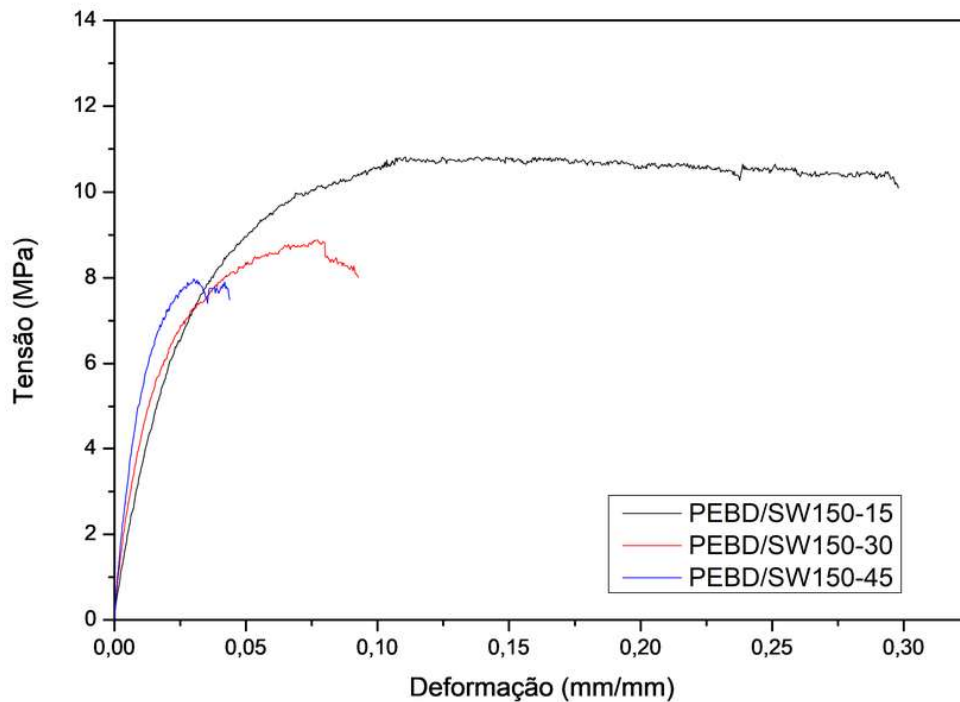
**Tabela 4 – Propriedades de Modulo de Elasticidade e Limite de Resistencia à Tração de compósitos de PEBD combinado com Pó de Serramesh 150**

	<b>Amostra</b>	<b>E (MPa)</b>	<b><math>E_{medio}</math> (MPa)</b>	<b>LRT (MPa)</b>	<b><math>LRT_{medio}</math> (MPa)</b>
<b>PEBD/150-15</b>	A	287,63	291,69 ± 4,71	10,24	10,67 ± 0,30
	B	289,13		10,90	
	C	298,29		10,86	
<b>PEBD/150-30</b>	A	313,34	335,96 ± 20,87	8,62	9,19 ± 0,47
	B	330,84		9,17	
	C	363,68		9,77	
<b>PEBD/150-45</b>	A	353,87	372, 21 ± 18,28	7,90	7,72 ± 0,57
	B	365,59		6,94	
	C	397,15		8,30	

Fonte: Autoria própria

A partir dos valores médios calculados, foi possível traçar as curvas médias de cada amostra, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Comportamento das curvas médias dos compósitos PEBD/SW150 no ensaio de tração

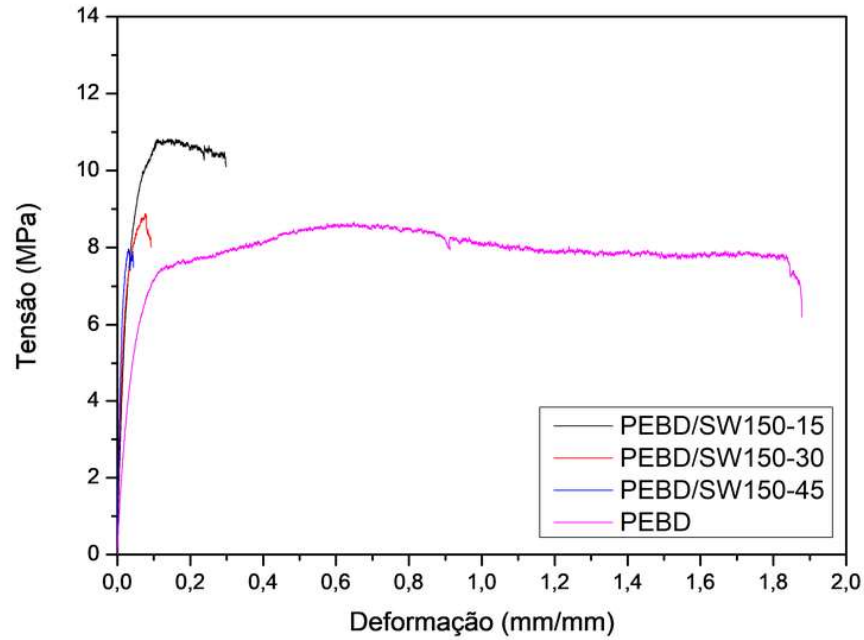


Fonte: Autoria própria

De modo geral observou-se que de acordo com o aumento da quantidade de pó de serra adicionado na formulação ocorreu o aumento do Módulo de Elasticidade do compósito. Relacionando esses valores de Módulo de Elasticidade (E) com a diminuição da deformação atingida pelo compósito, observou-se que essa característica é consequência da propriedade do reforço que o pó de serra transferiu para a matriz polimérica. Nas Figuras 12 e 13 é possível observar a diferença dos comportamentos em relação à cada amostra.

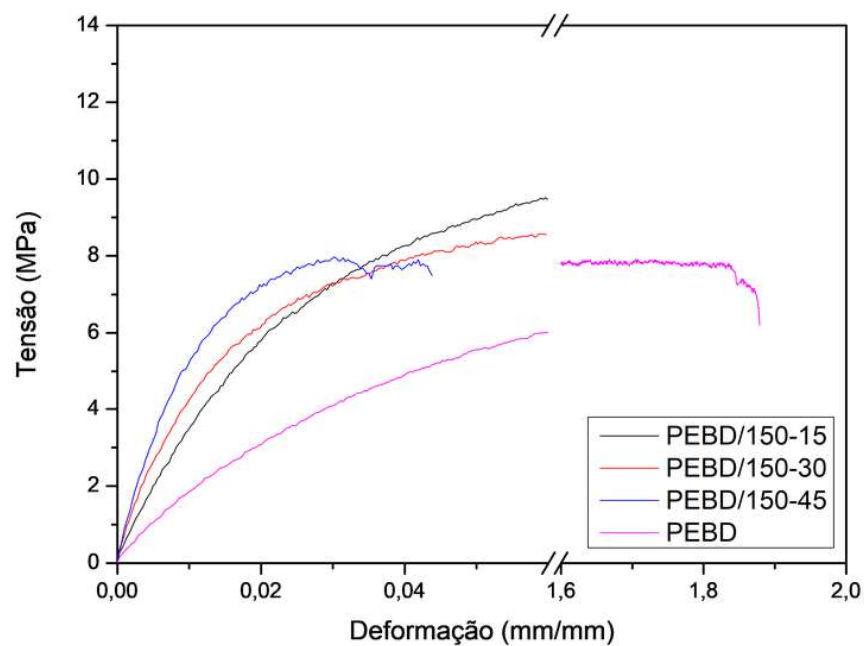
Segundo Ndlovu (2013) o aumento do Módulo de Elasticidade também está relacionado com a diminuição do peso molecular e com o aumento do índice de carbonila. Esse aumento da cristalinidade pôde ser gerado em função da fase cristalina.

Figura 12 – Comportamento das curvas médias dos compósitos PEBD/SW150 e do PEBD Puro no ensaio de tração



Fonte: Autoria própria

Figura 13 – Comportamento das curvas médias dos compósitos PEBD/SW150 e do PEBD Puro no ensaio de tração

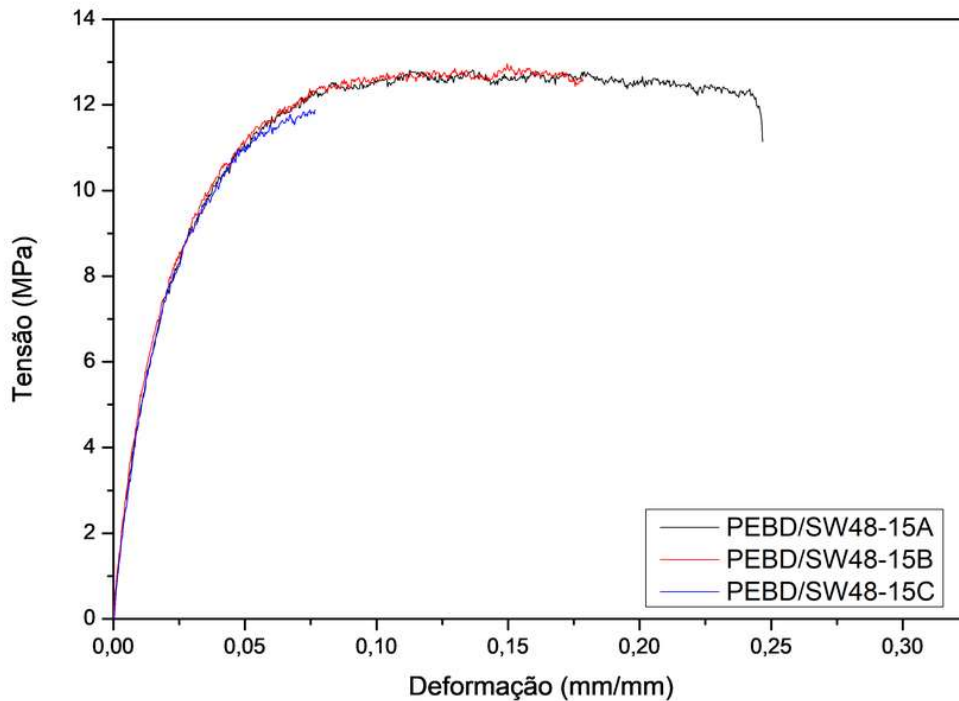


Fonte: Autoria própria

Analisando-se os dados, observou-se que a resistência à tração dos compósitos aumentou efetivamente, quando comparada ao PEBD Puro, podendo observar que ocorreu uma transferência de carga para as fibras pela matriz. A rigidez dos compósitos aumentou proporcionalmente à quantidade de Pó de Serra presente na matriz. Essa diferença da rigidez nos compósitos pode ser explicada pela boa interação fibra/matriz, que quanto maior a quantidade de Pó de Serra, maior foi a transferência de carga.

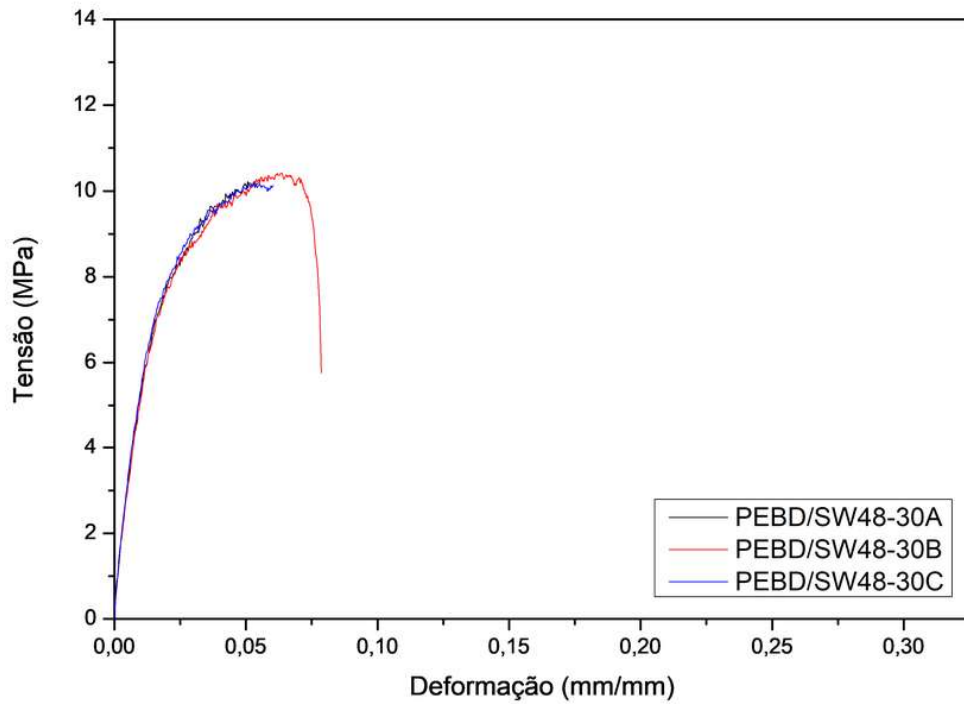
As Figuras 14, 15 e 16 mostram os resultados obtidos nos ensaios mecânicos dos três corpos de prova de cada amostra de PEBD e Pó de Serra *mesh* 48 (15g, 30g e 45g respectivamente) ensaiados por tração.

**Figura 14 – Comportamento do compósito PEBD/SW48-15 no ensaio de tração**



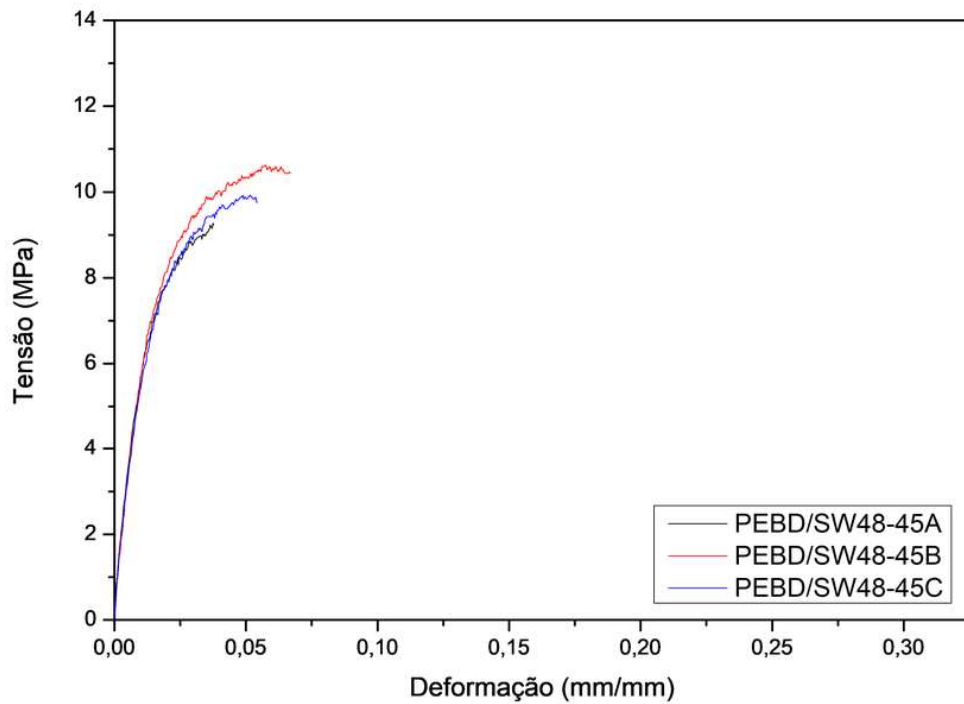
Fonte: Autoria própria

**Figura 15 – Comportamento do compósito PEBD/SW48-30 no ensaio de tração**



Fonte: Autoria própria

**Figura 16 – Comportamento do compósito PEBD/SW48-45 no ensaio de tração**



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 5 é mostrado Modulo de Elasticidade (E) e Limite de Resistencia à

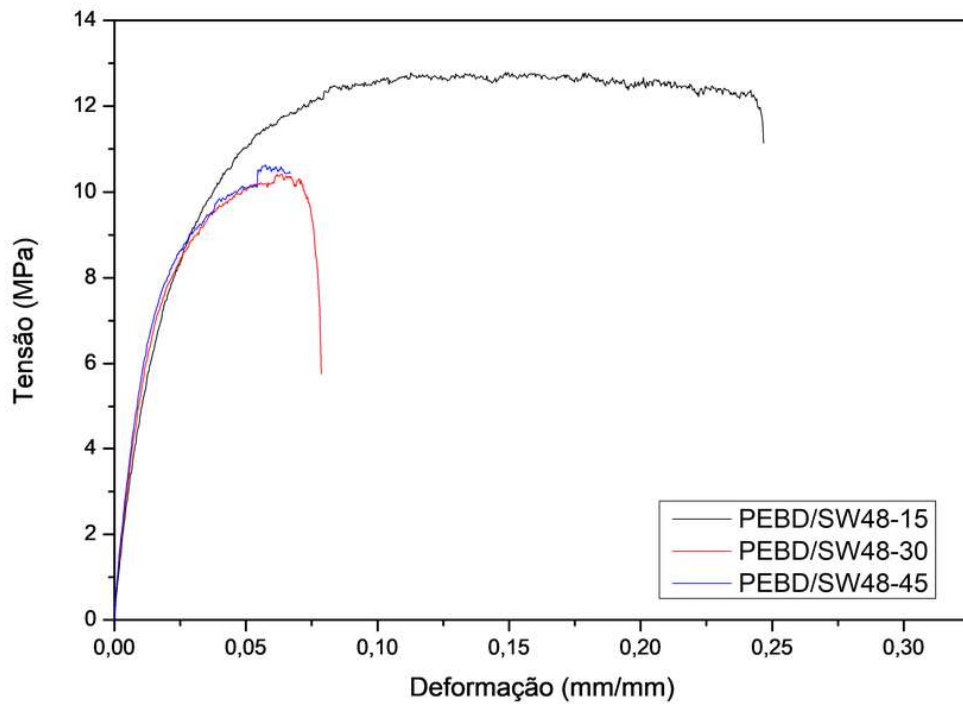
Tração (LRT) juntamente com os seus valores médios para cada tipo de amostra.

**Tabela 5 – Propriedades de Modulo de Elasticidade e Limite de Resistencia à Tração de compósitos de PEBD combinado com Pó de Serramesh 48**

	Amostra	E (MPa)	$E_{medio}$ (MPa)	LRT (MPa)	$LRT_{medio}$ (MPa)
<b>PEBD/48-15</b>	A	385,81	391,22 ± 6,53	12,81	12,59 ± 0,43
	B	387,44		11,98	
	C	400,40		12,96	
<b>PEBD/48-30</b>	A	400,65	408,27 ± 5,40	10,41	10,28 ± 0,09
	B	411,63		10,22	
	C	412,53		10,20	
<b>PEBD/48-45</b>	A	418,38	422,25 ± 4,85	9,27	9,94 ± 0,55
	B	419,26		9,92	
	C	429,08		10,63	

A partir dos valores médios calculados, foi possível traçar as curvas médias de cada amostra, como mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Comportamento das curvas médias dos compósitos PEBD/SW48 no ensaio de tração

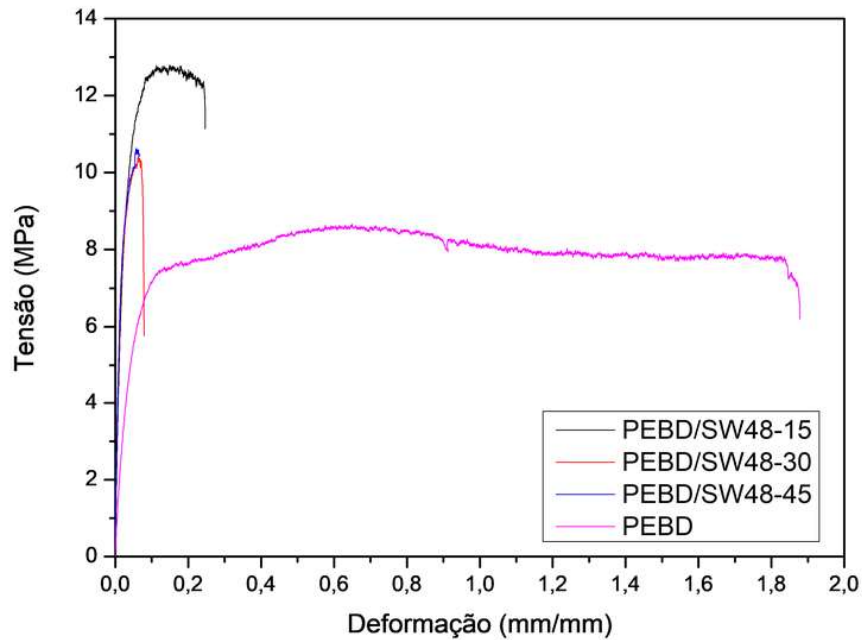


Fonte: Autoria própria

Podemos observar para os compósitos de PEBD e pó de serra *mesh* 48 o mesmo comportamento já observado com o material que possui pó de serra *mesh* 150, onde quanto maior a proporção de material adicionado na matriz, maior o Módulo de Elasticidade (E) e menor o Limite de Resistência à Tração (LRT), podendo ser observado junto com o PEBD Puro nas Figuras 18 e 19.

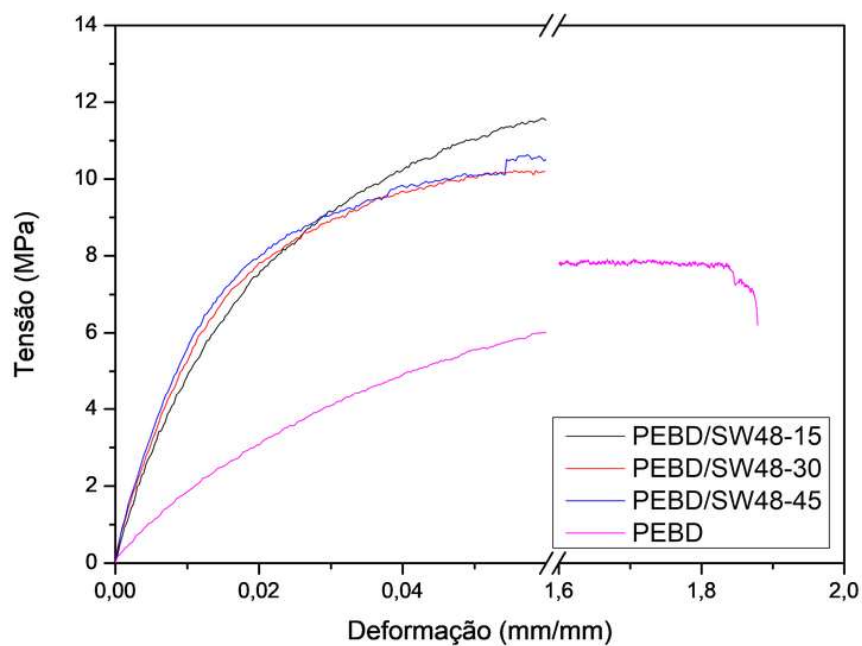


Figura 18 – Comportamento das curvas médias dos compósitos PEBD/SW48 e do PEBD Puro no ensaio de tração



Fonte: Autoria própria

Figura 19 – Comportamento das curvas médias dos compósitos PEBD/SW48 e do PEBD Puro no ensaio de tração



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 6 encontramos os resultados obtidos através dos experimentos de todas as proporções e morfologias estudadas.

**Tabela 6 – Propriedades de Módulo de Elasticidade e Limite de Resistência à Tração do PEBD Puro e de compósitos de PEBD combinado com Pó de Serrame**

	$E_{medio}$ (MPa)	$LRT_{medio}$ (MPa)
PEBD	158,74 ± 4,65	8,71 ± 0,25
PEBD/150-15	291,69 ± 4,71	10,67 ± 0,30
PEBD/150-30	335,96 ± 20,87	9,19 ± 0,47
PEBD/150-45	372, 21 ± 18,28	7,72 ± 0,57
PEBD/48-15	391,22 ± 6,53	12,59 ± 0,43
PEBD/48-30	408, 27 ± 5,40	10,28 ± 0,09
PEBD/48-45	422,25 ± 4,85	9,94 ± 0,55

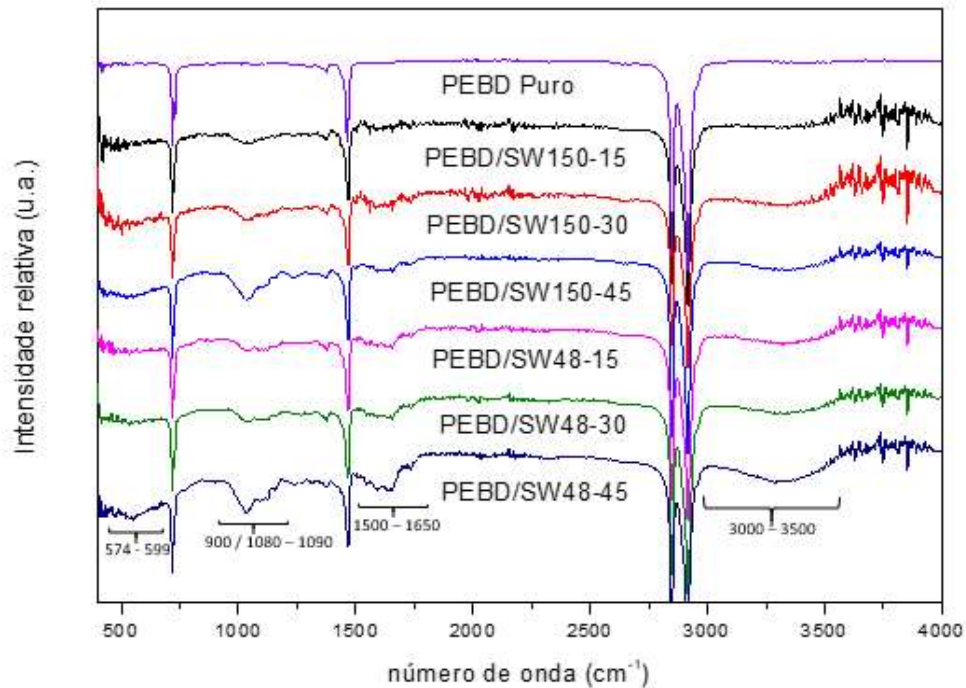
Fonte: Autoria própria

Segundo Callister (2002) conforme o comprimento da fibra presente na matriz polimérica aumenta, o reforço se torna mais efetivo, ou seja, a tensão transmitida da matriz para a fibra é diretamente proporcional ao seu comprimento. Podemos observar essa diferença da capacidade de tensão transmitida da matriz para o reforço nas diferenças entre as propriedades dos compósitos com a mesma proporção de Pó de Serra, porém com diferentes mesh. O compósito que possui fibras com maiores comprimentos conferiu maior Módulo de Elasticidade (E) comparado com o de fibras de menor comprimento.

#### 5.1.2 Dados do ensaio de FTIR

A Figura 20 mostra os resultados obtidos nos espectros de infravermelho por transformada de fourier (FTIR) obtidos através das diferentes amostras dos compósitos e do PEBD Puro.

**Figura 20 – Espectros de infravermelho por transformada de fourier (FTIR) obtidos através das diferentes amostras dos compósitos e do PEBD Puro**



Fonte: Autoria própria

A banda alargada na região entre 3500 e 3000  $\text{cm}^{-1}$  é referente às ligações dos grupos hidroxilas. Essa banda pode ser inferida em função da presença de umidade absorvida na amostra e dos grupos funcionais OH presentes na estrutura química das fibras utilizadas. Enquanto é possível encontrar na faixa em torno de 1650 e 1500  $\text{cm}^{-1}$  oriunda da presença de grupos carboxílicos do material particulado. Os picos em 1090 e 1080  $\text{cm}^{-1}$  são oriundos de estiramento simétrico de grupos C-O-C indicativos da presença de grupos éter na fibra, os picos encontrados próximos à 900  $\text{cm}^{-1}$  são provenientes de estiramento simétrico das ligações C-H e, entre 599 e 574  $\text{cm}^{-1}$ , há um indicativo de anel aromático. Quando dois componentes são misturados, as misturas físicas versus químicas interações são afetadas por mudanças na característica picos do espectro.

Esses dados corroboram com a caracterização química das fibras.

## 6 Conclusão

O objetivo deste estudo foi investigar o efeito de diferentes proporções de pó de serra e diferentes granulometrias em compósitos de PEBD/SW. Parte do estudo foi realizado por meio da análise das propriedades mecânicas dos compósitos, obtidos através de diferentes formulações, observando qual a influência tanto das diferentes proporções do reforço adicionado à matriz, quanto da influência da suas diferentes granulometrias.

Ocorreu um aumento do Módulo de Elasticidade e Limite de Resistência a Tração em todas as formulações desenvolvidas, podendo concluir que ocorreu adesão das fibras na matriz. Esse aumento de propriedades nos mostrou que a adesão entre a matriz e a fibra ocorreu principalmente pela transferencia de carga, que é confirmada com o próprio ganho das propriedades.

No que diz respeito as diferentes proporções de reforço adicionado à matriz, quanto maior a proporção adicionada, maior foi o aumento do Módulo de Elasticidade, já em relação às diferentes granulometrias, quanto maior o tamanho da fibra, maior o Módulo de Elasticidade, concluindo-se que quanto maior a fibra, maior a sua adesão à matriz, isso devido às fibras maiores conferirem maior rigidez ao material compósito comparado ao compósito com granulometria menor, que confere ao material uma maior capacidade de transferencia de carga entre a matriz e a fibra.

## REFERÊNCIAS

ASTM D3878. Standard terminology for composite materials. 2016.

BLEDZKI, A. K.; ZHANG, W.; CHATE, A. Composites Science and Technology, 61, p.2405. 2001.

BOURBAN, P. E. et. al.; Material Phenomena Controlling Rapid Processing of Thermoplastic Composites”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 32, n.8, p.1045-1057, 2001.

CALLISTER, W. D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CANEVAROLO JUNIOR, S. V. Ciências dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2 ed., rev. e ampl. São Paulo: Artliber, 2006.

COSTA, G. G.; Avaliação da Influência dos Ciclos Térmicos nas Propriedades dos Compósitos Termoplásticos de PPS e PEI com Fibras de Carbono e Vidro Conformados por Prensagem Quente. Tese de Mestrado - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 156 f., 2006.

CROCKER, J. Natural materials innovative natural composites. Materials Technology, v. 2-3, p. 174-178. 2008.

ELLIS, T.S., D.,ANGELO, J.S., “Thermal and mechanical properties of a polypropylene nanocomposite”, Journal of Applied Polymer Science, v. 90, n. 6, pp. 1639-1647, Feb. 2003.

JONES, R.M. Mechanics of composite materials. Virginia: Taylor & Francis, 1999.

KIM, J-W.; HARPER, D.P.; TAYLOR, A.M. Effect of wood species on the mechanical and thermal properties of wood-plastic composites. Journal of Applied Polymer Science 112: 1378-1385, 2009.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L.C. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

MAZUMDAR, S.K. Composites manufacturing: materials, product and process engineering. Boca Raton: CRC Press, 2001.

MUZZY, J. D.; COLTON J. S.; The Processing Science of Thermoplastic Composites, in: Advanced Composites Manufacturing, cap 3, Timothy G. Gutowski (ed), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, John Wiley & Sons, Inc. 1997.

NDLOVU, et al (2013). LDPE-wood composites utilizing degraded LDPE as compatibilizer, Composites: Part A.

NETO, J. R. A.; CARVALHO, L. H.; ARAÚJO, E. M. Influência da Adição de uma Carga Nanoparticulada no Desempenho de Compósitos Poliuretano/Fibra de Juta. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 17, nº 1, p. 10-15. 2007.

NOGUEIRA, C. L., Obtenção e Caracterização de Compósitos Termoplásticos Avançados à Base de Matrizes de Polipropileno Reforçados com Fibra de Carbono. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 256 f., 2004.

ORELLANA, F., LISPERGUER, J., NUÑEZ, C. Synthesis and characterization of polypropylene-silica, alumina and titania nanoparticles, prepared by melting. Journal of the Chilean Chemical Society, v. 59, n. 1, pp. 2389-2393, Mar. 2014.

PARDINI, L. C.; NETO, F. L., Compósitos Estruturais; Edgar Blücher, Edgard Blucher, 309 f., 1 ed. 2006.

PICCIN, L. Z.; SILVA, R. V. Moldagem por compressão a quente do compósito polipropileno/sisal. In: 23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, 2018.

PICKERING, K.L.; ARUAN EFENDY, M.G.; LE, T.M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. Composite Part A 83: 98-112, 2016.

POLETTO, M.; ZATTERA, A. J.; SANTANA, R.M.C. Efeito da adição de ácidos carboxílicos como compatibilizantes nas propriedades mecânicas e morfológicas de compósitos de PPr reforçado com pó de madeira. In: 12º Congresso Brasileiro de Polímeros (12ºCBPol), Florianópolis, 2013.

RODRIGUES, A.W., Organofilização de argilas bentoníticas e aplicação no desenvolvimento de nano-compósitos com matriz de polipropileno, Tese de D.Sc., PRODEP/UFCG, Campina Grande, PB, Brasil, 2009.

SALEK, M. H. Effects of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Carbon/PEKK Thermoplastic Composite Materials. Dissertação de Mestrado em Ciência Aplicada. Concordia University Montreal, Quebec, Canada, 112 f., 2005.

SANTOS, A. M. Estudo de compósitos híbridos polipropileno / fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia. 2006. 90 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

SHACKELFORD, J. F. Introdução à Ciência dos materiais para engenheiros. 6a. ed. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2008.

SHEBANI, A.N.; REENEN, A.J.; MEINCKEN, M. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. *Thermochimica Acta* 471: 43-50, 2008.

SHESHMANI, S.; ASHORI, A.; FARHANI, F. Effect of extractives on the performance properties of wood flour-polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science* 123: 1563-1567, 2012.

SILVA, G.D.A., ALVES, K.G.B., ALMEIDA, Y.B., et al., "Effect of Alumina Ceramic Powder Dispersion on Mechanical Properties of polypropylene polymers", *Materials Science Forum*, v. 727-728, pp. 1729-1733, Aug. 2012.

SILVA, I. L. A. Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta. 2014. 110 f. Tese de doutorado - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, 2014.

SUN, D., ZHANG, R., LIU, Z., et al., "Polypropylene/silica nanocomposites prepared by in-situ sol-gel reaction with the aid of CO<sub>2</sub>", *Macromolecules*, v. 38, n. 13, pp. 5617-5624, May. 2005.

TEIXEIRA, M. G. Aplicação de conceitos da ecologia industrial para a produção de materiais ecológicos: o exemplo do resíduo de madeira. UFBA - Dissertação de mestrado. Salvador, 2005.

TWE, M. M.; LIAO, K. Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 63, p. 375-387, 2003.

VÄISÄNEN, T.; HAAPALA, A.; LAPPALAINEN, R.; TOMPPO, L. Utilization of agricultural and forest industry waste and residue in natural fiber-polymer composites: a review. *Waste Management* 54: 62-73, 2016.