



FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC  
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU  
GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

MARCELO SOUSA DE CARVALHO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ÍNDICE DE FLUIDEZ DA  
MATRIZ POLIMÉRICA DE POLIETILENO DE ALTA  
DENSIDADE NAS PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS  
COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

Salvador

2016

MARCELO SOUSA DE CARVALHO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ÍNDICE DE FLUIDEZ DA  
MATRIZ POLIMÉRICA DE POLIETILENO DE ALTA  
DENSIDADE NAS PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS  
COM PARTÍCULAS DE MADEIRA

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* da Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC como requisito para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientadora: Prof. Dra. Josiane Dantas Viana

Co-orientadora: Prof. Dra. Joyce Batista Azevedo

Salvador  
2016

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

C331a Carvalho, Marcelo Sousa de

Análise da influência do índice de fluidez da matriz polimérica de polietileno de alta densidade nas propriedades mecânicas de compósitos com partículas de madeira / Marcelo Sousa de Carvalho. – Salvador, 2016.

91 f. : il. color.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Josiane Dantas Viana.  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Joyce Batista Azevedo.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial - GETEC) – Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador, 2016.

Inclui referências.

1. Polietileno de Alta Densidade - PEAD. 2. Índice de fluidez. 3. Partícula de madeira. 4. Compósitos. I. Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC. II. Viana, Josiane Dantas. III. Azevedo, Joyce Batista. IV. Título.

CDD: 668.4

## Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

### Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada "ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ÍNDICE DE FLUIDEZ DA MATRIZ POLIMÉRICA DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS COM PARTÍCULAS DE MADEIRA", apresentada no dia 15 de dezembro de 2016, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientadora:



**Prof.ª Dr.ª Josiane Dantas Viana Barbosa**  
SENAI CIMATEC

Coorientadora:



**Prof.ª Dr.ª Joyce Batista Azevedo**  
FIEB

Membro Interno:



**Prof. Dr. Rodrigo Santiago Coelho**  
SENAI CIMATEC

Membro Externo:



**Prof.ª Dr.ª Nadia Mamede José**  
UFBA

Dedico este trabalho à Deus, minha família e amigos, principalmente aos meus pais, Marcelo Freitas e Dúrlia Carvalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Profa. Dra. Josiane Dantas Viana e à Profa. Dra. Joyce Batista Azevedo pela inestimável ajuda na orientação para realização deste trabalho.

Ao Instituto SENAI de Inovação em Conformação e União de Materiais e todos envolvidos na gestão do programa Jovens Talentos, pelo patrocínio e motivação para que este trabalho fosse realizado.

Agradeço à minha família, pelo suporte e compreensão de ausências. Especialmente a meus pais (Luiz Marcelo Carvalho de Freitas e Dúrlia Eliane Sousa de Carvalho) e minha irmã (Ive Sousa de Carvalho).

Agradeço aos colegas, participantes do programa de pós-graduação pelas experiências compartilhadas e pelo grande auxílio para possibilitar a execução deste trabalho.

## RESUMO

O uso de compósitos com fibras vegetais ganhou notoriedade nos últimos anos, grande parte devido ao seu baixo custo e caráter sustentável, se apresentando como melhor alternativa em detrimento das fibras sintéticas. Porém, limitações quanto à temperatura de processamento e a baixa compatibilidade da fibra com a matriz, têm se tornado problemas, principalmente no que tange ao desempenho e propriedades do compósito resultante. Porém, o fato das fibras vegetais serem fontes renováveis e biodegradáveis, unido a sua alta disponibilidade, proporcionaram notório crescimento e adesão de seu uso por parte das indústrias, com destaque para indústria automotiva e construção civil. Neste trabalho, estudos baseados em compósitos com partículas de madeira e matrizes poliméricas com diferentes índices de fluidez foram executados com o intuito de se analisar a influência do índice de fluidez (MFI) nas propriedades térmicas, mecânicas e morfológicas destes compósitos. Foram utilizados três tipos de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com diferentes índices de fluidez e acrescidos de 10% de partículas de madeira. As formulações foram obtidas através de um extrusora de dupla rosca e suas propriedades de índice de fluidez, resistência à tração, resistência à flexão e resistência ao impacto foram analisadas. Foi executado o ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC), com o intuito de se analisar o efeito do índice de fluidez nas temperaturas de fusão e cristalização do compósito. Por fim, foram executadas análises microestruturais através de microscopia óptica (MO), para se analisar a dispersão e distribuição das partículas na matriz polimérica, e microscopia eletrônica de varredura (MEV), para se analisar a adesão da fibra à matriz. Através dos resultados foi possível observar que o acréscimo das partículas de madeira reduziu o índice de fluidez do compósito influenciando as propriedades mecânicas. Verificou-se, também, que quanto menor o índice de fluidez da matriz polimérica melhor será a mistura no que tange a dispersão.

Palavras-chave: PEAD, Índice de Fluidez, Partícula de Madeira, Compósito.

## ABSTRACT

The use of composites with vegetable fibers has gained notoriety in recent years, largely due to its low cost and sustainable character, presenting as a better alternative in detriment of synthetic fibers. However, limitations in the processing temperature and the low compatibility of the fiber with the matrix have become problems, especially regarding the performance and properties of the resultant composite. But, the facts of the vegetable fibers are renewable and biodegradable sources, also their high availability, provided remarkable growth and adhesion of its use by industries, especially automotive and construction industries. In this work, studies based in composites with wood particles and polymeric matrices with different melt flow indices were performed in order to analyze the influence of the melt flow index (MFI) in the thermal, mechanical and morphological properties of these composites. Three types of high density polyethylene (HDPE) were used with different melt flow indices and 10% of wood particles. The formulations were obtained by a twin screw extruder and the melt flow index properties, tensile strength, flexural strength and impact resistance of the composites were analyzed. The differential scanning calorimetry (DSC) test was performed in order to analyze the effect of the melt flow index on the melt and crystallization temperatures of the composite. Microstructural analysis was performed by optical microscopy (OM), to analyze the dispersion and distribution of the particles in the polymer matrix, and scanning electron microscopy (SEM), to analyze the adhesion of the fiber to the matrix. Through the results it was possible to observe that the addition of the wood particles reduced the melt flow index of the composite influencing the mechanical properties. It has also been found that the lower the melt flow index of the polymer matrix the better will be the mixture with respect to the dispersion.

Keywords: HDPE, Melt Flow Index, Wood Particle, Composite.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação do preço entre fibras sintéticas e fibras vegetais. ....	17
Tabela 2 - Comparativo entre a extrusora dupla rosca e a extrusora mono rosca. ....	21
Tabela 3 - Classificação da extrusora dupla rosca. ....	23
Tabela 4 - Especificações técnicas dos polietilenos fornecidos pela Braskem. ....	33
Tabela 5 - Formulações analisadas. ....	33
Tabela 6 - Descrição de malhas das peneiras utilizadas. ....	36
Tabela 7 - Descrição de malhas das peneiras do segundo ensaio. ....	37
Tabela 8 - Resultados obtidos para cada formulação. ....	40
Tabela 9 - Resultado do primeiro ensaio de granulometria. ....	41
Tabela 10 - Resultados do segundo ensaio de granulometria. ....	41
Tabela 11 - Calor latente de cristalização e grau de cristalinidade dos compósitos de PEAD com partículas de madeira. ....	48
Tabela 12 - Resultados do ensaio de DSC para os compósitos de PEAD com partículas de madeira. ....	49
Tabela 13 - Comparativo do comportamento da dispersão e distribuição das partículas de madeira em cada matriz PEAD. ....	60
Tabela 14 - Comparativo do comportamento da dispersão, distribuição, interface Matriz/PM e formação de aglomerados para cada matriz PEAD dos compósitos analisados. ....	65
Tabela 15 - Comparativo em reais dos preços das fibras de carbono, vidro e madeira. ....	67
Tabela 16 - Preço comercial do PVC, PEAD e da fibra de madeira. ....	68
Tabela 17 - Comparativo do preço de 1 kg de PVC e 1 kg do compósito. ....	68
Tabela 18 - Comparativo das massas específicas do compósito e do PVC. ...	68

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico com a porcentagem das aplicações do plástico por tipo de resina na indústria brasileira.....	6
Figura 2 – Produção nacional de transformados plásticos.....	7
Figura 3 - Representações esquemáticas da estrutura do PEAD. ....	8
Figura 4 - Classificação das fibras naturais.....	10
Figura 5 - Representação dos resíduos das indústrias de movelaria.....	12
Figura 6- Classificação por tamanho da madeira e dos resíduos da indústria.	13
Figura 7 - Comparação entre fibra vegetal, fibra de vidro e fibra de carbono. .	16
Figura 8 - Comparação do custo por peso entre a fibra de vidro e as fibras vegetais.....	17
Figura 9 - Exemplos de misturas dispersa e distribuídas. ....	18
Figura 10 - Representação esquemática da extrusora dupla rosca. ....	21
Figura 11 - Zonas de processo de uma extrusora de dupla rosca. ....	24
Figura 12 - Representação das zonas da rosca da extrusora dupla rosca. ....	24
Figura 13 - Rosca representada com diversos elementos caracterizando o princípio modular da extrusora dupla rosca. ....	25
Figura 14 - a) Elementos de amassamento de duas pontas; b) bloco composto de elementos de amassamento de duas pontas dispostos a 90°; c) bloco composto de elementos de amassamento de três pontas dispostos a 30°.....	26
Figura 15 - Exemplo de elemento de amassamento mais largo (à direita) e menos largo (à esquerda). ....	27
Figura 16 – Configuração do perfil de rosca utilizado. ....	34
Figura 17 – Resíduo de madeira utilizada no processo. ....	35
Figura 18 - Croqui dos corpos de prova dos ensaios de tração e impacto.....	35
Figura 19 - Corpos de provas injetados, no lado esquerdo polímero puro da matriz de PEAD IA 58 e no lado direito compósito de mesma matriz com partículas de madeira.....	36
Figura 20 - Gráfico de distribuição do ensaio de granulometria. ....	42
Figura 21 - Índice de fluidez dos polímeros puros e dos compósitos de PM....	43
Figura 22 – Comparativo do índice de fluidez dos polímeros puros sem processamento e processados na extrusora.....	44
Figura 23 - Fluxo de energia como função do tempo para os compósitos com as diferentes matrizes de PEAD com partícula de madeira. ....	45
Figura 24 - Efeito do índice de fluidez na fusão de compósitos PEAD com partícula de madeira.....	46
Figura 25 - Efeito do índice de fluidez na cristalização a partir do fundido para compósitos de PEAD com partículas de madeira. ....	47

Figura 26 - Taxa de cristalização em função da temperatura para formulações de PEAD com partículas de madeira. ....	49
Figura 27 - Módulo de elasticidade de tração dos polímeros puros e dos compósitos de PM. ....	51
Figura 28 - Tensão máxima de tração dos polímeros puros e dos compósitos de PM. ....	52
Figura 29 - Módulo de elasticidade de flexão dos polímeros puros e dos compósitos de PM. ....	54
Figura 30 - Tensão máxima de flexão dos polímeros puros e dos compósitos de PM. ....	55
Figura 31 - Resistência ao impacto dos polímeros puros e dos compósitos de PM. ....	57
Figura 32 – Microscopia óptica do compósito com partículas de madeira com a matriz de PEAD IA 59 (imagem 50x aumentada). ....	58
Figura 33 - Análise da proporção da fase dispersa na matriz de PEAD IA 59. ....	58
Figura 34 - Microscopia óptica do compósito com partículas de madeira com a matriz de PEAD IA 58 (imagem 50x aumentada). ....	59
Figura 35 - Microscopia óptica do compósito com partículas de madeira com a matriz de PEAD IG 58 (imagem 50x aumentada). ....	59
Figura 36 - Microestrutura das três formulações com partículas de madeira, sendo da esquerda para a direita os compósitos com as matrizes de PEAD IA 59, PEAD IA 58 e PEAD IG 58. ....	60
Figura 37 - Análise de dispersão e distribuição das partículas de madeira na matriz de PEAD IA 59 através do microscópio eletrônico de varredura (imagem 100x aumentada). ....	61
Figura 38 - Análise da interação das partículas de madeira com a matriz de PEAD IA 59 através do microscópio eletrônico de varredura (imagem aumentada 500x). ....	62
Figura 39 - Análise de dispersão e distribuição das partículas de madeira na matriz de PEAD IA 58 através do microscópio eletrônico de varredura (imagem 100x aumentada). ....	63
Figura 40 - Análise da interação das partículas de madeira com a matriz de PEAD IA 58 através do microscópio eletrônico de varredura (imagem aumentada 500x). ....	63
Figura 41 - Análise de dispersão e distribuição das partículas de madeira na matriz de PEAD IG 58 através do microscópio eletrônico de varredura (imagem 100x aumentada). ....	64
Figura 42 - Análise da interação das partículas de madeira com a matriz de PEAD IG 58 através do microscópio eletrônico de varredura (imagem aumentada 500x). ....	65
Figura 43 - MEV das três formulações com partículas de madeira, sendo da esquerda para a direita os compósitos com as matrizes de PEAD IA 59, PEAD IA 58 e PEAD IG 58. ....	66

Figura 44 - MEV da interface matriz/PM das três formulações com partículas de madeira, sendo da esquerda para a direita os compósitos com as matrizes de PEAD IA 59, PEAD IA 58 e PEAD IG 58..... 66

## LISTA DE SIGLAS

ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico  
ANOVA – Análise de variância  
CIMATEC – Campus Integrado de Manufatura e Tecnologia  
DSC – Calorimetria exploratória diferencial  
HDPE – *High Density Polyethylene*  
MDF – *Medium-Density Fiberboard*  
MEV – Microscopia eletrônica de Varredura  
MO – Microscopia óptica  
MFI – Índice de fluidez  
OM – *Optical microscopy*  
PE – Polietileno  
PEAD – Polietileno de alta densidade  
PEBD – Polietileno de baixa densidade  
PELBD – Polietileno linear de baixa densidade  
PEUAPM – Polietileno de ultra alto peso molecular  
PEUBD – Polietileno de ultra baixa densidade  
PM – Partícula de madeira  
PVC – Policloreto de vinila  
SEM – *Scanning electron microscopy*  
SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial  
T<sub>m</sub> – Temperatura máxima de fusão  
UFMG – Universidade Federal de Campina Grande  
X<sub>c</sub> – Grau de cristalinidade

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivo Geral.....	4
1.2	Objetivos Específicos .....	4
2	Fundamentação Teórica.....	5
2.1	Características gerais do polietileno .....	5
2.1.1	Polietileno de alta densidade (PEAD).....	7
2.2	Fibras vegetais .....	9
2.2.1	Resíduo de madeira .....	11
2.3	Compósitos com fibras vegetais .....	13
2.3.1	Aspectos mercadológicos.....	15
2.3.2	Mistura.....	17
2.3.2.1	Distribuição.....	19
2.3.2.2	Dispersão .....	20
2.4	Processo de Extrusão.....	20
2.4.1	Extrusão de compósitos .....	27
2.5	Índice de Fluidez (MFI) .....	29
2.5.1	Influência do Índice Fluidez em Compósitos com Fibras Vegetais .....	29
3	Materiais e Métodos .....	33
3.1	Materiais .....	33
3.2	Métodos.....	34
3.2.1	Processamento das formulações.....	34
3.2.2	Injeção dos corpos de prova.....	35
3.2.3	Análise granulométrica do resíduo de madeira .....	36
3.2.4	Índice de fluidez (MFI) .....	37
3.2.5	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) .....	37
3.2.6	Resistência à tração .....	37
3.2.7	Resistência à flexão.....	38
3.2.8	Resistência ao impacto.....	38
3.2.9	Microscopia Óptica (MO) .....	38
3.2.10	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	38
4	Resultados e discussões .....	40
4.1	Análise Granulométrica do Resíduo de Madeira .....	40
4.2	Índice de Fluidez (MFI) .....	42
4.3	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) .....	44
4.4	Resistência à tração .....	50

4.5	Resistência à Flexão .....	53
4.6	Resistência ao Impacto .....	55
4.7	Microscopia Óptica (MO) .....	57
4.8	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	60
4.9	Análise de viabilidade econômica.....	66
5	Conclusões.....	69
6	Sugestões para trabalhos futuros .....	71
	Referências .....	72

# 1 INTRODUÇÃO

O mercado de plásticos apresentou uma gradativa evolução no decorrer dos anos desde sua origem. Na década de 60, com a corrida espacial, observou-se um crescimento na demanda por este material, principalmente devido ao seu baixo peso e sua versatilidade. Já na década de 70 os plásticos começaram a ser aplicados na engenharia e na emergente indústria de computação, além de se tornar cada vez mais importante nas áreas da saúde, devido a sua natureza higiênica. Durante os anos 80, os plásticos se firmaram ainda mais na indústria, devido ao avanço da tecnologia em computadores, cabos de fibra óptica e telefones, grande parte devido a sua isolação, flexibilidade, baixo peso e resistência. Nos anos 90 os plásticos, já considerados “maduros”, passaram por novos desenvolvimentos, como fabricação de filmes multi camadas (mais finos que seus antecessores) e técnica para reciclagem de material (ABIPLAST, 2016).

No século XX, as indústrias observaram a necessidade contínua de inovar para suprir a demanda cada vez mais exigente, principalmente no que tange conceitos de proteção ao meio ambiente. Esta procura e expectativas dos consumidores, juntamente com o desenvolvimento tecnológico, proporcionaram um aumento contínuo nas buscas por recursos globais, o que ocasionou grandes problemas na disponibilidade, bem como na sustentabilidade mundial. Os compósitos surgem como uma alternativa viável por unir as melhores propriedades de dois ou mais componentes (GERDEEN et al., 2012; KRACALIK et al., 2010; MATTHEWS et al., 2000).

É neste contexto que o desenvolvimento de compósitos com biofibras passaram por uma transformação notável nas últimas décadas, de forma que se intensificou cada vez mais o desenvolvimento de novas composições e processos, que conseqüentemente passaram a ser aplicados (FARUK et al., 2012).

A crise do petróleo colaborou, ainda mais, para o aumento da popularidade dos biocompósitos, de modo que estes se tornaram materiais de engenharia com uma gama muito ampla de propriedades, no entanto a alta

competitividade do mercado global exige uma investigação contínua das vantagens do uso destes materiais (FARUK et al., 2012).

Nesta conjuntura, a indústria automotiva tem aplicado a utilização de compósitos com fibra vegetal, devido, principalmente, ao seu custo baixo de aquisição. Contudo pode-se ressaltar a redução de peso, muito almejada nesta área da indústria, a reciclagem e os apelos de marketing como outros fatores que pesam para a seleção deste tipo de material (FARUK et al., 2014). Ainda ressalva-se que a indústria, através da incorporação da fibra vegetal ao seu processo, obtém relativa independência no que tange o uso de petróleo e sua volatilidade de preço (FARUK et al., 2014).

O baixo custo da fibra vegetal comparada às fibras sintéticas promoveu uma crescente tendência do seu uso como reforços em compósitos poliméricos (BOGOEVA-GACEVA et al., 2007; FARUK et al., 2012, 2014; LI et al., 2007). O fato deste tipo de fibra ser biodegradável, além de também ser renovável e por isso possuir uma alta disponibilidade, apenas aumentou sua atratividade junto às indústrias (FARUK et al., 2012; JOSEPH et al., 1999; NACHTIGALL et al., 2007; WIELAGE et al., 2003).

Porém, o uso de fibras vegetais traz algumas limitações ao processamento dos compósitos, como por exemplo, a temperatura de processo, que normalmente não ultrapassa os 200°C (BOGOEVA-GACEVA et al., 2007). Ainda pode-se destacar a dificuldade na compatibilidade entre a matriz e as fibras vegetais, grande parte pelo fato da primeira ser hidrofóbica e a segunda ser hidrofílica, o que também ainda proporciona problemas de absorção de água por parte destas (FARUK et al., 2012; LI et al., 2007).

Apesar dos problemas gerados devido à adesão interfacial entre a matriz e as fibras vegetais, como redução no desempenho do compósito, esta área continuará a promover desenvolvimentos e grande parte devido a pressões socioeconômicas, bem como o incentivo da legislação em diversos países para se implantar o conceito de consciência ambiental (FARUK et al., 2012).

No Brasil, da mesma forma, o crescente mercado de plásticos expandiu-se para a produção de compósitos poliméricos com fibras vegetais. Destaque para o crescimento da indústria de termoplásticos que, na última década, apresentou grande desenvolvimento do mercado e da tecnologia por parte do setor industrial (HILLIG et al., 2008). Segundo a Associação Brasileira da

Indústria do Plástico - ABIPLAST (2016) das resinas aplicadas atualmente no mercado, por volta de 71% são termoplásticos, sendo que 35,5% destas é Polietileno (PE), demonstrando assim a alta aplicabilidade deste material, bem como sua importância para a indústria. Já a grande disponibilidade da fibra ou partículas de madeira, principalmente advinda do reaproveitamento dos refugos da indústria moveleira, aliada ao seu aspecto estético proporcionado ao compósito, reforça a importância do seu aproveitamento.

Com o intuito de aumentar a aplicabilidade das fibras vegetais, diversos estudos foram produzidos com o objetivo de se desenvolver técnicas para melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos que utilizam estas fibras, aumentando assim sua competitividade junto às fibras sintéticas. Observou-se que uma boa mistura entre os constituintes proporciona uma melhora nas propriedades do compósito final. Nestas circunstâncias, a extrusora de dupla rosca tornou-se popular para produzir as misturas de fibras vegetais e polímeros, grande parte devido à eficiência deste processo, contudo sua gama de recursos e sua versatilidade também podem ser destacadas (RAUWENDAAL, 2014; TADMOR et al., 2006).

Estudos ainda apresentam que outros fatores, como o índice de fluidez (MFI) da matriz utilizada, possuem certa influência na qualidade do compósito a ser desenvolvido. Trabalhos foram produzidos para se analisar a influência do índice de fluidez da matriz polimérica de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) nas propriedades mecânicas dos compósitos. Verificou-se que ao se aumentar o índice de fluidez da matriz de PEAD, as resistências à tração e ao impacto do compósito reduzem, apresentando pior desempenho (LU et al., 2006; SARABI et al., 2012). Contudo ainda observa-se a necessidade de maiores estudos nesta área, principalmente no que diz respeito à influência do índice de fluidez da matriz nas propriedades do compósito.

Com o intuito de se aprofundar nesta área, este trabalho avaliou a influência do índice de fluidez de três polietilenos de alta densidade na obtenção de compósitos com 10% de fibra de madeira.

### 1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência do índice de fluidez da matriz polimérica de PEAD nas propriedades de compósitos com partículas de madeira obtidas em extrusora dupla rosca.

### 1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral podem-se destacar os objetivos específicos listados abaixo:

- a) Desenvolver formulações com três PEAD com diferentes índices de fluidez com 10% de partículas de madeira;
- b) Avaliar a influência do índice de fluidez da matriz nas propriedades mecânicas e térmicas de compósitos com partículas de madeira;
- c) Avaliar a influência do índice de fluidez da matriz na dispersão e distribuição da fase dispersa em compósitos com partículas de madeira através de análise microestrutural por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura.
- d) Avaliar a viabilidade econômica do uso de compósitos com partículas de madeira.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Características gerais do polietileno

O etileno pode ser polimerizado por vários processos, produzindo assim diferentes tipos de polietileno (PE). Sendo os mais comerciais o polietileno de alta densidade e o polietileno de baixa densidade (EBEWELE, 2000). O primeiro polietileno produzido comercialmente foi em 1939 e a sua polimerização foi executada sob alta pressão (EBEWELE, 2000; FELDMAN et al., 1996).

Polietileno são poliolefinas fabricadas em grande volume, sendo a resina termoplástica mais produzida (ABIPLAST, 2016). Os polímeros podem ser classificados pelo seu volume de produção, podendo ser *commodities* ou especiais. O PE é classificado como *commodities*, devido ao seu alto volume de produção (SALDÍVAR-GUERRA et al., 2013).

Devido a sua ótima propriedade de isolamento elétrico, o polietileno teve como sua primeira aplicação o isolamento de cabos submersos, este material também foi de grande ajuda no desenvolvimento de radares. Atualmente o PE possui diversas áreas de atuação, desde isolantes elétricos até filmes para embalagens, diferentes tipos de bens domésticos, brinquedos, dentre outros (FELDMAN et al., 1996).

Devido às suas características estruturais e propriedades, o polietileno tornou-se um polímero amplamente utilizado. Existem diversos mecanismos para se produzir o polietileno, sendo que um fator importante para a obtenção dos diversos tipos de polietileno é o catalisador utilizado. O catalisador é responsável por controlar o teor de comonômeros incorporados na cadeia polimérica, bem como o tipo e a distribuição de ramificações, sendo que estes aspectos influenciam na densidade, cristalinidade e nas propriedades dos polietilenos (COUTINHO et al., 2003).

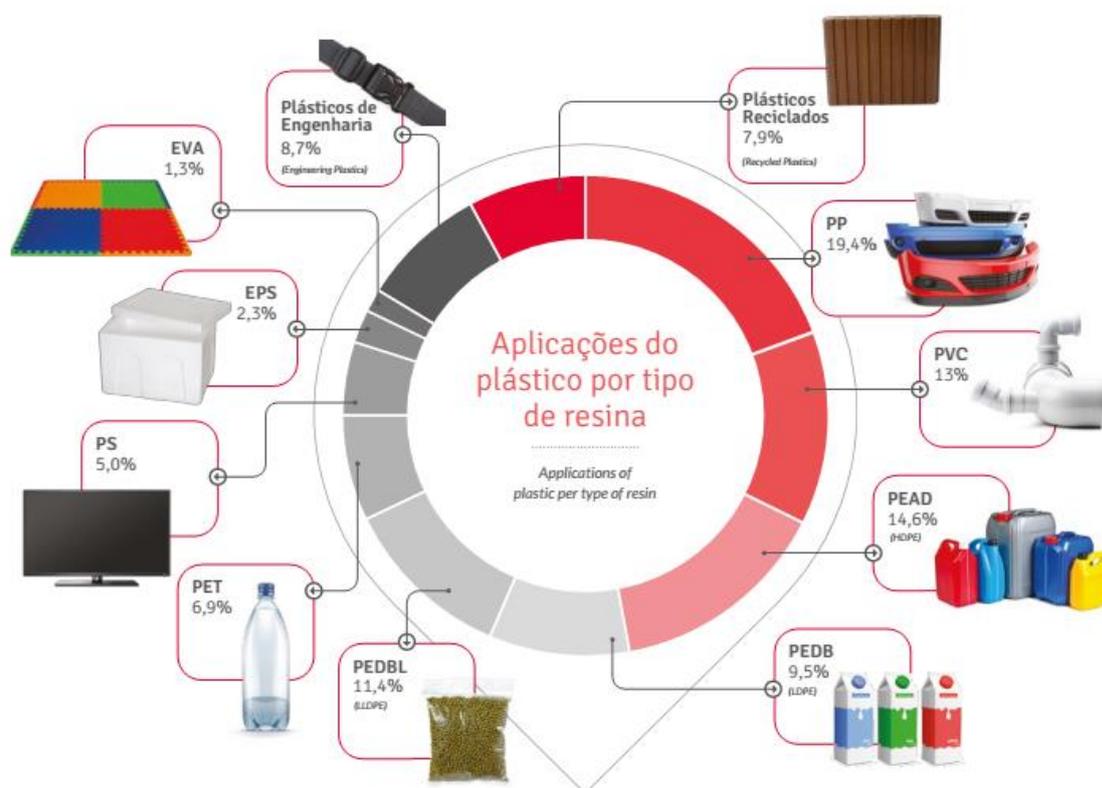
Segundo Coutinho et al. (2003), cinco tipos diferentes de polietileno podem ser produzidos, a depender do mecanismo de obtenção:

- Polietileno de baixa densidade (PEBD);
- Polietileno de alta densidade (PEAD);

- Polietileno linear de baixa densidade (PELBD);
- Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM);
- Polietileno de ultra baixa densidade (PEUBD).

Dados apresentados pela Associação Brasileira da Indústria do Plástico - ABIPLAST (2016) demonstram que o polietileno é a resina mais aplicada pela indústria brasileira, são 35,5% (14,6% de PEAD, 11,4% de PEDBL e 9,5 de PEDB) do total de resinas. Na Figura 1, está apresentado um gráfico com a porcentagem de aplicação para cada resina.

**Figura 1 - Gráfico com a porcentagem das aplicações do plástico por tipo de resina na indústria brasileira.**

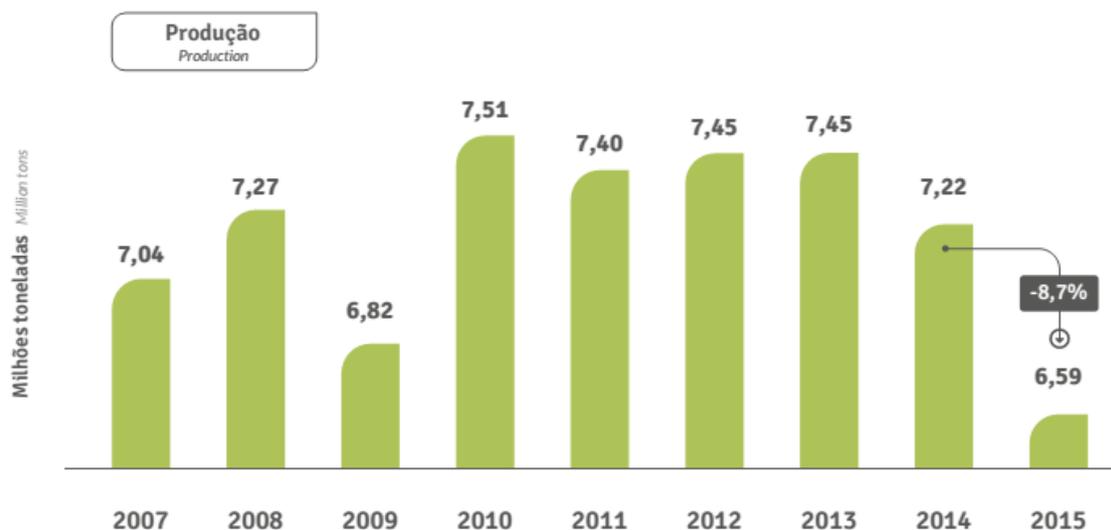


Fonte: (ABIPLAST, 2016)

Ainda segundo a ABIPLAST (2016), no Brasil, a construção civil é o maior consumidor de transformados plásticos com 25,7% do total, seguida pela indústria de alimentos com 19% e da indústria de automóvel e autopeças com 12,1%. Na pesquisa apresentada, o mercado brasileiro mostrou-se com uma desaceleração no consumo de plásticos, com uma redução de 8,7% do ano de 2014 para o de 2015. E o principal motivo foi a queda das atividades industriais, semelhante ao ocorrido entre 2008 e 2009, quando o país vivenciou

uma crise econômica. A indústria de construção civil apresentou uma retração, no ano de 2015, de 11,2%, enquanto a automotiva apresentou uma queda mais crítica de 25,9%. Na Figura 2 pode-se observar a produção de plásticos na indústria nacional desde 2007 até 2015.

**Figura 2 – Produção nacional de transformados plásticos.**



Fonte: (ABIPLAST, 2016)

Como se pode observar na Figura 1, o PEAD é o polietileno de maior porcentagem no mercado nacional, sendo assim de grande importância. Será dada maior ênfase no PEAD neste trabalho, sendo este, o material utilizado no estudo.

### 2.1.1 Polietileno de alta densidade (PEAD)

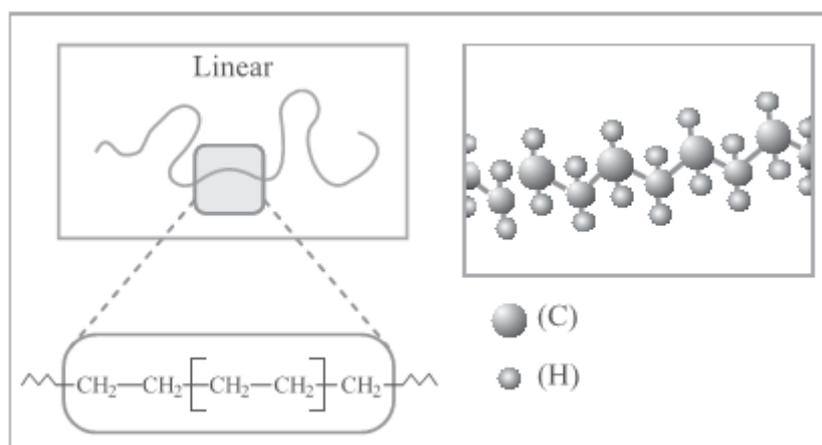
O PEAD pode ser obtido através de diversos processos, incluindo a polimerização do etileno sob altas pressões, polimerização por coordenação de etileno e polimerização do etileno com catalizador metal-óxido (BILLMEYER, 1984). Atualmente os dois últimos métodos são mais utilizados na indústria para a produção do PEAD. O processo é executado através do uso dos catalisadores Ziegler-Natta (por coordenação) e Phillips (metal-óxido). O primeiro utiliza alquilas de alumínio ou titânio. Já o segundo consiste na utilização de um catalisador a base de óxido suportado em sílica ou alumina (EBEWEL, 2000; SOARES et al., 2013). Ebewele (2000) ainda afirma que a

polimerização por coordenação necessita de menores temperaturas e pressões, em relação ao processo com metal-óxido.

O PEAD, devido a sua cristalinidade e à diferença de índice de refração entre suas fases amorfa e cristalina, é translúcido e menos transparente que o PEBD, que é menos cristalino. A depender do mecanismo de obtenção do PEAD, este pode variar o peso molecular e as ramificações, sendo que ao se aumentar o teor de ramificações, a cristalinidade diminuirá, além de promover uma variação relevante das propriedades mecânicas, pois causará um aumento no alongamento na ruptura e uma redução da resistência à tração (COUTINHO et al., 2003).

O PEAD é altamente cristalino (o grau de cristalinidade fica entre 80-95%) e apresenta um baixo teor de ramificações. O PEAD possui menos de uma cadeia lateral para 200 átomos de carbono na cadeia principal. Este material possui temperatura de fusão entre 127-135 °C e sua densidade está entre 0,941-0,965 g/cm<sup>3</sup> (EBEWELE, 2000). A Figura 3 demonstra uma representação esquemática do PEAD, apresentando sua linearidade, devido ao seu baixo teor de ramificações.

**Figura 3 - Representações esquemáticas da estrutura do PEAD.**



**Fonte: (COUTINHO et al., 2003).**

Segundo Coutinho et al. (2003), o PEAD é empregado por diversas indústrias de diferentes segmentos de transformação de plásticos, desde moldagem por sopro até extrusão e moldagem por injeção. Com aplicações que abrangem diversas áreas como fabricação de brinquedos, baldes, bacias,

banheiras infantis, potes para alimentos, bandejas, assentos para sanitários, tampas de garrafas, entre outros.

A maior diferença nas propriedades entre o PEAD e o PEBD, é devido à alta cristalinidade do primeiro. O PEAD é mais rígido que o PEBD, e possui maior ponto de fusão e maior resistência à tração e dureza (BILLMEYER, 1984).

## 2.2 Fibras vegetais

Há uma tendência crescente do uso de fibras vegetais como reforços para compósitos poliméricos nos últimos anos. Grande parte devido a sua flexibilidade durante o processamento e seu baixo custo (BOGOEVA-GACEVA et al., 2007; FARUK et al., 2012; LI et al., 2007). Outros aspectos como, baixa densidade e alta disponibilidade, e por ser renovável e biodegradável, tornam as fibras vegetais um reforço cada vez mais atrativo (FARUK et al., 2012; JOSEPH et al., 1999; NACHTIGALL et al., 2007; WIELAGE et al., 2003).

Segundo Janarthanan et al. (2006) as fibras vegetais são advindas das fibras naturais, estas, por sua vez, são divididas segundo sua origem (vegetais, animais ou minerais). Geralmente, as fibras vegetais são utilizadas como reforço de plásticos. Exemplos de fibras vegetais são as fibras de coco, sisal, cânhamo, juta, além de algodão e paina (BLEDZKI et al., 1999). A Figura 4 apresenta a classificação das fibras naturais segundo sua origem.

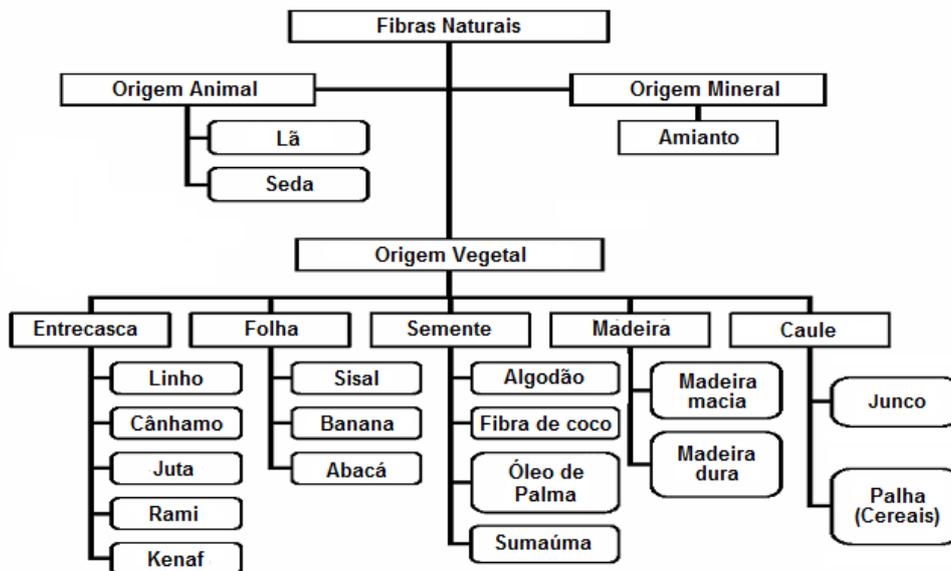
Joseph et al. (1999), também, afirma que com a utilização de fibras vegetais, como reforço para os compósitos poliméricos, é possível produzir uma melhoria nas propriedades mecânicas do compósito, contudo os parâmetros do processo de mistura afetam diretamente as propriedades finais deste.

As principais vantagens das fibras vegetais segundo Bledzki et al. (1999) são:

- Possuem baixo custo quando comparados aos reforços sintéticos empregados atualmente;
- São materiais renováveis, pois possuem uma disponibilidade quase ilimitada;

- Possuem uma natureza abrasiva consideravelmente menor que fibras artificiais, como a fibra de vidro, causando menor desgaste nos equipamentos do processo;
- São materiais menos nocivos ao meio ambiente, de forma que após esgotar a sua vida útil podem ser compostados.

**Figura 4 - Classificação das fibras naturais.**



**Fonte: Adaptado (JANARTHANAN et al., 2006)**

Contudo, as principais desvantagens das fibras vegetais são a baixa compatibilidade entre a fibra e a matriz hidrofóbicas e a alta absorção de umidade (FARUK et al., 2012; LI et al., 2007). Segundo Bogoeva-Gaceva et al. (2007), ainda é possível destacar a limitação da temperatura de processamento (até cerca de 200 °C) e baixa estabilidade dimensional (devido a encolhimento e inchaço). Outro aspecto ressaltado pelos autores é o fato de que fibras vegetais não possuem comprimentos uniformes, sendo que este parâmetro influencia diretamente nas propriedades mecânicas dos materiais. As propriedades físicas e mecânicas do compósito não vão depender apenas da fonte da fibra, mas também de aspectos como diâmetro da fibra, comprimento da fibra, da taxa de deformação e da temperatura do processo (LI et al., 2006). Migneault et al. (2009) afirma que a razão de aspecto L/D da fibra, que é a razão entre seu comprimento e diâmetro, também irá influenciar nas

propriedades do compósito, de forma que ao se aumentar a razão de aspecto, as propriedades mecânicas dos compósitos irão aumentar.

Porém Faruk et al. (2012) destaca que apesar da adesão interfacial entre as fibras vegetais e matriz ainda ser uma questão chave, em termos de desempenho do compósito, uma vez que isto determina as propriedades finais do material, os desenvolvimentos nessa área continuarão a crescer principalmente devido a pressões da população e da legislação em relação à consciência ambiental.

Para Dittenber et al. (2012), mesmo que, atualmente, os compósitos com fibras vegetais sejam menos rentáveis em relação aos compósitos com fibras sintéticas, a diferença de preço mostra sinais de uma contínua redução, na qual, eventualmente, as fibras vegetais não serão apenas a escolha ambientalmente mais correta, mas também a mais econômica.

Existem ainda algumas propriedades dos compósitos com fibras vegetais que em alguns casos são superiores as das fibras sintéticas, como a de vidro. Desta forma, as fibras vegetais podem substituir as fibras sintéticas em algumas aplicações que, por exemplo, não necessitam de altas capacidades de resistência ao carregamento (WAMBUA et al., 2003).

De acordo com Bledzki et al. (1999) as fibras vegetais são basicamente compostas por celulose, hemicelulose, lignina, pectina, graxas e substâncias solúveis em água.

### **2.2.1 Resíduo de madeira**

A indústria de movelaria gera, em seus processos de fabricação, uma considerável quantidade de resíduos, que em alguns casos é aproveitada para fins específicos (HILLIG et al., 2008), este fato apenas reforça a importância do aproveitamento do refugo do processo, na cadeia produtiva de compósitos.

Segundo Hillig et al. (2008) compósitos com polímeros termoplásticos e resíduos de madeira tiveram, na última década, notório crescimento, principalmente no Brasil, devido ao expressivo desenvolvimento do mercado e da tecnologia por parte da indústria.

Assim como qualquer fibra vegetal, os diversos tipos de processamento geram partículas de madeira que variam de tamanho para tamanho, Hillig et al.,

(2008) salienta que, em geral, estes resíduos se apresentam, principalmente, na forma de retalhos e serragem. Já Stark et al. (2005), afirmam que uma das fibras vegetais mais comumente utilizadas pelas indústrias de termoplásticos é a fibra de madeira. Sua utilização tem o intuito de reforçar o compósito, melhorando assim, a resistência do material, bem como sua rigidez.

Assim como a fibra vegetal, a fibra de madeira possui as mesmas vantagens, como baixa densidade, baixo custo, baixa abrasividade ao equipamento do processo, altas propriedades específicas e ser biodegradável. Contudo a baixa adesão interfacial entre a fibra da madeira (hidrofílico) e o polímero (hidrofóbico) é considerada uma grande desvantagem, podendo causar baixas propriedades mecânicas do produto final (KARMARKAR et al., 2007).

Segundo Teixeira et al. (2004), os resíduos da indústria de movelaria podem ser classificados basicamente em quatro formas: pó de serra, maravalha (lascas) média e fina, pó-de-serra fibroso e tocos e pontas de toras. Na Figura 5 estão dispostas imagens representativas destes resíduos, bem como os processos que as geraram.

**Figura 5 - Representação dos resíduos das indústrias de movelaria.**



**Fonte: (TEIXEIRA et al., 2004).**

Já Kretschmann et al. (2007) faz uma caracterização mais abrangente da madeira e seus resíduos, classificando pelo tamanho desde 20 m até tamanhos menores que 1 nm. Na Figura 6 pode-se observar esta classificação mais completa.

**Figura 6- Classificação por tamanho da madeira e dos resíduos da indústria.**



**Fonte: Adaptado (KRETSCHMANN et al., 2007)**

Através de um tratamento desses resíduos, selecionando e analisando devidamente, através de classificação granulométrica, podem-se produzir compósitos diversos, cada um com um tipo de granulometria e com o intuito de aumentar a utilização dos resíduos como reforços para matriz polimérica (TEIXEIRA et al., 2004). Desta forma, aumentando o aproveitamento da madeira, reduzindo o desperdício e rejeitos a serem descartados, e produzindo produtos com maior valor agregado.

Vitoriano et al. (2005) demonstraram que o aspecto estético proporcionado pela fibra de madeira numa matriz polimérica é de boa qualidade e que o aumento dos percentuais do particulado resulta em tonalidades diferentes. Os autores ressaltam ainda que esta modificação ocorreu sem uso de corantes e que isto torna o material mais atrativo do ponto de vista estético.

### 2.3 Compósitos com fibras vegetais

Um compósito é um material que consiste em dois ou mais componentes (BARSCHKE et al., 2009; MATTHEWS et al., 2000). Matthews et al. (2000), ainda ressaltam que se devem avaliar outros três pontos, antes de denominar um

material de compósito. O primeiro deles consiste na análise da quantidade de ambos os componentes, que devem ser razoavelmente proporcionais. Em segundo, as fases constituintes devem possuir propriedades distintas e diferentes, de modo que as propriedades do compósito sejam diferentes das propriedades dos componentes. Por fim, o compósito sintético é normalmente produzido pela mistura e combinação dos constituintes, através de diversos meios.

Como supracitado, o compósito tem duas (ou mais) fases que são separadas por uma interface bem definida. O constituinte denominado matriz é contínuo e geralmente está presente em maior quantidade (MATTHEWS et al., 2000). Normalmente as propriedades da matriz são melhoradas ao se incorporar o constituinte de reforço para produzir o compósito (GERDEEN et al., 2012; KRACALIK et al., 2010; MATTHEWS et al., 2000). As matrizes dos compósitos podem ser de cerâmica, metal ou polímeros, sendo que suas propriedades mecânicas são consideravelmente diferentes (MATTHEWS et al., 2000). Contudo, devido a sua importância econômica será dada maior ênfase, neste trabalho, aos compósitos de matriz polimérica.

O segundo constituinte é conhecido como fase dispersa, o qual é responsável por aumentar ou fortalecer as propriedades mecânicas da matriz (GERDEEN et al., 2012; MATTHEWS et al., 2000; SHENOI et al., 2002). Ambos os constituintes agem para maximizar o desempenho das propriedades específicas do compósito (SHENOI et al., 2002), tais propriedades do compósito são uma função, também, das quantidades relativas dos constituintes, bem como da geometria da fase dispersa (MATTHEWS et al., 2000).

O desenvolvimento dos compósitos poliméricos com fibras vegetais, atualmente, tem chamado a atenção, principalmente, devido à consciência ambiental e a necessidade de se reduzir o uso de combustível fóssil e os produtos a este relacionados (HO et al., 2012). Annie Paul et al. (2008) também afirma que os compósitos com fibras vegetais têm se tornado popular, e ressalta que estas têm sido utilizadas de forma efetiva como reforços.

Contudo as propriedades dos compósitos com fibras vegetais são altamente dependentes das propriedades da fibra utilizada como diâmetro,

comprimento, distribuição, orientação e fração de volume da fibra (ANNIE PAUL et al., 2008).

Segundo Correa et al. (2003), os compósitos com fibras vegetais apresentam diversas vantagens como uma fase de reforço, em detrimento de fibras sintéticas, são elas:

- Temperaturas de processamento mais baixas – resultando numa redução do consumo de energia;
- Redução nos ciclos de moldagem em produtos injetados – aumentando, assim, a produtividade do processo;
- Menor peso específico – necessitando de uma quantidade menor de resina no processo e reduzindo custos com transporte por tonelada;
- Redução nos desgastes das ferramentas – redução de custos com manutenções e paradas.

Apesar da crescente utilização de fibras vegetais na composição de compósitos, no Brasil, ainda existe uma relutância por parte do setor industrial. Este fato decorre da falta de dados técnicos sobre os materiais e os processos, contudo grande parte é devido à falta de certificação local dos fornecedores de matéria-prima, bem como a ausência de equipamentos específicos e de demanda para estes produtos (CORREA et al., 2003).

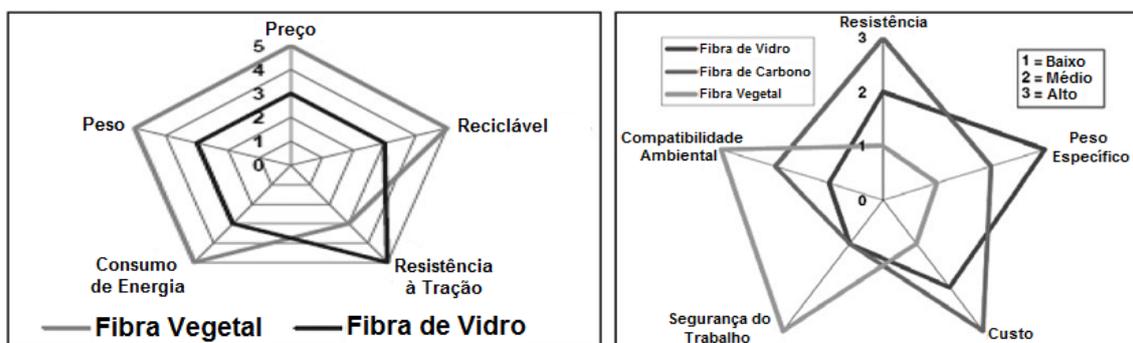
### **2.3.1 Aspectos mercadológicos**

Os compósitos com fibras vegetais têm ganhado a preferência em relação à fibra de vidro e a fibra de carbono, principalmente devido ao seu custo. Segundo Faruk et al. (2014) a fibra vegetal leva vantagem em relação às fibras sintéticas na maioria dos parâmetros com exceção da resistência do material. Através da Figura 7 pode-se observar no gráfico a esquerda que a fibra vegetal possui preço menor que a fibra de vidro, sendo sua aplicação mais vantajosa em outros aspectos como peso reduzido e o baixo consumo de energia para o processamento, além do fato da fibra vegetal ser reciclável. Contudo sua desvantagem apresenta-se na sua resistência à tração que é menor, mas que em algumas aplicações não é tão relevante.

Faruk et al. (2014) apresentam ainda no gráfico da direita na Figura 7 um comparativo da fibra de vidro, fibra de carbono e fibra vegetal, e novamente

observa-se que a fibra vegetal apresenta menor custo e menor peso específico, bem como maior segurança do trabalho e compatibilidade ambiental, em detrimento das outras duas fibras.

**Figura 7 - Comparação entre fibra vegetal, fibra de vidro e fibra de carbono.**

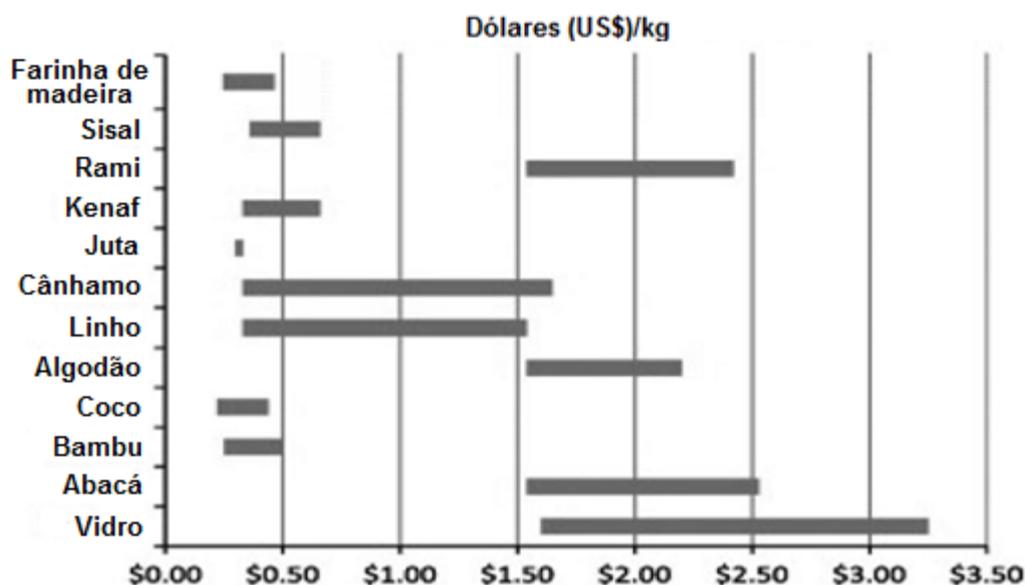


Fonte: Adaptado (FARUK et al., 2014).

Faruk et al. (2014) ainda ressalta que a indústria automotiva tem adotado a aplicação de compósitos com fibra vegetal principalmente pelo preço, redução de peso, reciclagem e incentivos de marketing, em detrimento das exigências técnicas. A fibra vegetal também proporciona às empresas que a utiliza, certa independência em relação à volatilidade do preço do petróleo e seus derivados, pois a fibra vegetal é uma fonte renovável e abundante (FARUK et al., 2014).

Tanto Faruk et al. (2014) quanto Bogoeva-Gaceva et al. (2007) apresentaram um comparativo do custo por peso das fibras vegetais com as fibras sintéticas ficando evidente que as fibras sintéticas chegam a ser 13 vezes mais cara que as fibras vegetais. Na Figura 8 está disposta a variação de preço de algumas fibras vegetais e sintéticas nos Estados Unidos, a figura foi adaptada com o acréscimo do custo da farinha de madeira, que tem seu preço entre US\$ 220,00 e US\$ 420 a tonelada, sendo a de menor preço a fibra menos refinada (com maior granulometria) e a de maior preço a mais refinada (com menor granulometria). A Tabela 1 também apresenta o preço de algumas fibras juntamente com o preço da farinha de madeira.

Figura 8 - Comparação do custo por peso entre a fibra de vidro e as fibras vegetais.



Fonte: Adaptado (FARUK et al., 2014).

Tabela 1 - Comparação do preço entre fibras sintéticas e fibras vegetais.

Fibra	Carbono	Aço	Vidro	Sisal	Juta	Coco	Madeira Grossa	Madeira Fina
<b>Custo (US\$/kg)</b>	200	30	3,25	0,36	0,30	0,25	0,22	0,42

Fonte: Adaptado (BOGOEVA-GACEVA et al., 2007).

O uso da fibra vegetal em compósitos pode ser considerado uma forma de gestão de resíduos, que segundo Armando et al. (2009) é o gerenciamento de refulos industriais compreendidos à: segregação, acondicionamento, coleta, transporte, armazenamento, reciclagem e destinação final. De forma que, o reaproveitamento de resíduos advindos das indústrias de movelaria, dentre outras, reduz a quantidade de refulos direcionados a aterros e a incineração inadequada. Tais aspectos corroboram para diminuir o impacto ambiental agregado a este tipo de processo.

### 2.3.2 Mistura

Atualmente a maioria dos processos envolve alguma forma de mistura. A importância deste processo se dá pelo fato que a qualidade final do produto, na

maioria dos processos que envolvem polímeros, depende de quão boa foi executada a mistura. As propriedades mecânicas do compósito são altamente influenciadas pela qualidade da mistura (OSSWALD et al., 2006).

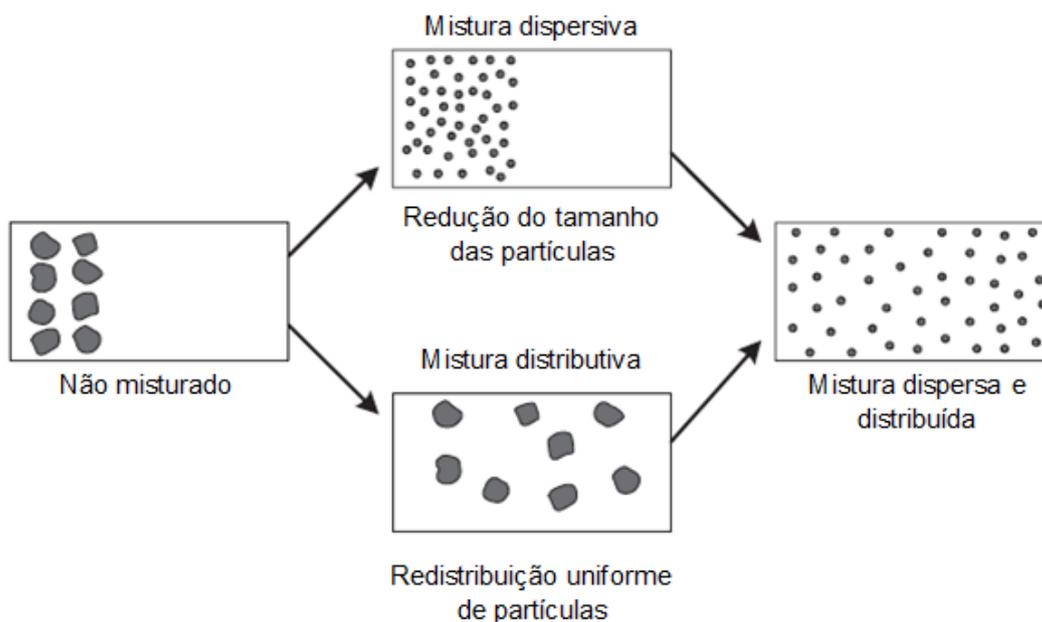
Um das diversas aplicações da extrusora rosca dupla é o processo de mistura de dois componentes (matriz e reforço), desta forma, obtendo um compósito com melhores propriedades (LAFLEUR et al., 2014).

Os objetivos principais da mistura na produção e processamento de polímeros, segundo (KOHLGRÜBER, 2008), são:

- Incorporação de enchimentos, fibras e aditivos;
- Mistura de componentes para reações químicas;
- Produção de misturas de polímeros similares ou dissimilares;
- Homogeneização.

Segundo Lafleur et al. (2014), existem dois tipos de misturas, distributiva e dispersiva. A mistura distributiva é controlada pela cinemática do fluido e as trajetórias complexas, executadas pelas partículas, permitem uma distribuição homogênea destas na matriz. Já a mistura dispersiva está associada às tensões aplicadas às partículas, que se quebram, reduzindo de tamanho. Na Figura 9 pode-se observar a diferença entre uma mistura dispersiva e distributiva.

**Figura 9 - Exemplos de misturas dispersa e distribuídas.**



Fonte: Adaptado (TADMOR et al., 2006).

Durante o processo de extrusão, estes dois tipos de misturas podem ocorrer sequencialmente, iniciando com a redução do tamanho dos aglomerados, que se quebram, reduzindo a partículas, que posteriormente é homogeneizado no interior da matriz. As diferentes configurações de rosca podem contribuir para este processo (LAFLEUR et al., 2014).

Rauwendaal (2014) afirma que com a mistura dispersiva, sempre ocorrerá uma mistura distributiva. No entanto, o inverso nem sempre acontece. Na mistura distributiva, pode haver uma mistura dispersiva apenas se a tensão atuante no componente sólido for maior que a suportada por este.

Um aspecto muito importante do estudo de mistura é a caracterização da mistura. Uma caracterização completa requer a especificação do tamanho, a forma, a orientação e localização espacial de cada elemento discreto do componente menor, contudo este tipo de caracterização é muito complexa e, normalmente, inviável (RAUWENDAAL, 2014).

### 2.3.2.1 Distribuição

Mistura distributiva ou mistura laminar geralmente é caracterizada por uma distribuição da partícula ou fase secundária no interior da matriz. Esta distribuição é alcançada mediante a imposição de grandes deformações no sistema de tal modo que a área da interface entre as duas ou mais fases aumenta, enquanto as dimensões locais ou espessura das estrias da fase secundária diminuem (OSSWALD et al., 2006).

Ainda segundo Osswald et al. (2006) a imposição de grandes deformações no sistema nem sempre é suficiente para se conseguir uma mistura homogênea. O tipo de dispositivo, a orientação inicial e a posição dos dois ou mais componentes da mistura desempenham um papel considerável na qualidade da mistura. Já Kohlgrüber (2008) afirma que altas tensões não necessariamente devem ser aplicadas, pois o número e tipo de processos de reorganização são mais decisivos para a qualidade da mistura.

### 2.3.2.2 Dispersão

Diferentemente da mistura distributiva, que envolve apenas distribuir alguns elementos em um volume, a mistura dispersiva envolve desagregar, partículas sólidas (KOHLGRÜBER, 2008; OSSWALD et al., 2006). Desta forma, altas tensões devem ser aplicadas para quebrar estes aglomerados. A mistura dispersiva depende, sobretudo, da magnitude da taxa de cisalhamento e taxa de alongamento, bem como a duração da aplicação da tensão (KOHLGRÜBER, 2008).

## 2.4 Processo de Extrusão

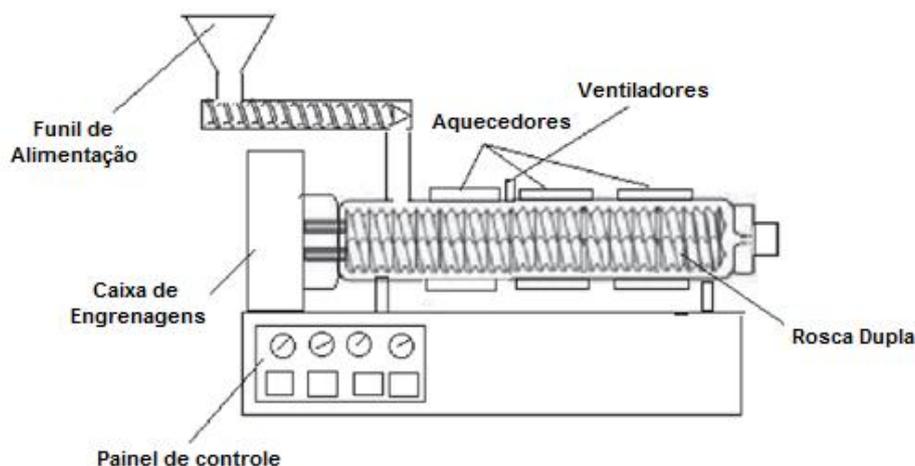
Extrusão é um dos mais importantes métodos de processamento de polímeros. Trata-se de um processo de transporte de sólidos, fusão, mistura, homogeneização e afeta, consideravelmente a qualidade dos produtos poliméricos (SUBRAMANIAN, 2015).

Subramanian (2015) afirma que a extrusora é uma máquina muito complexa, e processa vários tipos de materiais e viscosidades, sobre altas temperaturas e pressões. A extrusora executa processo de mistura, deformação, fusão, homogeneização para, por fim, extrudar numa matriz, dando forma a peça final.

Existem diversos tipos de extrusoras, sendo que algumas podem se sobressair a depender de suas aplicações e desempenhos.

As extrusoras dupla rosca se destacam em relação às demais extrusoras, por serem utilizadas em uma grande variedade de aplicações, podendo trabalhar tanto na produção como no processamento de plásticos e na mistura de compósitos (KOHLGRÜBER, 2008). A Figura 10 apresenta esquematicamente a extrusora dupla rosca. A extrusora dupla rosca é considerada mais versátil em relação à extrusora mono rosca, posto que a primeira possui um número maior de configurações, como direções de rotação, grau de interpenetração, dentre outros (RAUWENDAAL, 2014). Tadmor et al. (2006), ressalta também que a ação de mistura é mais intensa na extrusora de dupla rosca, produzindo misturas mais dispersivas e distribuídas.

**Figura 10 - Representação esquemática da extrusora dupla rosca.**



**Fonte: Adaptado (SUBRAMANIAN, 2015).**

Rauwendaal (2014) destaca que o movimento executado pelo fluido na extrusora mono rosca é mais simples em relação ao movimento na extrusora dupla rosca, contudo este movimento mais complexo promove diversas vantagens como, boa mistura, boa transferência de calor, alta capacidade de fusão, boa capacidade de remoção de gases e bom controle sobre o material dentro da extrusora.

Na Tabela 2 observa-se um comparativo entre algumas características da extrusora mono rosca e da extrusora dupla rosca.

**Tabela 2 - Comparativo entre a extrusora dupla rosca e a extrusora mono rosca.**

<b>Extrusora Dupla Rosca</b>	<b>Extrusora Mono Rosca</b>
Usada para perfis, mistura e extrusão	Usada em extrusão de perfis simples e coextrusão
Alta flexibilidade em relação a modelos de rosca e barril	Pouca flexibilidade em relação a modelos de rosca e barril
Alimentação versátil, compatível com blendas, pós e líquidos	Aditivos escorregadios tendem a dar problemas
Maior custo	Menor custo
Funciona em altas rotações	Normalmente utiliza-se com baixas rotações

**Fonte: Adaptado (RAUWENDAAL, 2014).**

O processo de extrusão utilizando uma dupla rosca foi desenvolvido no início do século 20, juntamente com a extrusão mono rosca. Este processo ganhou maior popularidade nos últimos 30 anos, com destaque para a

extrusora de dupla rosca corotativa, bastante utilizada para composição de plásticos e fabricação de materiais complexos (LAFLEUR et al., 2014).

Segundo Lafleur et al. (2014) a extrusora dupla rosca possui dois parafusos paralelos que giram dentro de um barril com secção transversal na forma de oito e, diferente da extrusora de mono rosca, possui diferentes tipos de classificação, podendo ser classificadas seguindo dois principais critérios:

- Direção de rotação do parafuso:
  - Corotação – os dois parafusos giram na mesma direção;
  - Contra-rotação – os dois parafusos giram em sentidos opostos.
- Interpenetração: quando as roscas dos parafusos são intercaladas, podem possuir as seguintes configurações:
  - Interpenetração completa;
  - Interpenetração parcial;
  - Tangencial;
  - Sem interpenetração.

Diferentes tipos de combinações de configurações são possíveis, e estas dependem da aplicação desejada. Roscas interpenetradas são normalmente utilizadas para transportar e pressionar, enquanto a tangencial e a sem interpenetração são utilizadas para misturar fluidos de baixa viscosidade (LAFLEUR et al., 2014).

As extrusoras dupla rosca com interpenetração completa, possuem menor probabilidade de estagnação e degradação do polímero, pois as roscas estão dispostas de forma que o filete de uma rosca se encaixa no canal da outra, apresentando, assim, características auto-limpantes (ALVES, 2012). Este movimento de intercalação entre um filete e outro, funciona, também, empurrando o material para frente, fazendo o material movimentar de uma rosca para outra, promovendo um movimento mais eficiente (RAUWENDAAL, 2014).

Rauwendaal (2014) ratifica que existe uma grande variedade de extrusoras dupla rosca, com diversos designs, princípios de operação e campos de aplicação. Na Tabela 3 nota-se uma classificação baseada na configuração geométrica da extrusora dupla rosca.

Tabela 3 - Classificação da extrusora dupla rosca.

Extrusora com interpenetração	Extrusora corotativa	Extrusora de baixa velocidade para extrusão de perfis
	Extrusora contra-rotativa	Extrusora de alta velocidade para mistura
Extrusora sem interpenetração		Extrusora cônica para extrusão de perfil
	Extrusora contra-rotativa	Extrusora paralela para extrusão de perfil
Extrusora corotativa		Extrusora de alta velocidade para mistura
	Extrusora corotativa	Comprimento igual de parafuso
Extrusora corotativa		Comprimento diferente de parafuso
	Extrusora corotativa	Não usado na prática

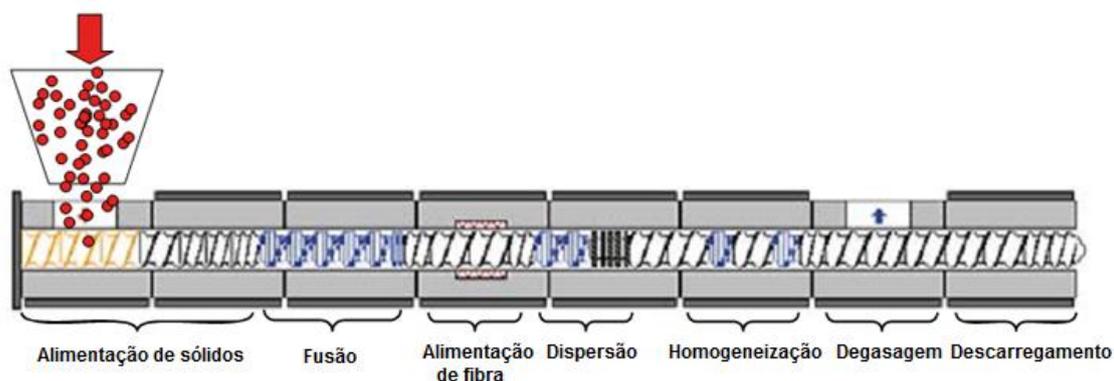
Fonte: Adaptado (RAUWENDAAL, 2014).

A extrusora dupla rosca estabeleceu-se na indústria de processamento de polímeros, sendo utilizada em duas principais áreas: extrusão de perfis de materiais termicamente sensíveis e operações especiais de processamento de polímeros, como por exemplo, mistura, reações químicas, entre outros (RAUWENDAAL, 2014).

Na extrusora de dupla rosca, basicamente, o polímero sólido chega às roscas através de um funil alimentador, e segue-se eficientemente para frente. Em seguida o polímero passará pela região de plastificação, na qual este deverá ser completamente fundido, sendo que esta fusão é promovida pelo cisalhamento e pelo aquecimento térmico das mantas elétricas. Logo após, a massa polimérica fundida é homogeneizada na região da mistura, seguindo por fim para a região responsável pelo controle de vazão (RAUWENDAAL, 2014).

Na Figura 11 Kohlgrüber (2008) apresenta as zonas de processo da extrusora dupla rosca, acrescentando regiões onde ocorre a alimentação da fibra, dispersão da fibra e a região para liberação de gases oriundos do processo (degasagem).

Figura 11 - Zonas de processo de uma extrusora de dupla rosca.



Fonte: Adaptado (KOHLGRÜBER, 2008).

As zonas funcionais da extrusora dupla rosca são iguais as da extrusora mono rosca, são elas: zona de transporte, zona de fusão e a zona do fundido (LAFLEUR et al., 2014). Na Figura 12 tem-se uma apresentação da rosca de um extrusora dupla rosca, com a divisão de cada zona.

Figura 12 - Representação das zonas da rosca da extrusora dupla rosca.



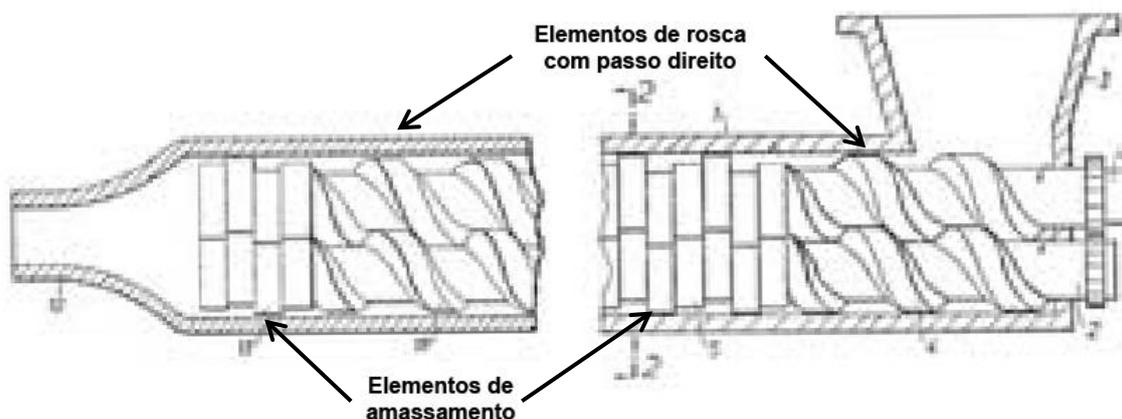
Fonte: Adaptado (LAFLEUR et al., 2014).

Um fator importante da rosca é o seu passo, devendo sempre ser levado em consideração. O passo da rosca é a medida compreendida entre dois filetes e tem como função controlar o grau de enchimento com uma vazão e uma velocidade constantes. Um grau baixo de enchimento é proporcionado por um passo mais largo, porém o tempo de residência torna-se pequeno. Já o passo mais curto aumenta o grau de enchimento, o que favorece o processo de transferência de calor, pois maximiza a área de contato do material com a superfície do barril (DUTRA, 2009).

Como supracitado, uma das maiores vantagens da extrusora dupla rosca é sua versatilidade, este fato ocorre devido à característica modular deste tipo de extrusora. Elas são compostas por pequenas peças de determinados comprimento chamadas de elementos de roscas, estes elementos podem ser configurados de diversas maneiras, de tal forma que várias configurações de rosca são produzidas a depender dos requisitos do material (LAFLEUR et al., 2014).

Na Figura 13 pode-se observar o princípio modular da rosca da extrusora dupla rosca.

**Figura 13 - Rosca representada com diversos elementos caracterizando o princípio modular da extrusora dupla rosca.**



**Fonte: Adaptado (KOHLGRÜBER, 2008).**

Clélia et al. (2000) afirmam que esta vantagem, da possibilidade de configurações na rosca da máquina, ocorre devido à existência de diversos elementos de rosca de condução e mistura.

Os elementos de condução possuem alguns fatores determinantes para o tipo de fluxo, são eles: passo, largura e número de filetes por unidade de comprimento. Já os elementos de mistura são responsáveis por impor a ação de cisalhamento e de mistura do fundido (CLÉLIA et al., 2000).

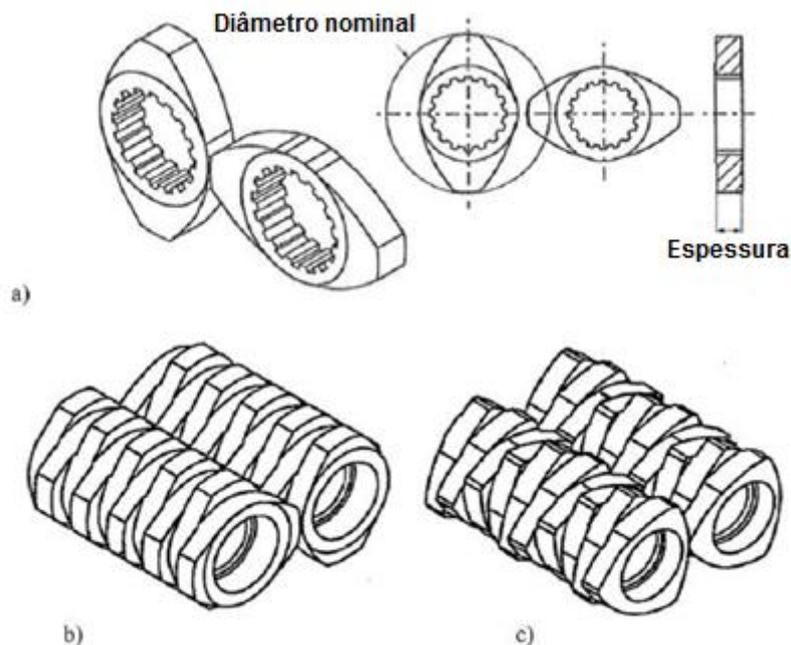
É possível utilizar diversos tipos de elementos de rosca para compor a rosca, com o intuito de melhorar o desempenho misturador da extrusora (KOHLGRÜBER, 2008).

Segundo Lafleur et al. (2014), estes elementos podem ser de dois tipos (indicados nas Figura 12 e Figura 13):

- Elementos de rosca com passo esquerdo ou direito (condução);
- Elementos de amassamento (mistura).

Os elementos de amassamento são não helicoidais, mas possuem espessura e seção transversal igual à dos elementos de roscas para condução. Eles são montados nos eixos, lado a lado, de forma que um tem certo ângulo em relação ao outro, desta forma, são produzidos fluxos complexos durante a rotação da rosca, permitindo assim uma mistura eficiente (LAFLEUR et al., 2014). Na Figura 14 estão representados esquematicamente alguns tipos de elementos de rosca de amassamento.

**Figura 14 - a) Elementos de amassamento de duas pontas; b) bloco composto de elementos de amassamento de duas pontas dispostos a 90°; c) bloco composto de elementos de amassamento de três pontas dispostos a 30°.**



**Fonte: Adaptado (LAFLEUR et al., 2014).**

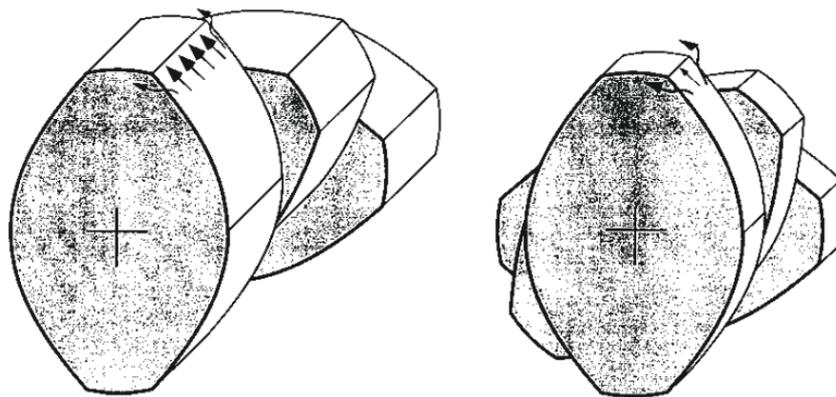
Rauwendaal (2014) afirma que a depender da largura dos elementos de amassamento, as partículas da mistura podem ser melhores distribuídas (mistura distributiva) ou ter seus tamanhos reduzidos (mistura dispersiva).

Para misturas distributivas utilizam-se elementos menos largos, enquanto que para misturas dispersiva utilizam-se elementos mais largos, isso porque quando o disco é menos largo existe uma maior probabilidade do material de escapar da região de amassamento (altas tensões). Já quando

estes são mais largos uma maior parte das partículas passa pelo espaço entre a parede do barril e o elemento de amassamento, onde este sofre um maior cisalhamento, favorecendo a dispersão da segunda fase (RAUWENDAAL, 2014).

Na Figura 15 pode-se observar uma comparação entre os dois tipos de elementos.

**Figura 15 - Exemplo de elemento de amassamento mais largo (à direita) e menos largo (à esquerda).**



Fonte: (RAUWENDAAL, 2014).

#### 2.4.1 Extrusão de compósitos

Como já citado, o processo de extrusão é muito utilizado na mistura de materiais poliméricos com reforços, sejam eles, fibras vegetais ou sintéticas. BOGOEVA-GACEVA et al. (2007) e LI et al. (2006) afirmam que os parâmetros do processo de extrusão, tais como a temperatura, influenciam nas propriedades finais do produto. Sendo necessário assim um estudo destes efeitos causados pelos parâmetros.

Segundo Subramanian (2015) os parâmetros do processo de extrusão são:

- Velocidade da rosca;
- Temperatura do barril;
- Torque do motor;
- Pressão de extrusão;
- Temperatura do material.

Os parâmetros do processo podem produzir diferentes efeitos no produto final. Por exemplo, quanto maior for o ponto de fusão do polímero, menor será a taxa de plastificação, já quanto maior for a temperatura no cilindro, maior será a taxa de plastificação. Por sua vez, quanto maior for a velocidade do parafuso, melhor será a quantidade de calor gerado devido dissipação viscosa, contudo a quantidade de calor transferido para o polímero será menor, devido ao menor tempo de permanência do polímero na câmara (SUBRAMANIAN, 2015).

A energia de deformação aumenta a dispersão da fibra na matriz, contudo causa maior quebra das fibras, o que limita o efeito de reforço, além de causar uma alta degradação tanto da fibra como do polímero, devido à alta temperatura local. Já as propriedades mecânicas dos compósitos são mais afetadas pelo teor de fibra, do que pela velocidade da rosca (LE BAILLIF et al., 2009).

Wall (1989) afirma que o comprimento médio da fibra e a ligação da matriz com a fibra são afetados pelo tamanho da região de mistura da extrusora. De forma que, quanto maior o comprimento da região de mistura, menor será o comprimento médio da fibra, enquanto a ligação da fibra com a matriz irá aumentar, rapidamente no início, e depois estabilizará. Já a velocidade da rosca tem pouco efeito sobre o comprimento da fibra e a resistência à tração do compósito.

Segundo Le Baillif et al. (2009), os problemas durante a extrusão de compósitos com fibras vegetais são:

- A alimentação contínua de fibra para a extrusora;
- A dispersão das fibras na matriz;
- Degradação térmica;
- Quebra da fibra durante o processo de extrusão.

A alimentação contínua da fibra na extrusora é difícil, porém necessária para a indústria. Contudo a produção de grânulos de compósitos de polímero e fibra vegetal produzidos em extrusora dupla rosca, tornou-se uma alternativa para indústria (LE BAILLIF et al., 2009).

## 2.5 Índice de Fluidez (MFI)

O índice de fluidez é uma característica dos polímeros muito utilizada como controle de qualidade da matéria-prima (MANRICH, 2005). Segundo Bremner et al. (1990) a forma de se medir o índice de fluidez foi criada na Inglaterra no início da produção de polietileno. O MFI caracteriza as propriedades de fluxo do polímero e serve como padrão para classificação das resinas quanto ao processamento e sua aplicação (BREMNER et al., 1990; MANRICH, 2005; ROCHA et al., 1994).

O ensaio desenvolvido para se mensurar o índice de fluidez consiste em um barril aquecido, no qual o polímero se encontra, com um pistão que é acionado por um peso padrão e faz com que esse polímero flua por um capilar padronizado, e assim mede-se o MFI a partir do peso que flui pelo capilar durante 10 min, sendo a unidade da propriedade dada em g/10min (MANRICH, 2005).

O MFI é um parâmetro inversamente proporcional à viscosidade, sendo assim, dependentes de propriedades moleculares tais como peso e ramificações do polímero, bem como sua distribuição molecular. Estes fatores, por sua vez, são dependentes das condições de polimerização (BREMNER et al., 1990; ROCHA et al., 1994).

Contudo tanto Bremner et al. (1990) quanto Rocha et al. (1994) ressaltam que correlações do MFI com as propriedades dos polímeros devem ser cuidadosamente efetuadas, pois o índice de fluidez é influenciado por um grande número de variáveis. Bremner et al. (1990) ainda ressaltam que apesar do MFI não prever com exatidão a processabilidade do polímero, devido à discrepância entre a temperatura e o cisalhamento do ensaio e as do processamento, o índice de fluidez é amplamente utilizado na indústria.

### 2.5.1 Influência do Índice Fluidez em Compósitos com Fibras Vegetais

Diversos estudos foram executados com o intuito de se correlacionar o índice de fluidez das matrizes poliméricas com as propriedades apresentadas pelos compósitos com fibras vegetais. Observa-se que as propriedades estão

intimamente ligadas a qualidade da mistura, que por sua vez, é afetada pelo índice de fluidez da matriz polimérica.

BALASURIYA et al. (2006) utilizou dois tipos diferentes de PEAD, um com maior índice de fluidez (7,00 g/10 min) e outro de menor índice (0,15 g/10 min), como matriz do compósito. Já a fase dispersa era composta por flocos da madeira de pinheiro. Houve dois tipos de misturas, uma através de extrusão e outra através do processo de mistura mecânica. No primeiro caso os componentes foram misturados em uma extrusora dupla rosca para obtenção dos compósitos. A extrusora possuía duas portas de alimentação, sendo que o polímero era alimentado através da primeira porta e a flocos a partir da segunda porta, desta forma era possível minimizar a degradação dos flocos. Já no segundo caso os componentes foram misturados num misturador mecânico. Os corpos de provas dos compósitos, produzidos por ambos os processos, foram fabricados através do processo de injeção. Foram executados ensaios de tração, flexão e impacto nos corpos de prova, bem como uma análise morfológica através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Após análise dos resultados, o autor afirmou que o processo de mistura através da extrusora dupla rosca se mostrou mais eficiente, sendo que os compósitos produzidos por este processo demonstraram melhor desempenho em detrimento dos produzidos pelo processo de mistura mecânica. Observou-se que o índice de fluidez influencia na qualidade da mistura entre os dois componentes de forma que quando utilizado um material com alto índice de fluidez, existirá uma melhor molhabilidade entre a fibra e a matriz, além de produzir uma maior distribuição das partículas. Ainda foi possível verificar que a resistência à flexão dos compósitos é controlada pela molhabilidade e distribuição dos flocos, enquanto a resistência à tração é mais sensível às propriedades da matriz.

Em seus estudos, Lu et al. (2006) analisou quatro tipos diferentes de PEAD, cada um com um índice de fluidez diferente, sendo um com 0,46 g/10 min, outro com 6,10 g/10 min, um terceiro com 14,00 g/10 min e um último com 33,00 g/10 min. Já em relação à fase dispersa foram utilizados três tipos de fibra cana-de-açúcar de origens diferentes. Estes tipos de fibras foram separados em três, classificadas segundo o tamanho da fibra. Desta forma, foram produzidos 36 tipos de compósitos diferentes. Os compósitos foram

obtidos a partir de um misturador. Foi utilizado o método estatístico de análise de variância (ANOVA) para determinar a influência do índice de fluidez nas propriedades dos compósitos. Foi observado que para a maioria dos compósitos com fibras de cana-de-açúcar a resistência à tração reduziu com o aumento do índice de fluidez. Da mesma forma, a resistência ao impacto também reduziu ao se aumentar o índice de fluidez. Segundo o autor isto ocorre, pois o índice de fluidez é uma medida indireta do peso molecular e da estrutura do polímero termoplástico. Sendo que, em geral, resinas de PEAD com baixo índice de fluidez possuem alto peso molecular e uma longa cadeia molecular. Tais características aumentam a adesão interfacial entre as macromoléculas do PEAD e o emaranhamento da cadeia polimérica, o que, por sua vez, aumenta a absorção de energia ao impacto. Desta forma estas propriedades, resistência à tração e resistência ao impacto, seriam afetadas pelo índice de fluidez da matriz polimérica.

Já Sarabi et al. (2012) utilizou três tipos de PEAD com índices de fluidez diferentes, o menor com 0,45 g/10 min, o mediano com 7,00 g/10 min e, por fim, um maior com 20,00 g/10 min. Foi produzido um total de seis compósitos, sendo que foram produzidas duas amostras para cada PEAD, um processado e outro reprocessado. Foram utilizadas partículas de madeira como fase dispersa e a mistura foi executada numa extrusora contra-rotativa dupla rosca. Uma porção foi processada apenas uma vez na extrusora, enquanto outra parte foi reprocessada após 24 horas de descanso. Segundo o autor, entre os compósitos que foram processados apenas uma vez, o com a matriz de maior índice de fluidez apresentou as menores resistências à tração e flexão, enquanto a de menor índice de fluidez apresentou as maiores. Por outro lado, o compósito reprocessado que possui a matriz com valor intermediário de índice de fluidez apresentou as melhores propriedades de resistência à tração e à flexão dentre todos os compósitos, processados e reprocessados. Já o que teve o pior desempenho foi o reprocessado com a matriz de maior índice de fluidez. Observou-se que as matrizes com maior índice de fluidez, tanto nos compósitos processados quanto nos reprocessados, apresentaram os maiores de módulo de elasticidade (obtido através do ensaio de tração). Já os compósitos com a matriz com menores índices de fluidez apresentaram

menores módulos de elasticidade. O autor afirmou que devido à complexidade do processo, existe uma necessidade de que sejam executados mais estudos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Foram analisados três tipos de PEAD com índices de fluidez diferentes e com a mesma proporção de farinha de madeira. Os polímeros utilizados durante esta etapa de desenvolvimento são do tipo homopolímeros e fornecidos pela Braskem, as demais especificações técnicas estão listadas na Tabela 4.

**Tabela 4 - Especificações técnicas dos polietilenos fornecidos pela Braskem.**

Tipos	Índice de Fluidez (g/10 min)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura de Deflexão Térmica (°C)
PEAD IA 59	7,3	0,960	81
PEAD IA 58	22,0	0,957	69
PEAD IG 58	50,0	0,956	66

Como fase dispersa utilizou-se um resíduo de madeira originado do processamento de *Medium-Density Fiberboard* (MDF). Neste trabalho classificou-se o resíduo de madeira como partícula de madeira (PM) e o tamanho médio das partículas encontrado foi de 189,80 µm.

Foram analisados três compósitos mais os três polímeros puros, totalizando seis formulações. Na Tabela 5 está disposta cada formulação.

**Tabela 5 - Formulações analisadas.**

Formulações	PEAD IA 59	PEAD IA 58	PEAD IG 58	Partícula de Madeira
F1	100%	-	-	-
F2	90%	-	-	10%
F3	-	100%	-	-
F4	-	90%	-	10%
F5	-	-	100%	-
F6	-	-	90%	10%

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Processamento das formulações

As formulações desenvolvidas foram processadas no Laboratório de Transformação de Plásticos do Campus Integrado de Manufatura e Tecnologia (CIMATEC) do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) em uma extrusora dupla rosca modular corotacional, fabricada pela Imacom, modelo DRC 30:40 IF com diâmetro de rosca de 30 mm e razão L/D = 40.

As condições de processamento para os polímeros puros e compósitos estão descritas abaixo:

- Velocidade da rosca: 94 rpm.
- Perfil de temperatura: Z1 = 140 °C; Z2 e Z3 = 170 °C; Z4 = 165 °C; Z5 e Z6 = 175 °C; Z7 = 190 °C; Z8 = 195 °C; Z9 = 205 °C; Z10 = 210 °C e Z11 = 30 °C.

O perfil de rosca utilizado é típico para produção de compósitos com fibras vegetais, ele pode ser classificado como um perfil de média intensidade de mistura. É composto por duas zonas de mistura, formadas com elementos de amassamento de 45° e 90°, os demais elementos são destinados ao transporte de material. Na Figura 16 pode-se observar o esquema do perfil de rosca utilizado.

**Figura 16 – Configuração do perfil de rosca utilizado.**



**Fonte: (Software WinTXS, versão3).**

Em virtude das fibras vegetais serem geralmente higroscópicas, o resíduo de madeira foi seco a  $100 \pm 5$  °C por um período de 8 horas em estufa de circulação forçada. Após secagem, os materiais foram pesados e então foi realizada uma pré-mistura, por tamboreamento, em seguida as composições foram dosadas no ponto de alimentação principal da extrusora (início da rosca), utilizando um dosador volumétrico da marca Brabender. A Figura 17 mostra o resíduo de madeira utilizado neste desenvolvimento.

**Figura 17 – Resíduo de madeira utilizada no processo.**



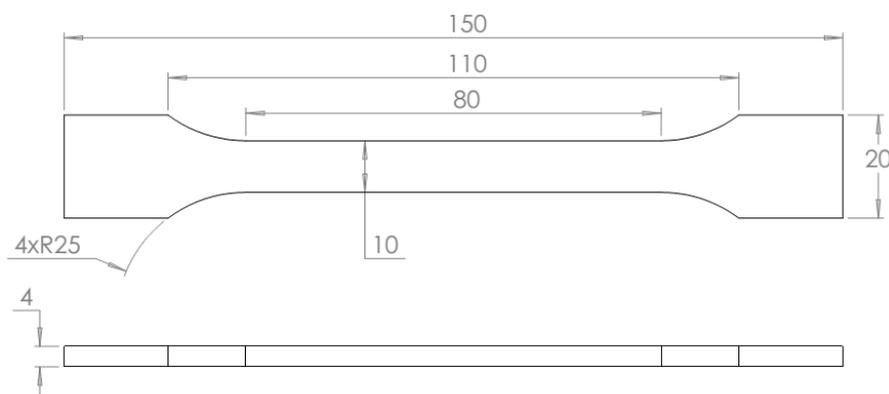
**Fonte: Autor.**

### **3.2.2 Injeção dos corpos de prova**

Após obtenção dos compósitos, estes foram secos a 60°C por um período de 4 horas e somente após a secagem os mesmos foram utilizados para a preparação dos corpos de prova.

Os corpos de prova foram preparados pelo processo de injeção, segundo a norma ISO 527 para ensaio de tração e norma ISO 180 para ensaio de impacto. Para esta etapa utilizou-se uma injetora com capacidade de 100 t de força de fechamento, fabricada pela ROMI modelo Primax. Na Figura 18 está apresentado o croqui dos corpos de provas para ensaio de tração, já a Figura 19 mostra alguns corpos de provas injetados.

**Figura 18 - Croqui dos corpos de prova dos ensaios de tração e impacto.**



**Fonte: Autor.**

**Figura 19 -** Corpos de provas injetados, no lado esquerdo polímero puro da matriz de PEAD IA 58 e no lado direito compósito de mesma matriz com partículas de madeira.



Fonte: Autor.

### 3.2.3 Análise granulométrica do resíduo de madeira

O ensaio de granulometria foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos do SENAI CIMATEC, para a obtenção da distribuição do tamanho das partículas de madeira, antes do processamento. Foi feita inicialmente uma classificação por peneiramento segundo a norma ASTM D6913-04. Foi utilizado para a análise um agitador eletromecânico para seis peneiras de 8" x 2", com controle de frequência de vibrações e relógio automático até 30 min.

Utilizou-se 100 g de resíduo de madeira, que foram secadas em estufa por quatro horas à temperatura de 80 °C. A amostra foi peneirada durante 30 min. O conjunto de peneiras está exposto na Tabela 6.

**Tabela 6 - Descrição de malhas das peneiras utilizadas.**

<b>Malha ASTM</b>	<b>Abertura da peneira (µm)</b>
<b>20</b>	841
<b>30</b>	595
<b>40</b>	420
<b>50</b>	297
<b>70</b>	210
<b>100</b>	149
<b>Fundo</b>	

Foi executado um segundo ensaio, no qual foram utilizadas peneiras com aberturas menores, como pode ser observado na Tabela 7. Os parâmetros do ensaio foram mantidos os mesmos.

Tabela 7 - Descrição de malhas das peneiras do segundo ensaio.

<b>Malha ASTM</b>	<b>Abertura da peneira (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<b>50</b>	297
<b>70</b>	210
<b>100</b>	149
<b>200</b>	74
<b>325</b>	44
<b>500</b>	25
<b>Fundo</b>	

#### **3.2.4 Índice de fluidez (MFI)**

Os ensaios térmicos de MFI foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos do SENAI CIMATEC e foi utilizado um plastômetro DSM – MI – 1 utilizando a temperatura de 230°C e peso de 2,16 kg, mediante norma ASTM D1238-04.

#### **3.2.5 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)**

Os compósitos foram caracterizados através do ensaio de calorimetria exploratória diferencial, utilizando o equipamento TA Instruments DSC Q20 e cadinho de alumínio sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50 mL/min. Foram utilizadas amostras de 5 a 8 mg, em três estágios: aquecimento de 20 °C a 180 °C, resfriamento até 20 °C e reaquecimento até 180 °C. A taxa de aquecimento/resfriamento foi de 10 °C/min.

#### **3.2.6 Resistência à tração**

Os ensaios mecânicos de resistência à tração foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos do SENAI CIMATEC, em máquina universal de ensaios Emic Modelo DL 2000, aquisição e tratamento dos dados através de Software Tesc, seguindo a norma ISO 527, com velocidade de ensaio de 5 mm/min. Foram ensaiados cinco corpos de provas para cada formulação.

### **3.2.7 Resistência à flexão**

Os ensaios mecânicos de resistência à flexão foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do SENAI CIMATEC, em máquina universal de ensaios Emic Modelo DL 2000, aquisição e tratamento dos dados através de Software Tesc, seguindo a norma ISO 178, com velocidade de ensaio de 2 mm/min. Foram ensaiados cinco corpos de provas para cada formulação.

### **3.2.8 Resistência ao impacto**

Os ensaios mecânicos de resistência ao impacto foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do SENAI CIMATEC numa máquina Instron, modelo CEAST 9050, com martelo de 2,7 J e configuração IZOD, seguindo a norma ISO 180. Foram ensaiados cinco corpos de provas para cada formulação.

### **3.2.9 Microscopia Óptica (MO)**

Foi feita uma análise qualitativa do grau de dispersão dos resíduos de madeira nos compósitos através da microscopia óptica. As amostras foram obtidas a partir do corte dos corpos de provas injetados. A análise foi executada no Laboratório de Ensaios Mecânicos do SENAI CIMATEC no microscópio óptico Zeiss Scope A1, equipado com câmera Zeiss Axiocam ERc5s.

### **3.2.10 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Foi executada uma análise morfológica dos corpos de provas dos compósitos no Laboratório de Ensaios Mecânicos do SENAI CIMATEC. As amostras foram obtidas através dos corpos de prova injetados que foram submetidos ao ensaio de impacto, sendo a superfície da fratura a área analisada. As amostras passaram por um processo de deposição de carbono na superfície para que fosse possível executar a análise no MEV. Este procedimento foi executado no equipamento da marca Denton Vacuum modelo

Desk V com o equipamento auxiliar Carbon Yarn Accessor, também da Denton Vacuum. Já microscopia eletrônica de varredura foi realizada no MEV marca Jeol e modelo JSM-6510 LV.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através dos ensaios executados foi possível caracterizar todas as formulações no que tange suas propriedades mecânicas, morfologia e características térmicas, bem como seu índice de fluidez. Na Tabela 8 estão apresentados os dados obtidos para cada formulação, as que possuem partículas de madeira estão representadas pelo nome da matriz acrescidos da sigla PM. Os resultados para cada propriedade serão discutidos nos tópicos se seguem.

Tabela 8 - Resultados obtidos para cada formulação.

Formulação	PEAD IA 59	PEAD IA 59 PM	PEAD IA 58	PEAD IA 58 PM	PEAD IG 58	PEAD IG 58 PM
<b>Índice de Fluidez (g/10 min)</b>	7,40 ±0,32	4,60 ±0,55	23,27 ±1,33	14,40 ±0,86	39,48 ±3,26	26,70 ±1,99
<b>Tensão Máxima na Tração (MPa)</b>	22,13 ±0,57	19,02 ±0,43	20,90 ±0,52	17,84 ±0,71	17,13 ±0,96	13,83 ±1,23
<b>Módulo de Elasticidade na Tração (MPa)</b>	878,18 ±81,35	1172,88 ±93,62	1216,89 ±55,45	1402,56 ±74,61	1058,40 ±24,99	1244,00 ±48,20
<b>Tensão Máxima na Flexão (MPa)</b>	19,15 ±0,41	21,73 ±1,19	19,81 ±0,75	21,72 ±0,45	19,54 ±0,52	19,88 ±0,72
<b>Módulo de Elasticidade na Flexão (MPa)</b>	844,30 ±23,79	1097,00 ±73,19	907,50 ±32,08	1221,00 ±46,45	867,60 ±10,96	1077,00 ±66,97
<b>Resistência ao Impacto (KJ/m<sup>2</sup>)</b>	8,33 ±0,97	9,19 ±0,66	6,31 ±0,51	5,45 ±0,97	6,16 ±0,23	4,34 ±0,28

### 4.1 Análise Granulométrica do Resíduo de Madeira

Foram executadas duas classificações granulométricas. Antes do peneiramento o resíduo de madeira foi mantido em estufa durante quatro horas na temperatura de 90°C para retirar o excesso de umidade. Após este período, o resíduo foi submetido à agitação em um agitador eletromecânico. O primeiro

ensaio foi executado segundo norma ASTM D6913-04, no qual o material foi agitado por 30 minutos. Na Tabela 9 seguem os dados das peneiras utilizadas bem como o resultado obtido.

**Tabela 9 - Resultado do primeiro ensaio de granulometria**

<b>Malha ASTM</b>	<b>Abertura da peneira (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Tamanho médio das partículas (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Partículas de Madeira Retidas</b>
<b>20</b>	841	Acima de 841	0,5%
<b>30</b>	595	718,00	0,5%
<b>40</b>	420	507,50	1,4%
<b>50</b>	297	358,50	4,3%
<b>70</b>	210	253,50	16,0%
<b>100</b>	149	179,5	30,7%
<b>Fundo</b>		Menor que 149	46,6%

De acordo com resultados obtidos, observou-se que grande parte do resíduo de madeira possuía tamanho médio menor 149  $\mu\text{m}$ , quase metade (46,6%) do total. Desta forma foi executado um segundo ensaio, no qual foram utilizadas peneiras com aberturas menores, com o intuito de aumentar a precisão do ensaio. Foram mantidos os mesmo parâmetros do primeiro ensaio, com apenas a mudança da malha das peneiras. Na Tabela 10 estão expostos os dados das peneiras juntamente com o resultado obtido no segundo ensaio.

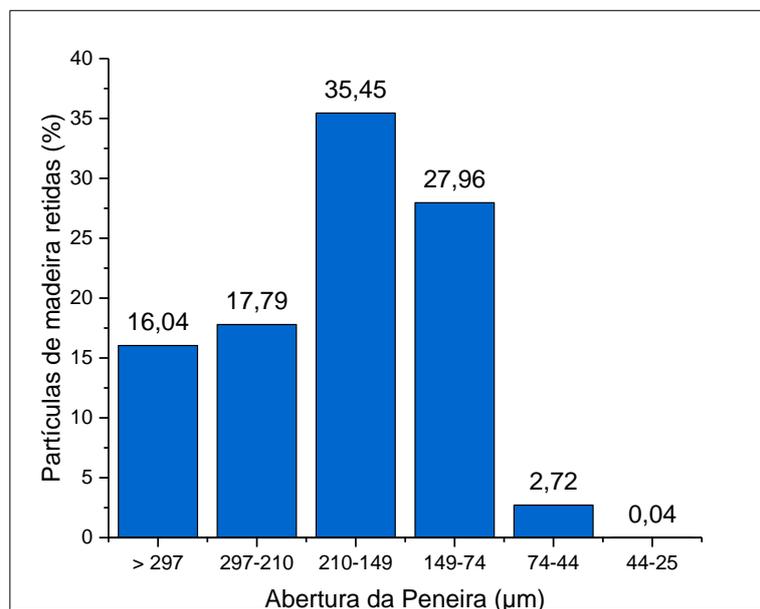
**Tabela 10 - Resultados do segundo ensaio de granulometria.**

<b>Malha ASTM</b>	<b>Abertura da peneira (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Tamanho médio das partículas (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Partículas de Madeira Retidas</b>
<b>50</b>	297	Maior que 297	16,04%
<b>70</b>	210	253,50	17,79%
<b>100</b>	149	179,50	35,45%
<b>200</b>	74	111,50	27,96%
<b>325</b>	44	59,00	2,72%
<b>500</b>	25	34,50	0,04%
<b>Fundo</b>		Menor que 25	0,00%

Pôde-se observar após o segundo ensaio que existe uma maior concentração de resíduos com tamanho médios entre 179,50 e 111,50  $\mu\text{m}$ , sendo cerca 63,41% do total. Na Figura 20 está apresenta um gráfico de distribuição com os dados obtidos através do ensaio. Ao se aplicar o método de média ponderada podemos obter um valor médio do resíduo de madeira, o qual se encontrou em 189,80  $\mu\text{m}$ . Desta forma, segundo a classificação

apresentada por Kretschmann et al., (2007) pode-se caracterizar a fibra utilizada como mais próxima de partículas de madeira.

**Figura 20 - Gráfico de distribuição do ensaio de granulometria.**



**Fonte: Autor.**

#### 4.2 Índice de Fluidiez (MFI)

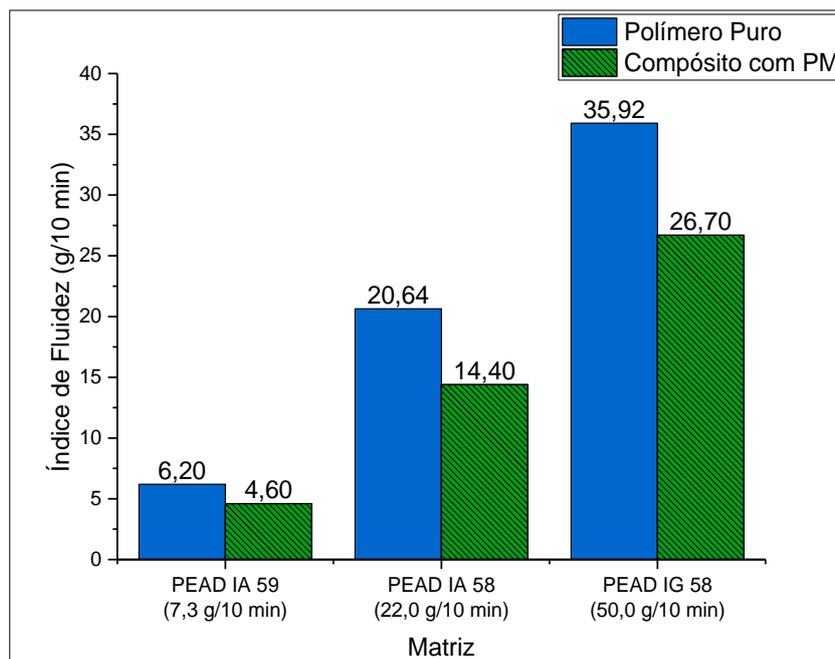
Os resultados do ensaio de fluidez foram apresentados em três grupos a partir da matriz polimérica PEAD IA 58, PEAD IA 59, PEAD IG 58. Cada grupo contém duas formulações, uma com o polímero puro e outra com o compósito com as partículas de madeira. Na Figura 21 podem-se observar os resultados obtidos do ensaio.

Verificou-se que ao se acrescentar as partículas de madeira na matriz polimérica, estas agiram como cargas reduzindo o índice de fluidez do compósito, como esperado. Este fato ocorre, pois as partículas de madeira podem interagir com o polímero dificultando o movimento das cadeias, o que conseqüentemente reduz a capacidade de fluidez do compósito (STARK et al., 1997).

Segundo Falcone (2004), de um modo indireto e superficial, a análise da massa molar de um material polimérico sem aditivos, assim como sua

degradação, torna-se possível através do ensaio de índice de fluidez. Para o estudo da degradação termooxidativa, a avaliação pode ser estendida às blendas e aos polímeros contendo pó de madeira. Sendo assim, o cisalhamento durante o processamento e os efeitos térmicos sofridos pelo polímero nesta etapa e no ensaio pode causar degradação reduzindo o tamanho das cadeias poliméricas e o índice de fluidez.

**Figura 21 - Índice de fluidez dos polímeros puros e dos compósitos de PM.**



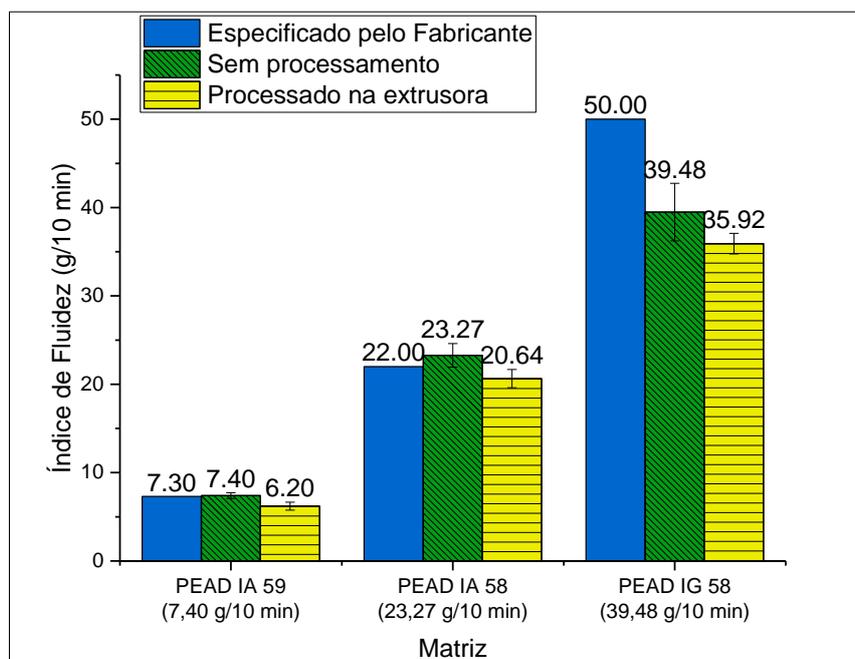
**Fonte: Autor.**

Observa-se, também, que o índice de fluidez dos polímeros puros foi menor que o especificado pelo fabricante, esta variação pode estar associada ao efeito do processo de extrusão o qual o polímero foi submetido para obtenção dos corpos de prova e as condições de ensaio para determinação do índice de fluidez.

Desta forma foi executado um segundo ensaio de fluidez, apenas com as resinas puras sem terem sido processadas, com o intuito de observar a influência do processo de extrusão no polímero. Na Figura 22 estão expostos os resultados deste ensaio. É possível observar que com exceção do PEAD IG 58, as resinas apresentaram índice de fluidez próximo ao indicado pelo fabricante. Também nota-se que o processo de extrusão proporcionou uma redução no índice de fluidez dos polímeros, já que houve uma divergência

entre os valores do primeiro ensaio (polímero puro processado na extrusora) e o segundo (polímero puro sem processamento). Desta forma, serão adotados os valores obtidos durante o segundo ensaio de fluidez como os valores do índice de cada matriz.

**Figura 22 – Comparativo do índice de fluidez dos polímeros puros sem processamento e processados na extrusora.**

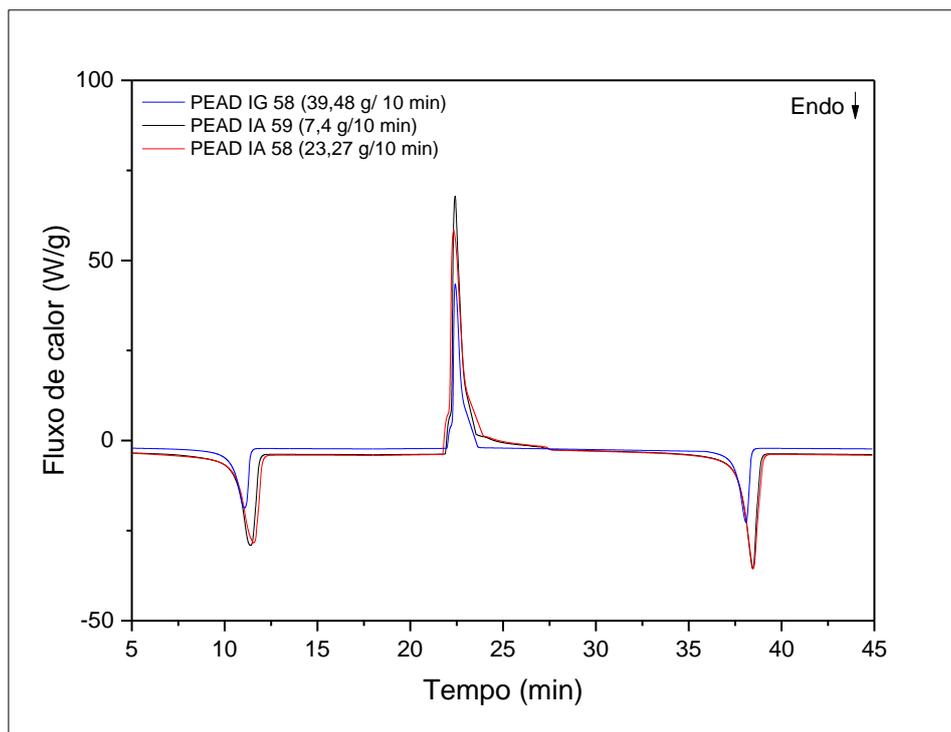


Fonte: Autor.

#### 4.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A Figura 23 mostra o fluxo de calor no DSC em função do tempo para os compósitos PEAD com partículas de madeira com diferentes índices de fluidez. Verifica-se, em todas as composições analisadas, um evento de fusão (endotérmico) durante o primeiro e segundo aquecimentos e um pico exotérmico correspondente à cristalização durante o resfriamento.

**Figura 23 - Fluxo de energia como função do tempo para os compósitos com as diferentes matrizes de PEAD com partícula de madeira.**



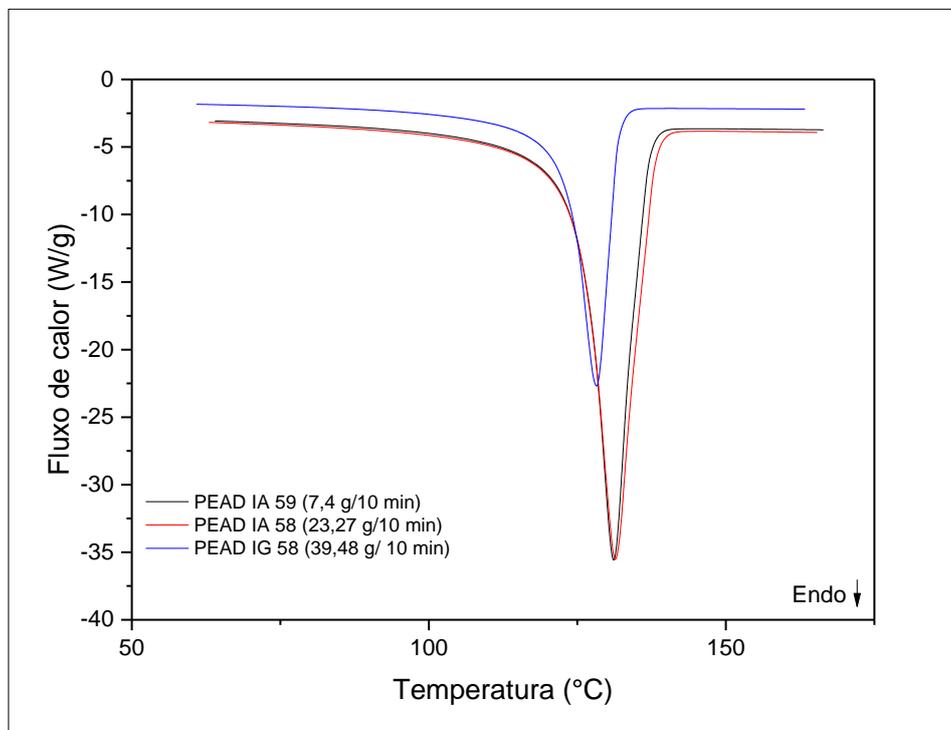
**Fonte: Autor.**

A Figura 24 mostra o pico de fusão no segundo aquecimento dos compósitos e assim pode-se verificar o efeito do índice de fluidez da matriz polimérica na fusão dos compósitos de uma forma mais detalhada. Observa-se que os picos (endotérmico) de fusão dos compósitos estudados ficaram próximos, estes possuem uma temperatura máxima ( $T_m$ ) para o compósito com matriz de PEAD IA 59 de 131,3 °C, já a do PEAD IA 58 apresentou um valor próximo à primeira resina, ficando com 131,2 °C e por fim a do PEAD IG 58 apresentou menor  $T_m$  com 128,7 °C. A faixa de transição da matriz de PEAD IA 59 ficou aproximadamente entre 98 °C e 140 °C, enquanto a do PEAD IA 58 ficou por volta entre 94 °C e 141 °C e a do PEAD IG 58 ficaram aproximadamente entre 89 °C e 153 °C.

O fabricante das resinas utilizadas no estudo não informa os valores da  $T_m$  de cada uma, contudo segundo Tanniru et al. (2006) a temperatura de  $T_m$  do PEAD comercial com índice de fluidez de 9 g/10 min encontra-se em 133,3 °C. Já Araújo et al. (2008), que utilizou um PEAD comercial com MFI entre 6 e

8,1 g/10 min, encontraram valores de  $T_m$  em 135 °C. E Yao et al. (2008) obtiveram  $T_m$  igual a 130,5 °C para o PEAD comercial com 6,1 g/10 min.

**Figura 24 - Efeito do índice de fluidez na fusão de compósitos PEAD com partícula de madeira.**



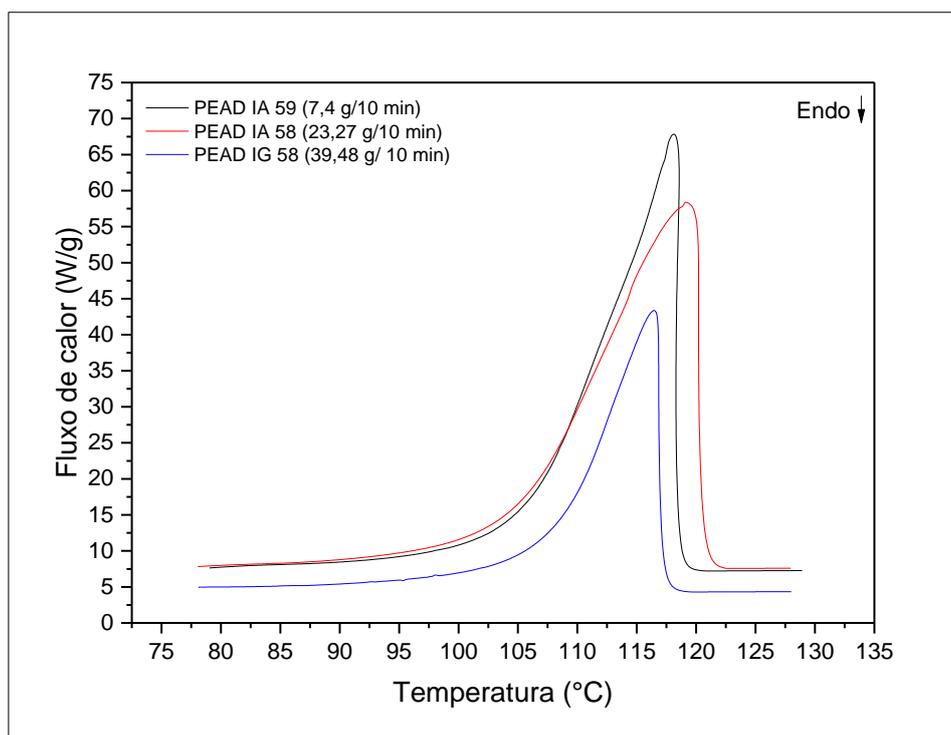
**Fonte: Autor.**

Pode-se verificar que apesar da temperatura de fusão baixar à medida que se aumenta o índice de fluidez da matriz polimérica do compósito, esta influência não foi tão relevante, posto que a diferença entre a  $T_m$  das matrizes de PEAD IA 59 e PEAD IA 58 foi 0,1 °C. Já a diferença entre a  $T_m$  das matrizes de PEAD IA 59 (maior  $T_m$ ) e PEAD IG 58 (menor) foi menor que 3 °C.

Na Figura 25 verificam-se os picos de cristalização dos compósitos demonstrando o efeito do índice de fluidez da matriz polimérica na cristalização. Observa-se que os picos exotérmicos de cristalização dos compósitos, assim como os picos de fusão, ficaram próximos. As temperaturas de pico de cristalização não apresentaram nenhuma linearidade, não sendo possível submeter nenhuma relação com a variação do índice fluidez. A matriz de PEAD IA 59 teve como temperatura de pico de cristalização igual a 118 °C, enquanto a matriz de PEAD IA 58 apresentou valor de 119,2 °C e por fim, a matriz de PEAD IG 58 teve sua temperatura igual a 116,4 °C. Assim, observa-

se que a maior diferença de temperatura entre as matrizes foi menor que 3 °C, demonstrando assim que o índice de fluidez não afetou, também, de forma relevante na temperatura de cristalização, tendo em vista o equipamento utilizado (extrusora), na qual essa variação não é considerável.

**Figura 25 - Efeito do índice de fluidez na cristalização a partir do fundido para compósitos de PEAD com partículas de madeira.**



**Fonte: Autor.**

A cristalinidade dos compósitos de PEAD com partículas de madeira foi estimada a partir dos calores latentes de cristalização e fusão como apresentada na equação que se segue:

$$X_c = \frac{\Delta H_c}{\Delta H_m^0} \quad (1)$$

Onde  $\Delta H_c$  é o calor latente de cristalização dos compósitos e  $\Delta H_m^0$  é o calor latente de fusão do PEAD puro 100% cristalino. Segundo Mandelkern (2002) para o PEAD puramente cristalino o valor do calor latente de fusão é igual a 289,9 kJ/kg. Para os compósitos de PEAD com partículas de madeira na proporção de 10% não foi encontrado nenhum valor na literatura. Na Tabela 11 estão apresentados os calores latentes de cada compósito obtido através do

ensaio, bem como o seu grau de cristalinidade estimado através da equação (1).

**Tabela 11 - Calor latente de cristalização e grau de cristalinidade dos compósitos de PEAD com partículas de madeira.**

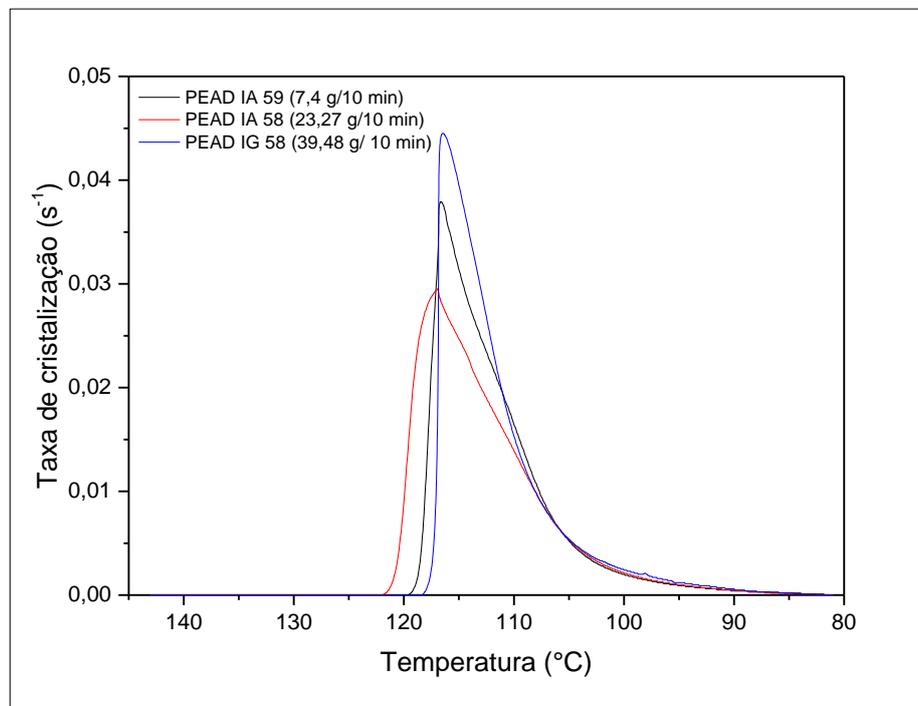
	<b>PEAD IA 59 (7,3 g /10 min)</b>	<b>PEAD IA 58 (22 g/10 min)</b>	<b>PEAD IG 58 (50 g/10 min)</b>
<b>Calor latente de cristalização (kJ/Kg)</b>	148,2	169,4	138,3
<b>Grau de cristalinidade</b>	0,51	0,58	0,48

Observa-se que o grau de cristalinidade, bem como o calor latente de cristalização, não foi influenciado de forma linear pelo índice de fluidez da matriz polimérica.

Os dados obtidos através do ensaio de DSC foram analisados através do *software* INTEGRAL, desenvolvido na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Este programa integra numericamente picos de cristalização ou fusão, utilizando uma linha de base reta entre o ponto inicial e final do evento (CANEDO et al., 2016). Com este programa foi possível analisar quantitativamente as curvas dos compósitos possibilitando avaliar a influência do índice de fluidez da matriz nas propriedades térmicas dos compósitos.

Na Figura 26 tem-se a taxa de cristalização em função da temperatura para os compósitos com partículas de madeira. Observa-se que a matriz de PEAD IA 58 inicia o processo de cristalização em uma temperatura mais elevada, se comparada com os compósitos com as outras matrizes, possuindo assim uma cristalização antecipada. Contudo o processo finaliza juntamente com os outros compósitos, o que infere que a sua cristalização foi mais lenta. Da mesma forma, pode-se afirmar que o PEAD IG 58 possui uma cristalização mais rápida, pois se inicia a uma temperatura menor e é finalizada em temperaturas próximas a do PEAD IA 58. Já o PEAD IA 59 ficou com a temperatura de início de cristalização entre o PEAD IG 58 e o PEAD IA 58. O PEAD IG 58 apresentou a maior taxa máxima de cristalização, seguido pelo PEAD IA 59 e por último o PEAD IA 58.

**Figura 26 - Taxa de cristalização em função da temperatura para formulações de PEAD com partículas de madeira.**



Fonte: Autor.

Na Tabela 12 está apresentado um resumo dos dados obtidos através do ensaio de DSC dos compósitos de PEAD com partículas de madeira.

**Tabela 12 - Resultados do ensaio de DSC para os compósitos de PEAD com partículas de madeira.**

	<b>PEAD IA 59 (7,3 g /10 min)</b>	<b>PEAD IA 58 (22 g/10 min)</b>	<b>PEAD IG 58 (50 g/10 min)</b>
<b>Intervalo da 2ª fusão (°C)</b>	98,1 - 140,4	93,7 - 141,1	89,3 -135,2
<b>Temperatura do pico de fusão (°C)</b>	131,3	131,2	128,7
<b>Intervalo de cristalização (°C)</b>	82,5 - 120,2	87,3 - 122,3	82,6 -118,7
<b>Temperatura do pico de cristalização (°C)</b>	118	119,2	116,4
<b>Taxa máxima de cristalização (s<sup>-1</sup>)</b>	0,0379	0,0296	0,0445
<b>Calor latente de cristalização (kJ/kg)</b>	148,2	169,4	138,3

Observa-se que na fusão quanto maior o índice de fluidez, mais rápido inicia-se a 2ª fusão, bem como menor será o pico de temperatura de fusão. Já em termos do intervalo de fusão, o maior intervalo foi o do compósito com PEAD IA 58, seguindo para o PEAD IG 58 e por último, com o menor intervalo, o PEAD IA 59.

Já em relação à cristalização, verifica-se que a matriz que proporcionou menor temperatura de pico de cristalização ao compósito foi a PEAD IG 58, assim como a maior taxa máxima de cristalização. Logo após tem-se o PEAD IA 59 e em seguida o PEAD IA 58.

#### 4.4 Resistência à tração

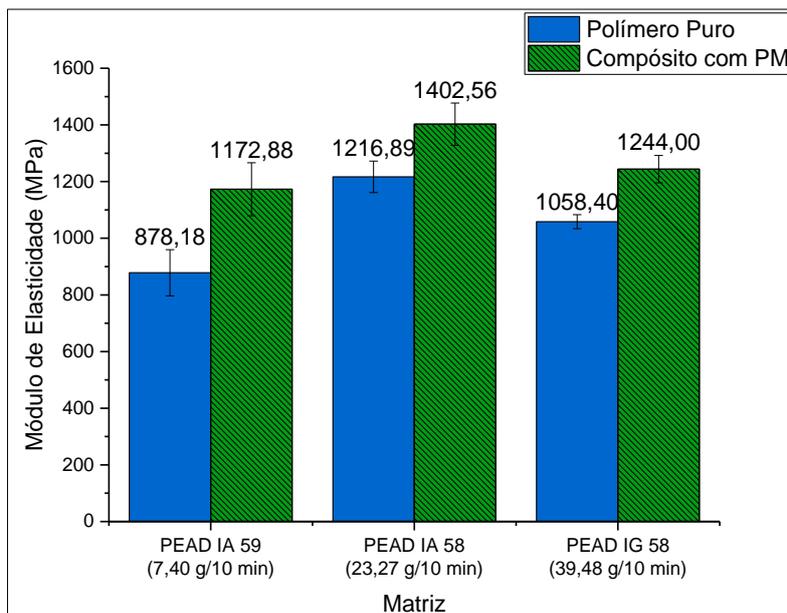
Observando os resultados do ensaio de tração foi possível obter algumas propriedades mecânicas dos polietilenos puros e dos compósitos com partículas de madeira. Foram analisadas as propriedades de: módulo de elasticidade; e tensão máxima.

Os resultados foram apresentados, novamente, em gráficos divididos em três grupos de acordo com a matriz polimérica. Foi utilizado gráfico de barras, dos quais em cada grupo um representa o polímero puro e o outro o compósito.

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade estão apresentados na Figura 27. Observa-se que houve um aumento no módulo elástico ao se acrescentar as partículas de madeira no polímero puro. Em relação ao PEAD IA 59 (índice de fluidez de 7,3 g/10 min) a adição das partículas de madeira à matriz, proporcionou ao compósito um aumento de 33,6% se comparado com o polímero puro, por sua vez o compósito com matriz PEAD IA 58 (índice de fluidez de 22,0 g/10 min) teve um aumento de aproximadamente 15% no seu módulo, enquanto que no PEAD IG 58 (índice de fluidez de 50 g/10 min) este aumento foi de 17,5%.

Os comportamentos das três matrizes de PEAD ao receber as partículas de madeira já eram esperados, pois estas partículas são um componente com maior rigidez se comparados a matriz polimérica, desta forma, proporcionam ao compósito maior módulo elástico e menor deformação.

**Figura 27 - Módulo de elasticidade de tração dos polímeros puros e dos compósitos de PM.**



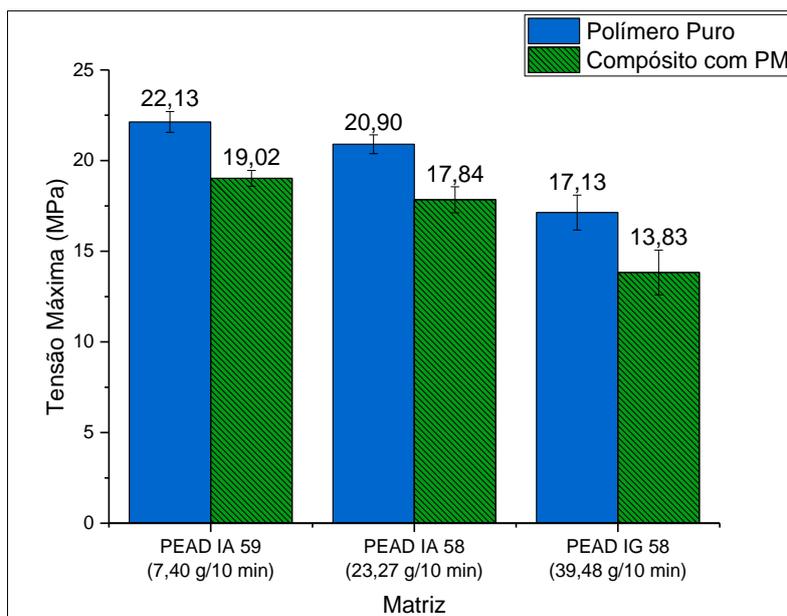
**Fonte: Autor.**

Balasuriya et al. (2006) observaram em seus experimentos que o aumento da concentração de fibra causa um aumento do módulo de elasticidade do compósito, contudo salienta que os valores máximos para o aumento são dependentes dos métodos de processo, assim como pelo índice de fluidez da matriz, de forma que quanto maior o índice de fluidez, maior será o módulo de elasticidade. Hillig et al. (2008) e Yam et al. (1990) também observaram mesmo comportamento ao se acrescentar a fibra à matriz.

Na Figura 28 podem-se observar os resultados para tensão máxima. A matriz de PEAD IA 59 apresentou o melhor desempenho com a menor redução da tensão máxima sob tração, que ficou aproximadamente 14% quando comparada com o compósito com as partículas de madeira. Já a resina de PEAD IA 58 apresentou um resultado próximo ao da primeira resina, com uma redução de 14,6%. Já para a matriz de PEAD IG 58 essa redução foi de aproximadamente 19%. Verificou-se ainda que quanto maior o índice de fluidez, menor a tensão máxima suportada pelo compósito.

Desta forma, observou-se que as partículas de madeira proporcionaram uma pequena redução na tensão máxima suportada pelos compósitos, o que pode ocorrer devido a uma falta de molhabilidade entre as fases, resultando em um pior ancoramento das partículas de madeira na matriz polimérica.

**Figura 28 - Tensão máxima de tração dos polímeros puros e dos compósitos de PM.**



**Fonte: Autor.**

De forma semelhante, Yam et al. (1990) observaram que ao se acrescentar a fibra vegetal, a propriedade de resistência à tração do compósito diminuía. Já Balasuriya et al. (2006), obtiveram em seus experimentos que, em geral, ao se acrescentar a fibra à matriz o compósito a resistência à tração é reduzida, contudo em seu experimento, a matriz de PEAD de índice de fluidez de 7 g/10 min que foi misturada com a fibra através de uma extrusora dupla rosca, apresentou um resultado divergente, de forma que o acréscimo de até 20% de fibra proporcionou primeiramente um aumento na resistência à tração do compósito, sendo que após essa porcentagem a resistência começa a diminuir. Hillig et al. (2008), apresentaram resultados para quatro tipos de fibra em matriz de PEAD, e demonstrou que a depender da fibra estes resultados podem variar, assim sendo, pode-se atribuir esta discrepância encontrada entre os estudos, aos diferentes tipos de fibras utilizadas, bem como às técnicas de processo de mistura e fabricação.

As propriedades mecânicas em compósitos podem ser alteradas pela eficiência da mistura. Uma boa dispersão e distribuição resultarão em melhor molhabilidade com o polímero e conseqüentemente maior transferência das tensões do polímero para as partículas (MANRICH, 2005).

Segundo Manrich (2005), a viscosidade da matriz polimérica está ligada diretamente à eficiência da dispersão devido à intensidade das forças transferidas durante o processo de mistura. Em situações onde se inicia a mistura com baixo índice de fluidez pode ocorrer à dispersão e logo a seguir, com o aumento da temperatura e cisalhamento durante a extrusão, o aumento do índice de fluidez, decorrente destes parâmetros, contribui para que ocorra uma boa distribuição e um bom nível de mistura.

Como a matriz PEAD IA 59 possui um menor índice de fluidez, as forças no início do processo são mais acentuadas, forçando a dispersão das partículas, ao decorrer do processo, com o aumento das taxas de cisalhamento e temperatura, o índice de fluidez aumenta contribuindo para boa distribuição. Espera-se então, que nos sistemas com este polímero a mistura tenha sido mais eficiente resultando em melhor molhamento entre as fases o que implica em melhores propriedades mecânicas quando comparada aos compósitos com as outras matrizes.

#### 4.5 Resistência à Flexão

Os polímeros puros e os compósitos com partículas de madeira também foram analisados no que tange sua resistência à flexão. Da mesma forma que o ensaio de tração, as propriedades analisadas foram: módulo de elasticidade e tensão máxima. Os resultados foram apresentados no mesmo modelo de gráfico de barras, dos quais em cada grupo um representa o polímero puro e o outro o compósito.

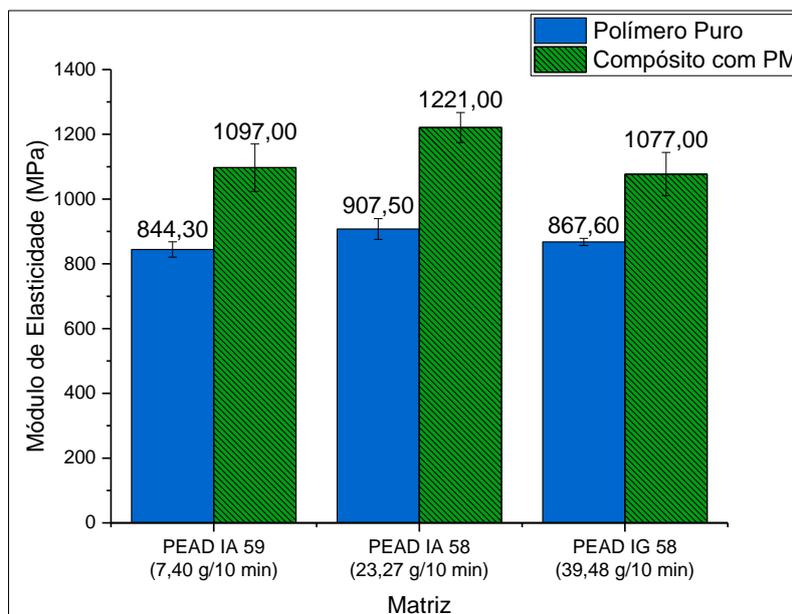
Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade na flexão estão apresentados na Figura 29. Pode-se observar que assim como na tração, o módulo de elasticidade na flexão também aumentou com o acréscimo das partículas de madeira. O compósito com a matriz de PEAD IA 59 teve um aumento de aproximadamente 30% no módulo quando comparado com a matriz pura. Já o PEAD IA 58 apresentou um aumento de 34,5%, o maior dentre as três matrizes. Por fim, a matriz de PEAD IG 58 teve um aumento por volta de 24%.

Segundo Balasuriya et al. (2006) é esperado um aumento do módulo de elasticidade na flexão ao se aumentar a quantidade de partículas de madeira

na composição do compósito, contudo os valores máximos deste módulo são dependentes do método de processo e do índice de fluidez, de forma que quanto maior o índice de fluidez, maior o valor máximo do módulo. Nos resultados obtidos através dos experimentos executados, temos que o maior valor de módulo de elasticidade foi apresentado pela matriz de PEAD IA 58, que possui o índice de fluidez de 22 g/10 min e ao se aumentar mais o índice de fluidez (caso do PEAD IG 58) houve uma queda no valor máximo obtido. Contudo os resultados obtidos não contrariam Balasuriya et al. (2006), pois estes aplicaram experimentos com matrizes de PEAD com o maior índice de fluidez sendo 7 g/10min.

Hillig et al. (2008) da mesma forma observou que há um aumento considerável no módulo de elasticidade ao se acrescentar a fibra, variando seus valores máximos também a depender do tipo de fibra utilizada. Balasuriya et al. (2006) afirmou que o aumento do módulo também é resultado de uma boa distribuição da fibra na matriz e ressalta que a orientação, a interação e a adesão entre a fibra e a matriz também são fatores que influenciam neste resultado.

**Figura 29 - Módulo de elasticidade de flexão dos polímeros puros e dos compósitos de PM.**

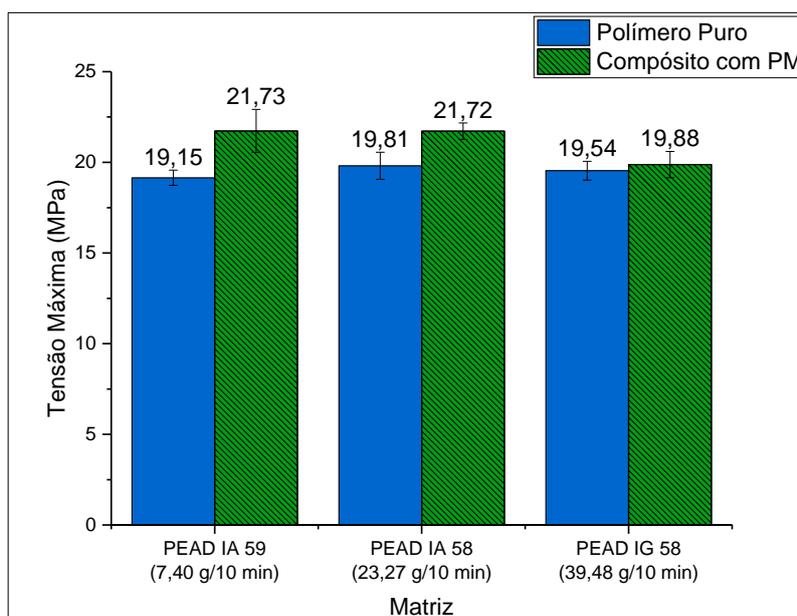


Fonte: Autor.

Para a resistência à flexão a tensão máxima obtida também aumentou ao se acrescentar as partículas de madeira. O compósito com a matriz de PEAD IA 59 apresentou o maior aumento com 13,5% quando comparada a matriz pura. O compósito com PEAD IA 58 também teve um aumento considerável, sendo 9,6% maior que sua matriz pura. Por fim, o compósito com a matriz de PEAD IA 58 teve um pequeno aumento de quase 2%. Na Figura 30 podem-se observar os resultados para tensão máxima de flexão. Verificou-se ainda que, da mesma forma que na tração, quanto maior o índice de fluidez, menor a tensão máxima suportada pelo compósito.

Balasuriya et al. (2006) observou resultado semelhante para a resistência à flexão, de forma que esta aumentou ao se acrescentar flocos de madeira na matriz de PEAD (com índice de fluidez de 7 g/10 min) até uma proporção de 60% da sua composição.

**Figura 30 - Tensão máxima de flexão dos polímeros puros e dos compósitos de PM.**



Fonte: Autor.

#### 4.6 Resistência ao Impacto

Da mesma forma, os resultados do ensaio de resistência ao impacto foram divididos de acordo com a matriz utilizada. Analisando os resultados obtidos através deste ensaio, pôde-se observar através da Figura 31 que, com

exceção do compósito com matriz de PEAD IA 59, a resistência ao impacto foi reduzida quando adicionada a partícula de madeira.

Observou-se também uma tendência à redução da resistência ao impacto ao aumentar-se o índice de fluidez do material. Lu et al. (2006) afirmam que o índice de fluidez pode ser considerado uma medida indireta do peso molecular, de forma que quanto menor o seu índice de fluidez, maior será seu peso molecular e mais longa será a cadeia molecular. Da mesma forma, os autores também afirmam que quanto maior o peso molecular e a cadeia molecular, maior será a absorção de impacto da resina. Assim sendo, explica-se o fato da resina pura de PEAD IA 59 (menor índice de fluidez) absorver mais a energia de impacto que as outras duas resinas. O mesmo vale para o caso da resina de PEAD IA 58 possuir maior resistência ao impacto que o PEAD IG 58.

Em relação à adição das partículas de madeira, a matriz de PEAD IA 59 apresentou mais uma vez o melhor desempenho com o aumento desta propriedade em cerca de 9%, enquanto a matriz de PEAD IA 58 apresentou redução de 13,6%. Por fim, a matriz de PEAD IG 58 apresentou o pior rendimento com uma redução de aproximadamente 30%.

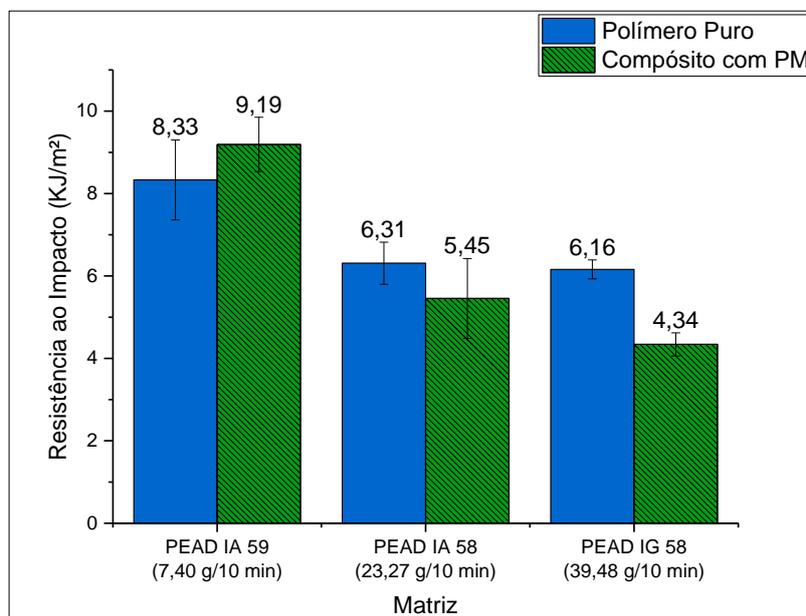
Como justificado nos resultados de resistência a tração, a matriz com menor índice de fluidez contribui para melhor distribuição o que reduz a presença de aglomerados. Azevedo (2013) afirma que em compósitos com carga mineral ou fibras vegetais, os aglomerados atuam como concentradores de tensão, proporcionando a formação de trincas o que reduz a energia absorvida sob impacto.

Balasuriya et al. (2006) identificaram que a matriz de PEAD, com índice de fluidez de 7 g/10 min, utilizada no estudo apresentou um aumento da resistência ao impacto ao se adicionar flocos de madeira até uma proporção de 40% na composição do compósito. Este aumento foi atribuído à boa distribuição e molhabilidade da mistura, da mesma forma que ocorreu com a matriz de PEAD IA 59.

Para as demais resinas e para a matriz de PEAD com índice de fluidez de 7g/10 min e proporção de flocos de madeira maior que 40%, Balasuriya et al. (2006) observaram através de experimentos, que o acréscimo de fibra na matriz reduz a resistência ao impacto do compósito. Este ainda ressaltou que a

provável razão para este acontecimento foi à baixa adesão entre a interface da fibra com a matriz. Outros autores como Hillig et al. (2008), também obtiveram os mesmos resultados para a resistência ao impacto.

**Figura 31 - Resistência ao impacto dos polímeros puros e dos compósitos de PM.**



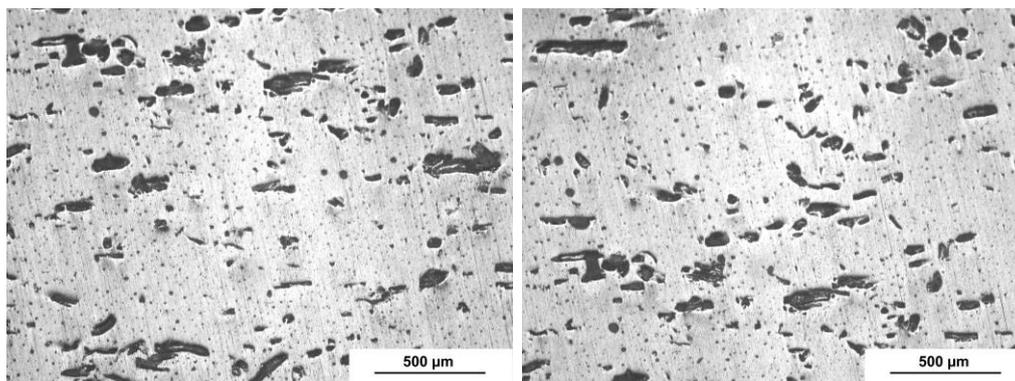
Fonte: Autor.

#### 4.7 Microscopia Óptica (MO)

Analisando os resultados de microscopia óptica foi possível observar a distribuição e dispersão das partículas de madeira na matriz polimérica. Na Figura 32 pode-se observar uma boa distribuição e boa dispersão das partículas na matriz de PEAD IA 59, corroborando com os resultados obtidos até o momento.

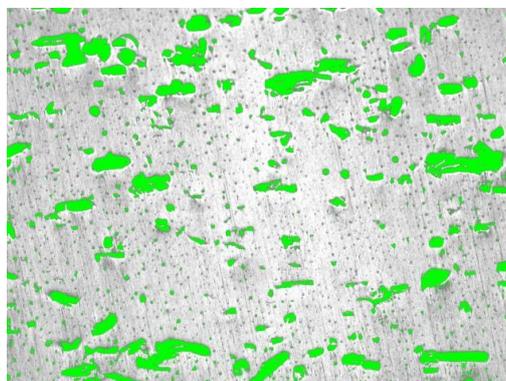
Foram executados testes através do *software* AxioVision do microscópio, no qual é possível analisar as proporções de cada fase do material. Esta análise foi executada em diversas regiões do corpo de prova com o intuito de obter uma maior amostragem. A análise se baseia na diferença cor entre as fases, na Figura 33 pode-se observar o teste executado pelo programa. O resultado para o compósito com a matriz de PEAD IA 59 foi de 11,01%, bem próximo da proporção utilizada inicialmente.

**Figura 32 – Microscopia óptica do compósito com partículas de madeira com a matriz de PEAD IA 59 (imagem 50x aumentada).**



**Fonte: Autor.**

**Figura 33 - Análise da proporção da fase dispersa na matriz de PEAD IA 59.**

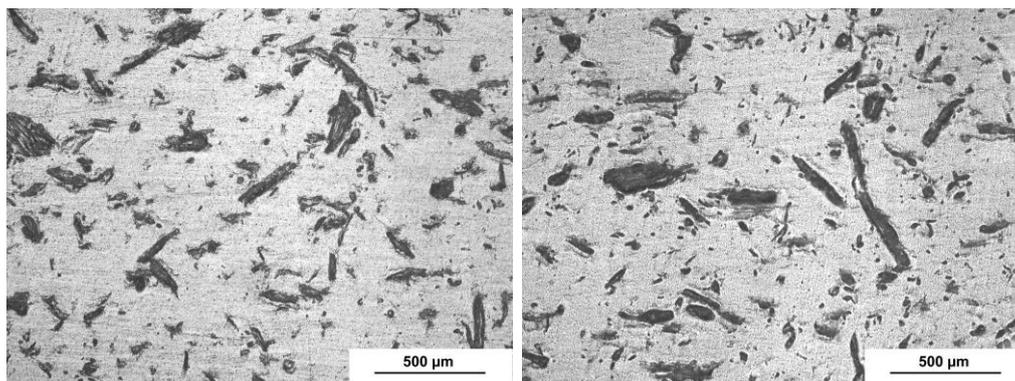


**Fonte: Autor.**

Ainda através do *software* foi possível analisar o tamanho das partículas, e se observou uma pequena redução, apresentando assim uma dispersão razoável. A média para o tamanho das partículas desta formulação ficou com  $135,10 \pm 53,52 \mu\text{m}$ .

Já na análise da matriz de PEAD IA 58 foi possível observar que apesar das partículas de madeira também estarem bem distribuídas, estas não apresentaram boa dispersão. Verifica-se através da micrografia, que as fibras possuem maior comprimento se comparadas às imagens da matriz de PEAD IA 59. Também se observa uma maior quantidade de aglomerados do que na matriz de menor índice de fluidez. As proporções da fibra em relação à matriz ficaram em 12,24%. As partículas possuem tamanhos por volta de  $159,78 \pm 62,10 \mu\text{m}$ . Pode-se observar na Figura 34 visivelmente que as partículas possuem maior tamanho se comparadas com a Figura 32.

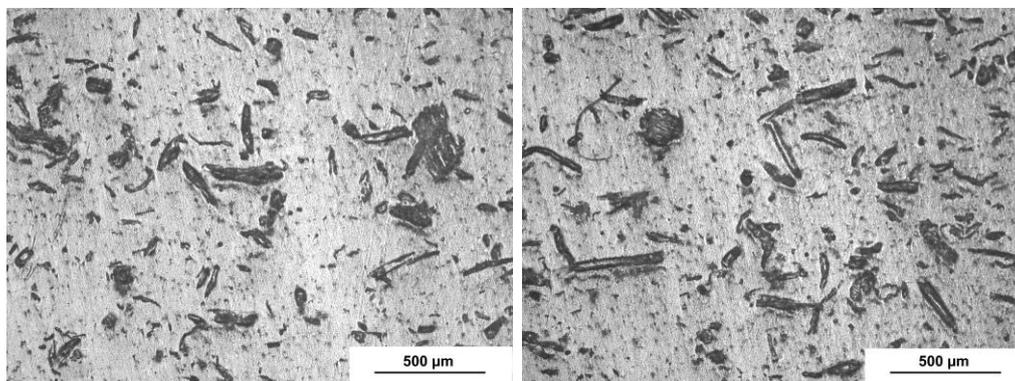
**Figura 34 - Microscopia óptica do compósito com partículas de madeira com a matriz de PEAD IA 58 (imagem 50x aumentada).**



**Fonte: Autor.**

Por fim, a matriz de PEAD IG 58 apresentou também boa distribuição, com a proporção da fibra em 11,09% em relação à matriz, a Figura 35 está exposto a micrografia desta matriz. Houve um aumento no número de aglomerado de partículas em relação às da resina de PEAD IA 59 e PEAD IA 58. O tamanho das fibras ficou por volta de  $203,64 \pm 91,19 \mu\text{m}$ .

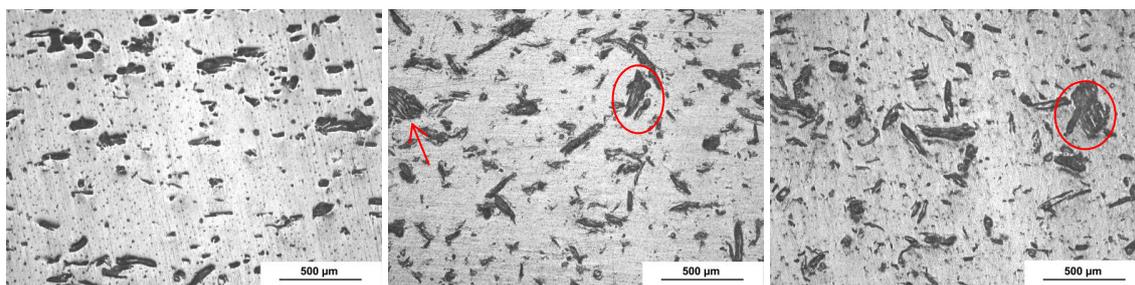
**Figura 35 - Microscopia óptica do compósito com partículas de madeira com a matriz de PEAD IG 58 (imagem 50x aumentada).**



**Fonte: Autor.**

Através da análise morfológica foi possível observar que ao se aumentar o índice de fluidez da matriz polimérica o grau de dispersão das fibras diminuiu, como se pode analisar na Figura 36 onde estão apresentadas as micrografias das três formulações com partículas de madeira. Já a distribuição não demonstrou diferenças consideráveis, sendo, provavelmente a dispersão, mais afetada pelo processo de mistura.

**Figura 36 - Microestrutura das três formulações com partículas de madeira, sendo da esquerda para a direita os compósitos com as matrizes de PEAD IA 59, PEAD IA 58 e PEAD IG 58.**



**Fonte: Autor.**

Observou-se que nos compósitos com as matrizes com maior índice de fluidez alguns aglomerados de partículas, como indicado em vermelho na Figura 36, o que caracteriza uma menor dispersão e prejudica a interface entre a fibra e matriz polimérica. O menor índice de fluidez proporcionou maior dispersão e assim uma melhor integração da fibra à matriz, o que justifica o desempenho das propriedades mecânicas da matriz de PEAD IA 59 em relação às demais. Na Tabela 13 está apresentado um resumo do comportamento da mistura para cada um dos compósitos.

**Tabela 13 - Comparativo do comportamento da dispersão e distribuição das partículas de madeira em cada matriz PEAD.**

<b>Matriz</b>	<b>Dispersão</b>	<b>Distribuição</b>	<b>Tamanho da partícula (µm)</b>
<b>PEAD IA 59</b>	Boa	Boa	135,10 ± 53,52
<b>PEAD IA 58</b>	Razoável	Boa	159,78 ± 62,10
<b>PEAD IG 58</b>	Razoável	Boa	203,64 ± 91,19

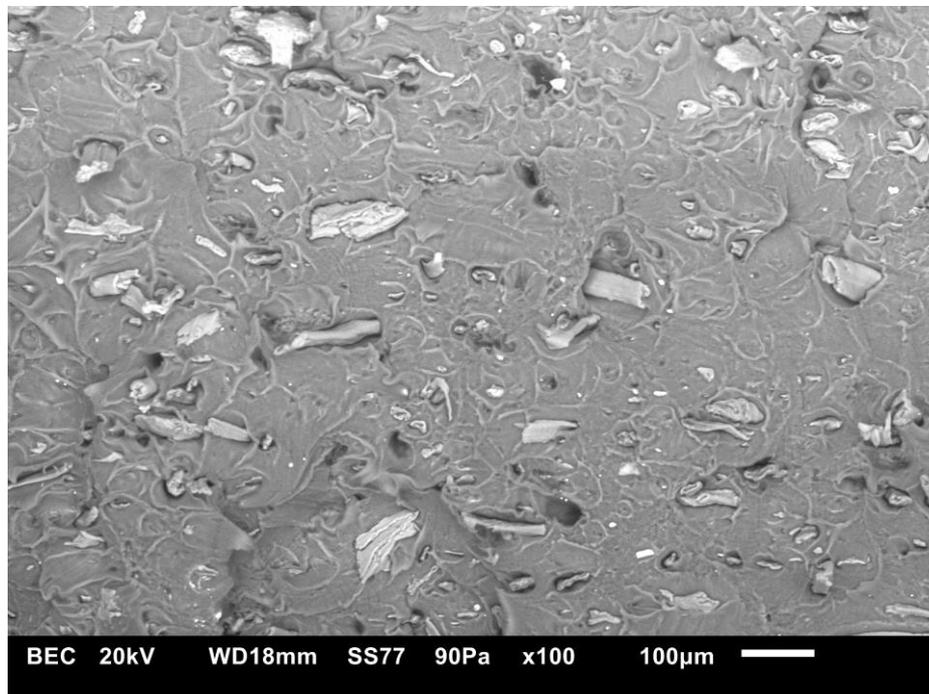
#### 4.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Através da microscopia eletrônica de varredura foi possível observar três aspectos, os dois primeiros foram a dispersão e distribuição das partículas de madeira nas matrizes de PEAD, com o intuito de consolidar o resultado obtido através do MO. O terceiro aspecto analisado foi a interação da partícula com a matriz polimérica, observando a interface entre estes dois componentes.

Na Figura 37 está apresentada a microscopia eletrônica de varredura do compósito com matriz de PEAD IA 59 com ampliação de 100x. É possível

observar o mesmo resultado obtido através da MO, as partículas se apresentaram bem dispersas e bem distribuídas.

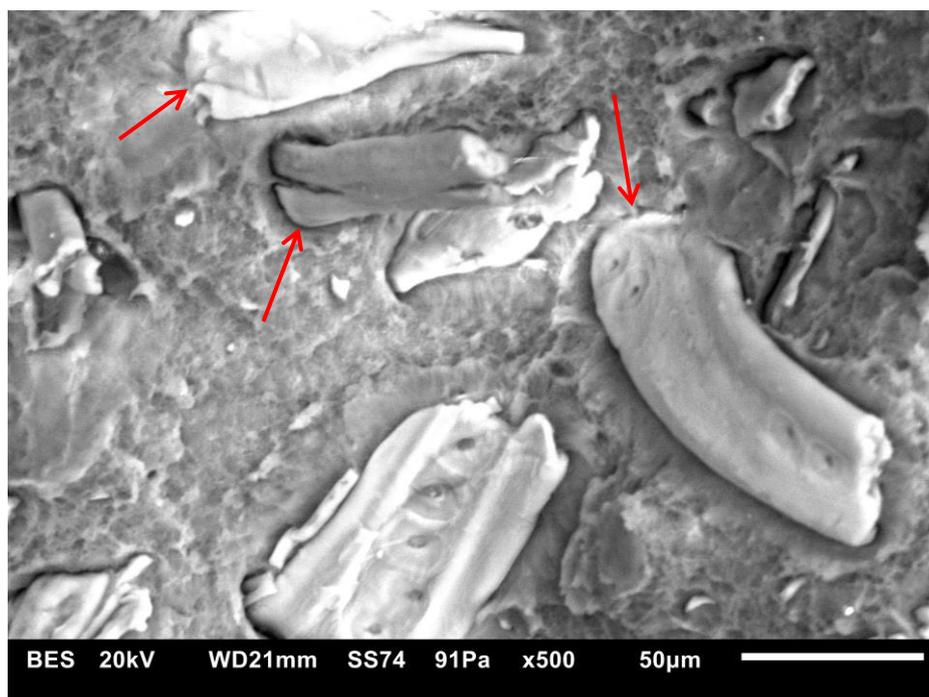
**Figura 37 - Análise de dispersão e distribuição das partículas de madeira na matriz de PEAD IA 59 através do microscópio eletrônico de varredura (imagem 100x aumentada).**



**Fonte: Autor.**

Já na Figura 38 observa-se a interação entre as interfaces da fibra e a matriz de PEAD IA 59. É possível notar, em algumas áreas, que a fibra apresentou relativa adesão à matriz, de forma que a interface entre as fases é muito reduzida (como indicado na Figura 38). Este fator pode justificar a melhora de algumas propriedades da matriz de PEAD IA 59, quando comparada ao compósito com partícula de madeira. Sendo assim, é possível, através desta análise afirmar que houve um ancoramento razoável da fibra na matriz mesmo não utilizando, neste estudo, agentes compatibilizantes.

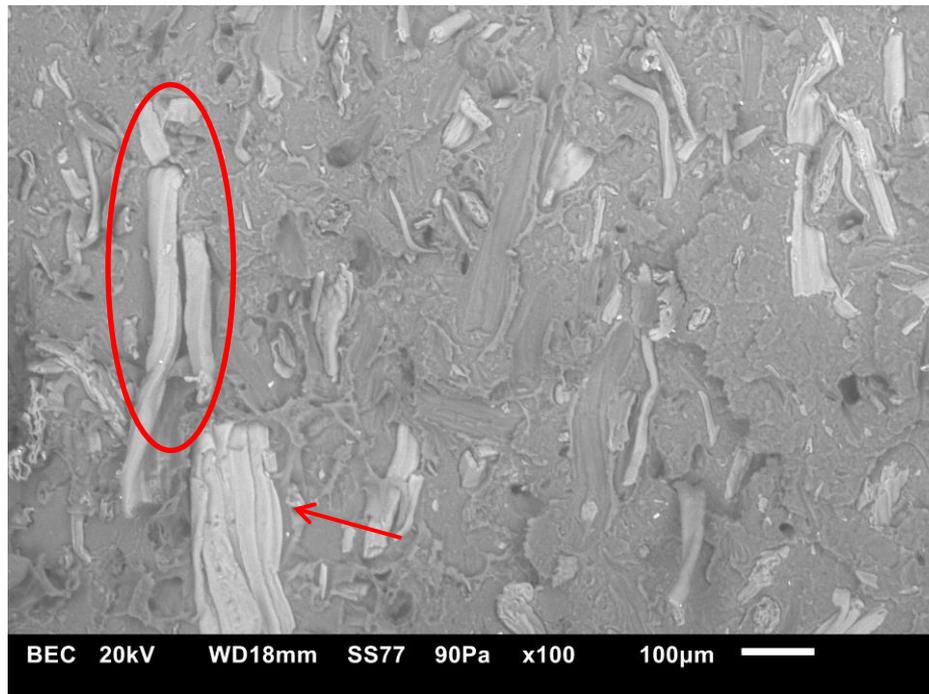
**Figura 38 - Análise da interação das partículas de madeira com a matriz de PEAD IA 59 através do microscópio eletrônico de varredura (imagem aumentada 500x).**



**Fonte: Autor**

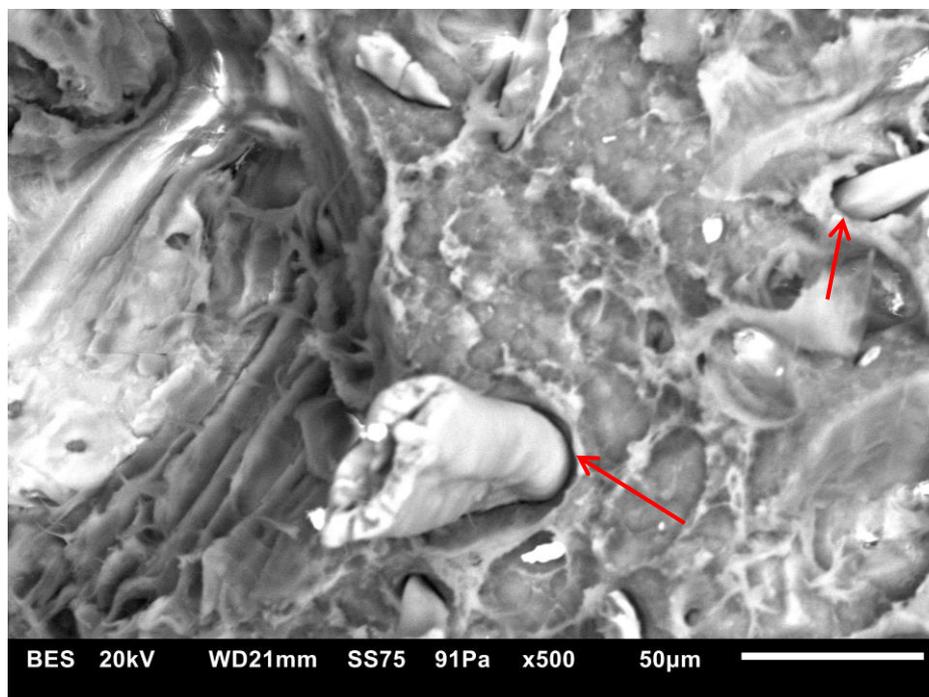
Na Figura 39 está apresentada a MEV do compósito com matriz de PEAD IA 58. E da mesma forma que na MO, foi possível observar que as fibras dispersaram menos, mantendo comprimentos maiores, contudo sua distribuição foi razoavelmente boa. Em algumas partes da matriz foi possível identificar partículas grandes em discrepância das próprias partículas normalmente encontradas na matriz. Essas partículas maiores (indicado na Figura 39), ou alguns aglomerados que se formam (circulado na Figura 39), atuam como concentradores de tensão, prejudicando algumas das propriedades do compósito. Na Figura 40 é possível notar a interação entre a partícula e a matriz de PEAD IA 58, e diferentemente da matriz anterior, nesta já é possível identificar espaços maiores entre a matriz e as partículas (como indicado na Figura 40), contudo ainda apresentando uma boa interação. A menor adesão das partículas nesta matriz explica o fato de que, apesar de algumas das propriedades do seu compósito apresentar melhoras em relação à matriz pura, quando comparadas às do compósito com matriz de PEAD IA 59, estas proporcionaram a matriz pura um maior aumento.

Figura 39 - Análise de dispersão e distribuição das partículas de madeira na matriz de PEAD IA 58 através do microscópio eletrônico de varredura (imagem 100x aumentada).



Fonte: Autor.

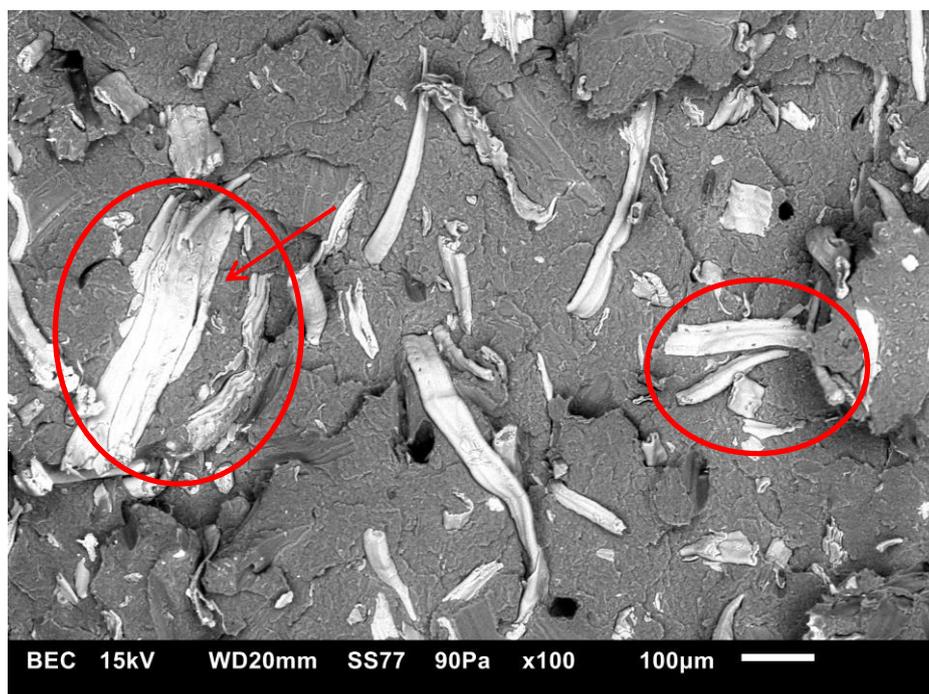
Figura 40 - Análise da interação das partículas de madeira com a matriz de PEAD IA 58 através do microscópio eletrônico de varredura (imagem aumentada 500x).



Fonte: Autor.

Por fim a Figura 41 apresenta a distribuição e dispersão das partículas de madeira na matriz de PEAD IG 58 e assim como na MO, foi possível observar partículas pouco dispersas, apesar de estarem razoavelmente distribuídas. Este compósito, também, apresentou partículas com tamanhos discrepantes (como indicado na Figura 41) em relação às demais. Foi possível observar ainda a formação de alguns aglomerados de partículas (como circulado na Figura 41), que são prejudiciais ao compósito.

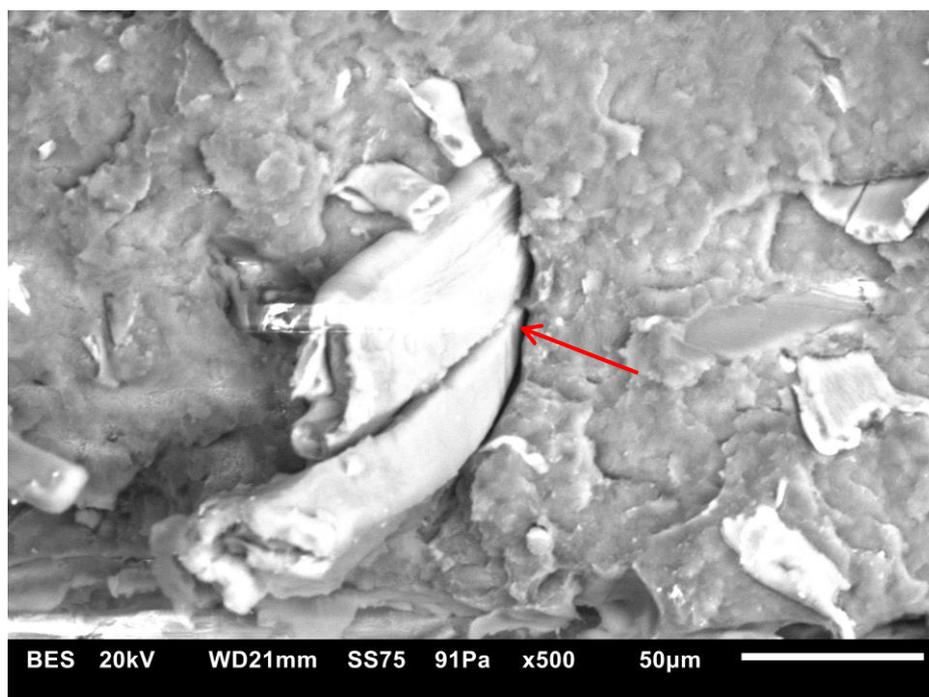
**Figura 41 - Análise de dispersão e distribuição das partículas de madeira na matriz de PEAD IG 58 através do microscópio eletrônico de varredura (imagem 100x aumentada).**



**Fonte: Autor.**

Já na Figura 42 notou-se a interação das partículas de madeira com a matriz, e de forma semelhante à matriz de PEAD IA 58, foi possível notar um afastamento entre ambas. Assim, observa-se que houve também um menor ancoramento, o que pode ter colaborado para que os resultados desta matriz em relação às demais tenha sido inferior. Na Tabela 14 está apresentado um resumo do comportamento da mistura para cada um dos compósitos.

Figura 42 - Análise da interação das partículas de madeira com a matriz de PEAD IG 58 através do microscópio eletrônico de varredura (imagem aumentada 500x).



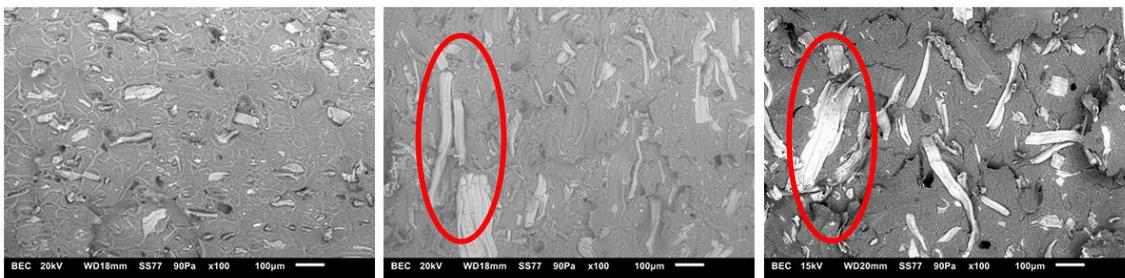
Fonte: Autor.

Tabela 14 - Comparativo do comportamento da dispersão, distribuição, interface Matriz/PM e formação de aglomerados para cada matriz PEAD dos compósitos analisados.

Matriz	Dispersão	Distribuição	Interface	Aglomerados
PEAD IA 59	Boa	Boa	Razoável	Não
PEAD IA 58	Razoável	Boa	Razoável	Sim
PEAD IG 58	Razoável	Boa	Razoável	Sim

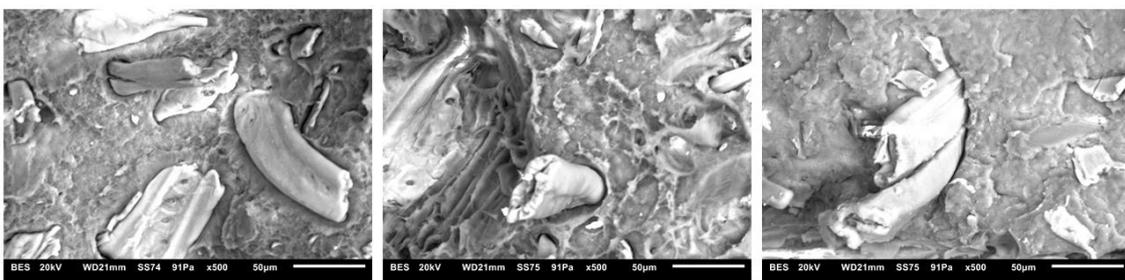
Pode-se ver claramente através da Figura 43 a diferença da dispersão das partículas, bem como a formação de aglomerados, entre os compósitos com a matriz de PEAD IA 58 e IG 58 em relação à de PEAD IA 59, contudo não há grande distinção em relação à distribuição. Já na Figura 44 é possível verificar que para a interface entre a matriz e as partículas não houve tanta diferença ao se alterar a resina.

**Figura 43 - MEV das três formulações com partículas de madeira, sendo da esquerda para a direita os compósitos com as matrizes de PEAD IA 59, PEAD IA 58 e PEAD IG 58.**



Fonte: Autor.

**Figura 44 - MEV da interface matriz/PM das três formulações com partículas de madeira, sendo da esquerda para a direita os compósitos com as matrizes de PEAD IA 59, PEAD IA 58 e PEAD IG 58.**



Fonte: Autor.

#### 4.9 Análise de viabilidade econômica

Para se analisar a viabilidade econômica do compósito com matriz de PEAD com partículas de madeira numa concentração de 10%, foram observados os dados expostos na fundamentação teórica, bem como uma análise do mercado o qual esta matéria prima poderia ser inserida.

Observa-se que quando comparados ao PEAD puro, este compósito apresenta dentre suas características, aumento do módulo de elasticidade na tração e aumento da tensão máxima e módulo de elasticidade na flexão. Contudo verifica-se ainda uma redução na tensão máxima na tração e na resistência ao impacto. Apesar das desvantagens já citadas, as partículas de madeira surgem como uma alternativa em detrimento das fibras sintéticas, as quais, como já supracitado, possuem valor de mercado maior que fibras vegetais, como a fibra da madeira. Considerando os valores demonstrados por

Bogoeva-Gaceva et al. (2007) para as fibras de carbono e de vidro, ao se aplicar uma conversão da moeda do dólar para o real, adotando o dólar comercial a R\$ 3,41, temos os valores em reais para as fibras de carbono e de vidro. O mesmo foi feito para o valor da fibra de madeira comercial. Os valores em reais das fibras estão apresentados na Tabela 15.

**Tabela 15 - Comparativo em reais dos preços das fibras de carbono, vidro e madeira.**

<b>Fibra</b>	<b>Fibra de carbono</b>	<b>Fibra de vidro</b>	<b>Fibra de madeira</b>
<b>Preço (R\$/kg)</b>	642,00	11,08	0,75

É fato que as fibras de madeira apresentam-se mais viáveis no ponto de vista econômico, contudo verifica-se que estas devem ser aplicadas em componentes nos quais a resistência mecânica não seja um ponto crítico de projeto. Observa-se ainda, que uma empresa que opte pelo uso da fibra de madeira como componente de sua matéria prima, não precisará de alterações em seu maquinário, posto que é possível processar as formulações com fibra de madeira no mesmo equipamento utilizado para as fibras sintéticas. Verifica-se ainda, que as fibras de madeira serão menos abrasivas e reduzirá os custos com manutenção do equipamento.

Os compósitos de PEAD com partículas de madeira, devido ao sua aparência semelhante à própria madeira, podem ser aplicados, também, em produtos que requerem este tipo de aspecto, como rodapés e outros apetrechos da construção civil. Estes compósitos podem substituir tanto as atuais peças de policloreto de vinila (PVC) com película com aparência de madeira, como o produto de PVC com aplicação de tinta a jato com a aparência de madeira, além da própria madeira. Em relação à madeira, o compósito tem como vantagem uma maior durabilidade, pois este não está sujeito à ação de fungos ou cupins, bem como a alta absorção de umidade que modifica as suas dimensões.

Já em relação ao PVC, pode-se destacar principalmente o preço da matéria prima. Através da Tabela 16 e da Tabela 17 pode-se observar que o preço de 1 kg de PVC está próximo ao preço de 1 kg da matéria prima necessária para o compósito. Contudo o PVC para adquirir a aparência de madeira passará por outro processo, seja a aplicação da película com

aparência de madeira, ou a aplicação da tinta, agregando assim, mais um custo na linha de produção.

**Tabela 16 - Preço comercial do PVC, PEAD e da fibra de madeira.**

<b>Material</b>	<b>PVC</b>	<b>PEAD</b>	<b>Fibra de Madeira</b>
<b>Preço (R\$/kg)</b>	5,43	6,18	0,75

**Tabela 17 - Comparativo do preço de 1 kg de PVC e 1 kg do compósito.**

<b>Material</b>	<b>Proporção</b>	<b>Preço Total (R\$/kg)</b>
<b>PVC</b>	100%	5,43
<b>PEAD/Fibra de Madeira</b>	90%/10%	5,64

Na Tabela 18 estão expostas as massas específicas do compósito de PEAD com partículas de madeira e do PVC. Pode-se verificar que a massa específica do compósito é menor que a do PVC o que implica em um produto mais leve, caso consideremos uma peça com mesmo volume. Esta redução no peso trará, conseqüentemente, redução nos custos associados a transporte e armazenagem.

**Tabela 18 - Comparativo das massas específicas do compósito e do PVC.**

<b>Material</b>	<b>Compósito</b>	<b>PVC</b>
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,91-0,95	1,3-1,7

Desta forma, a aplicação do compósito de PEAD com partículas de madeira se mostrou mais econômico, sendo assim mais viável, tanto na substituição da fibra sintética, pela fibra de madeira, como na aplicação do compósito em nichos da construção civil, em substituição do PVC com aparência de madeira.

## 5 CONCLUSÕES

Através dos experimentos executados para avaliação das características de fluidez, propriedades mecânicas e morfológicas dos compósitos com partículas de madeira em matrizes com diferentes índices de fluidez foram possível observar que:

- Ao se acrescentar as partículas de madeira à matriz, esta atua reduzindo a fluidez, tensão máxima na tração e resistência ao impacto dos compósitos;
- Ao se acrescentar as partículas de madeira à matriz, esta atua aumentando o módulo de elasticidade na tração, a tensão máxima na flexão e o módulo de elasticidade na flexão;
- Quanto maior o índice de fluidez da matriz polimérica, menor será a resistência ao impacto do compósito resultante;
- Quanto menor o índice de fluidez da matriz polimérica melhores as condições de processos para proporcionar maior dispersão das partículas de madeira na matriz, podendo resultar em compósitos com melhores propriedades mecânicas;
- O índice de fluidez da matriz polimérica não afetou de forma relevante na distribuição das partículas.
- Quanto maior o índice de fluidez, mais rápido inicia-se a 2ª fusão do compósito, bem como menor será o pico de temperatura de fusão;
- O índice de fluidez da matriz polimérica não apresentou relevância nos picos de temperatura de fusão e de cristalização dos compósitos;
- O índice de fluidez da matriz polimérica não apresentou relevância na adesão entre a matriz e as partículas de madeira;
- A fibra de madeira apresentou uma maior viabilidade econômica quando comparada às fibras sintéticas, tanto em valor de mercado, como na redução em custos de manutenção.

- O compósito de PEAD com partículas de madeira mostrou-se viável economicamente quando comparados a produtos já inclusos no mercado, como o PVC com aparência de madeira.

Desta forma, foi possível observar que a matriz de PEAD IA 59, com menor índice de fluidez, apresentou o melhor desempenho dentre todas as matrizes, pois após a adição das partículas de madeira, a maioria de suas propriedades mecânicas aumentou. Pode-se afirmar após os ensaios de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, que este fato ocorreu devido, principalmente, a dispersão sofrida pelas partículas de madeira durante o processo de mistura na extrusora, posto que a adesão entre a interface da matriz polimérica e as partículas de madeira não demonstraram uma divergência considerável entre as resinas analisadas.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a influência de agentes compatibilizantes nas propriedades de compósitos com matrizes com diferentes índices de fluidez;
- Estudar a influência de configuração e velocidade da rosca na mistura de compósitos utilizando matrizes com diferentes índices de fluidez;
- Comparar a influência do índice de fluidez da matriz polimérica nas propriedades de compósitos com diferentes tipos e concentrações de fibras vegetais.

## REFERÊNCIAS

ABIPLAST. Perfil 2015. 2016.

ALVES, T. S. **Efeito do tipo de polipropileno e das condições de processamento na formação e propriedades de compósitos com argila organofílica**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

ANNIE PAUL, S.; BOUDENNE, A.; IBOS, L.; CANDAU, Y.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite materials. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 39, n. 9, p. 1582–1588, set. 2008.

ARAÚJO, J. R.; WALDMAN, W. R.; DE PAOLI, M. A. Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect. **Polymer Degradation and Stability**, v. 93, n. 10, p. 1770–1775, 2008.

ARMANDO, T.; FILHO, R. Ecoeficiência Na Indústria Moveleira: Análise Do Setor E Estudo De Caso De Uma Fábrica De Móveis Sob Medida. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 2009.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D1238-04 - Standard test method for melt flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer**. West Conshohocken: ASTM Interational, 2004.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D6913-04 - Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis**. West Conshohocken: ASTM Interational, 2009.

AZEVEDO, J. B. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos PBAT-amido/casca de arroz**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2013.

BALASURIYA, P. W.; YE, L.; MAI, Y. Mechanical properties of wood flake-polyethylene composites. Part I: effects of processing methods and matrix melt flow behaviour. v. 32, n. 2001, 2006.

BARSCHEKE, M.; URIBE, D.; RUIZ, O. E.; JENSEN, J.; LÓPEZ, C. Finite Element Modeling of Composite Materials using Kinematic Constraints. p. 133–153, 2009.

- BILLMEYER, F. W. **Textbook of Polymer Science**. 3rd. ed. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. v. 24, p. 221–274, 1999.
- BOGOEVA-GACEVA, G.; AVELLA, M.; MALINCONICO, M.; BUZAROVSKA, A.; GROZDANOV, A.; GENTILE, G.; ERRICO, M. E. Natural fiber eco-composites. **Polymer Composites**, v. 28, n. 1, p. 98–107, fev. 2007.
- BREMNER, T.; RUDIN, A; COOK, D. G. Melt flow index values and molecular weight distributions of commercial thermoplastics. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 41, n. 78, p. 1617–1627, 1990.
- CANEDO, E. L.; ALMEIDA, Y. M. B. **Cristalização de polímeros - Tratamento de dados e modelagem macrocinética**. Recife: ANP PRH-28/DEQ/UFPE, 2016.
- CLÉLIA, A.; CANEVAROLO, S. V. Efeito do Tipo de Elemento de Rosca na Degradação de Polipropileno Durante Múltiplas Extrusões. v. 10, p. 90–99, 2000.
- CORREA, C. A.; CARLA, N. P. Compósitos Termoplásticos com Madeira. v. 13, p. 154–165, 2003.
- COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; MARIA, L. C. D. S. Polietileno : Principais Tipos , Propriedades e Aplicações. v. 13, p. 1–13, 2003.
- DITTENBER, D. B.; GANGARAO, H. V. S. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, n. 8, p. 1419–1429, ago. 2012.
- DUTRA, R. D. **Estudo da dispersão de pigmentos orgânicos em resina de polipropileno para aplicação em fibras e filamentos**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2009.
- EBEWELE, R. **Polymer Science and Technology**. New York: CRC Press, 2000.
- FALCONE, D. M. B. **Influência da incorporação de poli(ácido láctico) - PLA, de pó de madeira e outros aditivos no comportamento físico- mecânico do poli(hidroxibutirato) - PHB**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2004.
- FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H.-P.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, n. 11, p.

1552–1596, nov. 2012.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H.-P.; SAIN, M. Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 299, n. 1, p. 9–26, 2014.

FELDMAN, D.; BARBALATA, A. **Synthetic Polymers: Technology, Properties, Applications**. London: Chapman & Hall, 1996.

GERDEEN, J. C.; RORRER, R. A. L. **Engineering Design with polymers and composites**. 2nd. ed. New York: CRC Press, 2012.

HILLIG, É.; IWAKIRI, S.; ANDRADE, M. Z.; ZATTERA, A. J. Caracterização de compósitos produzidos com polietileno de alta densidade (HDPE) e serragem da indústria moveleira. **Revista Árvore**, p. 299–310, 2008.

HO, M.; WANG, H.; LEE, J.-H.; HO, C.; LAU, K.; LENG, J.; HUI, D. Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 8, p. 3549–3562, dez. 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 180:2000 - Plastics - Determination of Izod impact strength**. Philadelphia: ISO, 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 178:2010 - Plastics - Determination of flexural properties**. Philadelphia: ISO, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 527-1:2012 - Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles**. Philadelphia: ISO, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 527-2:2012 - Plastics - Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics**. Philadelphia: ISO, 2012.

JANARTHANAN, M.; PALANISAMY, S.; DINESH, U.; PRADEEP, P.; GOWRISHANKAR, C. Mechanical properties of flax fibers and their composites. **Fibre2Fashion**, 2006.

JOSEPH, P. V.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Effect of processing variables on the mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polypropylene composites. v. 59, p. 1625–1640, 1999.

KARMARKAR, A.; CHAUHAN, S. S.; MODAK, J. M.; CHANDA, M. Mechanical properties of wood–fiber reinforced polypropylene composites: Effect of a novel compatibilizer with isocyanate functional group. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 2, p. 227–233, fev. 2007.

- KOHLGRÜBER, K. **Co-Rotating Twin-Screw Extruders**. Munich: Hanser, 2008.
- KRACALIK, M.; LASKE, S.; HOLZER, C. Polymer Matrix Composites: Properties, Performance and Applications. In: DIMITRIOU, E.; PETRALIA, M. (Eds.). . **Ceramic and polymer matrix composites**. New York: Nova Science Publishers, 2010. p. 169–194.
- KRETSCHMANN, D.; WINANDY, J.; CLAUSEN, C.; WIEMANN, M.; BERGMAN, R.; ROWELL, R.; ZERBE, J.; BEECHER, J.; WHITE, R.; MCKEEVER, D.; HOWARD, J. Wood. **Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology**, n. 4, 2007.
- LAFLEUR, P. G.; VERGNES, B. **Polymer Extrusion**. London: John Wiley & Sons, 2014.
- LE BAILLIF, M.; OKSMAN, K. The Effect of Processing on Fiber Dispersion, Fiber Length, and Thermal Degradation of Bleached Sulfite Cellulose Fiber Polypropylene Composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 22, n. 2, p. 115–133, 1 mar. 2009.
- LI, X.; TABIL, L. G.; PANIGRAHI, S. Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 15, n. 1, p. 25–33, 4 jan. 2007.
- LI, Y.; MAI, Y.; YE, L. Sisal fibre and its composites : a review of recent developments. v. 60, n. 2000, 2006.
- LU, J. Z.; WU, Q.; NEGULESCU, I. I.; CHEN, Y. The influences of fiber feature and polymer melt index on mechanical properties of sugarcane fiber/polymer composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 102, n. 6, p. 5607–5619, 2006.
- MANDELKERN, L. **Crystallization of Polymers: Equilibrium concepts**. 2nd. ed. New York: Cambridge University Press, 2002. v. 1
- MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos**. São Paulo: Artliber, 2005.
- MATTHEWS, F.; DAVIES, G.; HITCHINGS, D.; SOUTIS, C. **Finite Element Modelling of Composite Materials and Structures**. Cambridge: CRC Press, 2000.
- MIGNEAULT, S.; KOUBAA, A.; ERCHIQUI, F.; CHAALA, A.; ENGLUND, K.; WOLCOTT, M. P. Effects of processing method and fiber size on the structure and properties of wood-plastic composites. **Composites Part A: Applied**

**Science and Manufacturing**, v. 40, n. 1, p. 80–85, 2009.

NACHTIGALL, S. M. B.; CERVEIRA, G. S.; ROSA, S. M. L. New polymeric-coupling agent for polypropylene/wood-flour composites. **Polymer Testing**, v. 26, n. 5, p. 619–628, ago. 2007.

OSSWALD, T. A.; HERNÁNDEZ-ORTIZ, J. P. **Polymer Processing: Modeling and Simulation**. Munich: Hanser, 2006.

RAUWENDAAL, C. **Polymer Extrusion**. 5th. ed. Munich: Hanser, 2014.

ROCHA, M. C. G.; COUTINHO, F. M. B.; BALKE, S. Índice de Fluidez : Uma Variável de Controle de Processos de Degradação Controlada de Polipropileno por Extrusão Reativa. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 4, n. Jul/Set, p. 33–37, 1994.

SALDÍVAR-GUERRA, E.; VIVALDO-LIMA, E. Introduction to Polymers and Polymer Types. In: SALDÍVAR-GUERRA, E.; VIVALDO-LIMA, E. (Eds.). . **Handbook of Polymer Synthesis, Characterization and Processing**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.

SARABI, M. T.; BEHRAVESH, A. H.; SHAHI, P.; DARYABARI, Y. Effect of polymeric matrix melt flow index in reprocessing extruded wood-plastic composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 27, n. 7, p. 881–894, 18 set. 2012.

SHENOI, E. R. A.; MOY, S. S. J.; HOLLAWAY, L. C. **Advanced polymer composites for structural applications in construction**. London: Thomas Telford Publishing, 2002.

SOARES, J. B. P.; PÉREZ, O. Introduction to Polymers and Polymer Types. In: SALDÍVAR-GUERRA, E.; VIVALDO-LIMA, E. (Eds.). . **Handbook of Polymer Synthesis, Characterization and Processing**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.

STARK, N.; BERGER, M. Effect of species and particle size on properties of wood-flour-filled polypropylene composites. **Functional Fillers for Thermoplastics & Thermosets**, n. 207, 1997.

STARK, N. M.; SERVICE, F.; ROWLANDS, R. E. Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. **Wood and fiber science**, v. 35, n. 2, p. 167–174, 2007.

SUBRAMANIAN, N. M. **Basics of Polymers**. New York: Momentum Press, 2015.

TADMOR, Z.; GOGOS, C. G. **Principles of Polymer Processing**. 2nd. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

TANNIRU, M.; YUAN, Q.; MISRA, R. D. K. On significant retention of impact strength in clay-reinforced high-density polyethylene (HDPE) nanocomposites. **Polymer**, v. 47, n. 6, p. 2133–2146, 2006.

TEIXEIRA, M. G.; CÉSAR, S. F. Resíduo de madeira como possibilidade sustentável para produção de novos produtos. **I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável**, 2004.

VITORIANO, J. O.; FELIPE, R. C. Avaliação das propriedades mecânicas da matriz polimérica com adição de pó de madeira. 2005.

WALL, D. Co-Rotating Twin Screw Extruders. v. 70, n. 2, 1989.

WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? **Composites Science and Technology**, v. 63, n. 9, p. 1259–1264, jul. 2003.

WIELAGE, B.; LAMPKE, T.; UTSCHICK, H.; SOERGEL, F. Processing of natural-fibre reinforced polymers and the resulting dynamic–mechanical properties. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 139, n. 1-3, p. 140–146, ago. 2003.

YAM, K. L.; GOGOI, B. K.; LAI, C. C.; SELKE, S. E. Composites from compounding wood fibers with recycled high density polyethylene. **Polymer Engineering and Science**, v. 30, n. 11, p. 693–699, 1990.

YAO, F.; WU, Q.; LEI, Y.; XU, Y. Rice straw fiber-reinforced high-density polyethylene composite: Effect of fiber type and loading. **Industrial Crops and Products**, v. 28, n. 1, p. 63–72, 2008.