

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EDSON APARECIDO FERREIRA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DE  
UM COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO POR PARTICULADOS  
DE SABUGO DE MILHO TRITURADO**

DISSERTAÇÃO

**CORNÉLIO PROCÓPIO  
2017**

EDSON APARECIDO FERREIRA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DE  
UM COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO POR PARTICULADOS  
DE SABUGO DE MILHO TRITURADO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção de título de Mestre em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de concentração: Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno.

**CORNÉLIO PROCÓPIO  
2017**

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

F383 Ferreira, Edson Aparecido

Avaliação das propriedades mecânicas e térmicas de um compósito polimérico reforçado por particulados de sabugo de milho triturado / Edson Aparecido Ferreira. – 2017.

147 f. : il. color. ; 31 cm.

Orientador: João Roberto Sartori Moreno.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Cornélio Procópio, 2017.

Bibliografia: p. 141-147.

1. Compósitos poliméricos. 2. Polímeros. 3. Termogravimetria. 4. Engenharia Mecânica – Dissertações. I. Moreno, João Roberto Sartori, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD (22. ed.) 620.1

---

## Biblioteca da UTFPR - Câmpus Cornélio Procópio

Bibliotecários/Documentalistas responsáveis:

Simone Fidêncio de Oliveira Guerra – CRB-9/1276

Romeu Righetti de Araujo – CRB-9/1676

Título da Dissertação Nº 021:

**“Avaliação das Propriedades Mecânicas e Térmicas de um Compósito Polimérico Reforçado por Particulados de Sabugo de Milho Triturado”.**

por

**Edson Aparecido Ferreira**

Orientador: **Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno**

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA** – Área de Concentração: **Ciências Mecânicas**, linha de pesquisa: **Caracterização dos Materiais Aplicados em Engenharia**, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Cornélio Procopio, às 09h do dia 13 de novembro de 2017. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

---

Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno  
(Orientador – UTFPR-CP)

---

Prof. Dr. Ricardo Augusto Mascarello Gotardo  
(UTFPR-CP)

---

Prof. Dr. Antonio de Páduan Lima Filho  
(UNESP – Ilha Solteira)

Visto da coordenação:

---

Prof. Dr. Rogério Akihide Ikegami  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
UTFPR Campus Cornélio Procopio

A Milene, minha esposa, por compreender meus sonhos e objetivos, em estar sempre em busca de melhorar a nossa vida e família. Obrigado por estar sempre ao meu lado. Peço perdão por não estar presente em momentos importantes em sua vida. Vejo em você a esposa e mãe dedicada, auxiliadora e guerreira. Mulher de Deus cheia da Graça e do Espírito Santo.

Ao meu filho amado e querido, Edson Ferreira Junior. Obrigado por você existir e buscar compreender seu pai. Desculpe-me pela minha ausência em seu crescimento e nos momentos importantes da sua vida, tudo que fiz foi pensando no melhor para você. Eu te amo.

Aos meus familiares amados; Eliseu e Cleide, meus pais, aos meus queridos irmãos Eliana e Ederson, e em especial à minha avó que sempre orou e intercedeu pela minha vida. Vocês são pessoas importantes e especiais em minha vida, obrigado. Tenho orgulho de fazer parte dessa família!

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade concedida, pelo conhecimento adquirido e mais uma promessa que se cumpre em minha vida.

Agradeço a todos pelas orações realizadas em meu favor.

Ao Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno, meu orientador neste trabalho.

Aos Professores Genésio Lopes e André Alonso Ribeiro, grandes amigos, que me incentivaram e me apoiaram neste trabalho.

À Profa. Dra. Sandra Mara Domiciano e ao Prof. Dr. Ricardo Augusto Mascarello, pelas importantes contribuições ao trabalho durante a qualificação.

Ao Sr. Marcilio Albuquerque, pelo fornecimento sem custos, dos materiais utilizados na produção dos compósitos das fibras oriundas do sabugo de milho (pó, farelos e o grânulo).

A Alexandre José Gonçalves, técnico de laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da UTFPR, Câmpus Curitiba, pelo apoio nas análises.

Ao Prof. Dr. André Luiz Seixlack pela ajuda dada para as análises térmicas no laboratório de simulação computacional em ciências térmicas.

Ao Sr. Edvaldo Silva de Araújo, assistente de suporte acadêmico no laboratório de simulação computacional em ciências térmicas da UNESP, Ilha Solteira, pelo apoio nas análises.

Ao CCDM, Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais UFSCar/DEMa, pela realização e análises dos ensaios de impacto e termogravimetria.

À direção, aos professores e aos amigos da ETEC Pedro D'Arcádia Neto, pela liberação do laboratório de Ensaios Mecânicos dos Materiais, pelo apoio e compreensão no desenvolvimento do trabalho

Aos demais professores e amigos do PPGEM que me ajudaram com suas importantes contribuições.

Aos amigos e irmãos em cristo que sempre oram e torcem por mim.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente, me ajudaram a concretizar mais este objetivo.

“As mãos preguiçosas empobrecem o homem, porém as mãos diligentes lhe trazem riqueza. ”

Provérbios 10:4

## RESUMO

FERREIRA, Edson A. **Avaliação das Propriedades Mecânicas e Térmicas de um Compósito Polimérico Reforçado por Particulados de Sabugo de Milho Triturado**. 2017. 147 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2017.

O aproveitamento de fibras naturais lignocelulósicas adquiridas à base de vegetais e plantas está sendo cada vez mais reconhecido como uma alternativa ambientalmente correta para substituir materiais não recicláveis. Exemplos disto são os grânulos e o farelo do Sabugo de Milho, resíduos estes que são encontrados em grande quantidade em todo o mundo e que frequentemente são subutilizados na alimentação de animais e /ou fertilização de terras. Estes resíduos lignocelulósicos os “grânulos e o farelo” do sabugo de milho, vem sendo estudado como compósitos poliméricos, por eles reforçados. Devido ao fato do sabugo de milho ser encontrado em grande quantidade, objetivou-se, neste trabalho, estudar a viabilidade do uso do sabugo de milho triturado, empregado como reforço particulado em um material compósito de matriz polimérica com resina de poliéster, de forma que venha a ser possível sua aplicabilidade em diferentes áreas da engenharia. Foram empregados três diferentes granulometrias deste reforço, no formato de partículas finas (PF) com 44 µm, partículas médias (PM) com 850 µm e partículas grandes (PG) com 2360 µm, em percentuais de 5%, 10% e 20% em peso. Os reforços foram selecionados através do peneiramento manual e misturados à resina manualmente para a obtenção dos corpos de prova. Tais dosagens foram importantes, para investigar e comparar a influência do reforço nas propriedades mecânicas e térmicas do material compósito. As caracterizações mecânicas dos compósitos foram feitas pelos ensaios de (tração, flexão e impacto). Já as análises morfológicas da resina pura (poliéster) e dos compósitos, foram realizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Por outro lado, a análise da condutividade térmica foi realizada pelo método dispositivo de placa quente compensada, e a caracterização térmica por Termogravimetria (TGA). Conforme observado nos resultados dos ensaios de (tração, flexão e impacto), os corpos de prova com presença de 5% de partícula fina do sabugo de milho apresentam uma maior resistência frente à partícula média e à partícula grande, o que reforça a relevância quanto à aplicabilidade deste material na indústria. As análises fractográficas dos compósitos obtidas através da MEV indicaram baixa adesão mecânica carga/matriz para os compósitos com partículas grandes, com poucos indícios de transferência efetiva de tensões entre as fases. Em termos de homogeneidade da mistura, a granulometria mais viável é a partícula fina (PF). Os compósitos obtidos se demonstraram viáveis para aplicações térmicas, com condutividade térmica inferior a 0,25 W/m, classificando-se como um isolante térmico de boa qualidade. Assim, podemos ressaltar que este compósito demonstrou uma boa estabilidade térmica, podendo ter suas aplicações relevantes, como isolantes térmicos, ou como elementos estruturais que estejam sujeitas a um carregamento mecânico leve para os compósitos com cargas em forma de partícula fina (PF) ou partícula média (PM).



**Palavras-chave:** materiais compósitos com matriz polimérica; polímeros; particulados de sabugo de milho; termogravimetria.

## ABSTRACT

FERREIRA, Edson A. **Evaluation of the Mechanical and Thermal Properties of a Polymeric Composite with Loads of Crushed Corn.** 2017. 146 f. Master Thesis (Master Degree in Mechanical Engineer) – Post-degree Program in Mechanical Engineer, Federal University of Technology – Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

The utilization of natural lignocellulosic fibers acquired through the vegetables and plants is increasingly recognized as an environmentally correct alternative to replacing non-recyclable materials. An example of this are the granules and bran of the corn cob, a type of waste that can be found in large quantities throughout the world and that are frequently used in animal feeding and/or fertilization of land. This lignocellulosic residue, the granules and the bran of the corn cob, has been studied as polymeric composites, reinforced by them. Due to the fact that the granules of corn cob can be found in large quantity, we aim, in this work, to study the feasibility of the use of crushed corn cob, employed as a filler particulate reinforcement in a composite material with a polyester resin polymeric matrix, so that it might be possible to determine its applicability in different areas of engineering. Three different particle sizes of this reinforcement were used: fine particles (PF) with 44 $\mu\text{m}$ , medium particles (MP) with 850  $\mu\text{m}$  and large particles (LP) with 2360  $\mu\text{m}$ , in percentages of 0%, 5%, 10% and 20% in weight. The reinforcements were selected through hand sieving and blending the resin manually to obtain the evidence specimens. Such dosages were important in order to investigate and compare the influence of reinforcements on mechanical and thermal properties of the composite material. The mechanical characterization of the composites were made by mechanical property testing (tensile, flexion and impact). Also, the morphological analyzes of pure resin (polyester) and the composites were performed by scanning electron microscopy (SEM). On the other hand, the thermal conductivity analysis was performed by the compensated hot plate device method, and the thermal characterization was performed by thermogravimetry (TGA). As observed in the results of mechanical property testing (tensile, flexion and impact), specimens with presence of 5% of fine particle of the corn cob show greater resistance than the ones with large particle and medium particle, which reinforces the relevance of the applicability of this material in the industry. Fractographic analyzes of the composites obtained through SEM indicated low mechanical adhesion load / matrix, with little evidence of transfer of effective tensions between phases. In terms of homogeneity of the mixture, the most viable particle size is the fine particle (FP). The composites obtained proved to be viable for thermal applications, with thermal conductivity lower than 0.25 W / m, being classified as thermal insulation of good quality. Thus, it can be emphasized that this composite showed a good thermal stability, can have its relevant applications, as thermal insulators, or as structural elements that are subject to light mechanical loading for composites with fine particle (FP) or medium particle (MP).

**Keywords:** composite materials with polymer matrix; polymers; particulates of corn cob; thermogravimetry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partes constituintes do sabugo de milho.....	31
Figura 2 - Micrografias por MEV mostrando (a-b) porosidade da medula, (c-d) palha grossa e palha fina região externa do sabugo de milho e (e-f) região do anel lenhoso que envolve a medula do sabugo de milho .....	32
Figura 3 - Classificação dos materiais compósitos.....	36
Figura 4 - Compósitos particulados.....	36
Figura 5 - Etapas da cura do polímero termofixo .....	39
Figura 6 - Diagrama tensão e deformação convencional .....	43
Figura 7 - Representação esquemática do ensaio de flexão .....	45
Figura 8 - Faixa de condutividade térmica para diferentes estados da matéria .....	50
Figura 9 - Molde de silicone (a) molde em madeira MDF (b) .....	57
Figura 10 - Partícula fina 44 $\mu\text{m}$ (a) partícula média 850 $\mu\text{m}$ (b) partícula grande 2360 $\mu\text{m}$ (c).....	58
Figura 11 - Balança analítica de precisão Shimadzu Aux .....	59
Figura 12 – Molde de silicone corpo de prova para ensaio de tração (a) molde em madeira MDF corpo de prova para ensaio térmico (b) .....	60
Figura 13 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de resistência à tração tipo I .....	61
Figura 14 - Corpo de prova RP 0% (a) corpo de prova RP + PF 10% (b) corpo de prova RP + PM 5% (c) corpo de prova RP + PM 20% (d).....	62
Figura 15 - Máquina universal ensaio de tração Time Group Inc.....	63
Figura 16 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de resistência à flexão de três pontos .....	64
Figura 17 - Corpo de prova RP 0% (a) corpo de prova RP + PF 10% (b) corpo de prova RP + PM 5% (c) corpo de prova RP + PG 20% (d).....	64
Figura 18 - Máquina universal ensaio de flexão Time Group Inc .....	65
Figura 19 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de resistência ao impacto	66
Figura 20 - Corpo de prova RP 0% (a) corpo de prova RP + PF 10%(b) corpo de prova RP + PM 5% (c) corpo de prova RP + PG 20% (d).....	66
Figura 21 - Máquina de ensaio de impacto – modelo Impactor Ceast .....	67

Figura 22 - Amostras presas no suporte (a) Microscópio eletrônico de varredura (b).....	68
Figura 23 - Analisador térmico TGA Q500 (TA Instruments).....	69
Figura 24 - Dispositivo de placa quente compensada.....	70
Figura 25 - Corpos de prova de ensaios térmicos.....	71
Figura 26 - Curvas típicas do ensaio de tração, força vs deslocamento da RP 0% + 5%, 10%, 20% PF de volume do sabugo de milho .....	73
Figura 27 – Valores das propriedades mecânicas, tensão máxima (a), módulo de elasticidade (b) deformação (c) para as composições das amostras RP 0% + 5%, 10%, 20% PF do sabugo de milho.....	76
Figura 28 - Curvas típicas do ensaio de tração, força vs deslocamento das amostras RP 0% + 5%, 10%, 20% PM de volume do sabugo de milho.....	77
Figura 29 – Valores das propriedades mecânicas, tensão máxima (a), módulo de elasticidade (b) deformação (c) para as composições de RP 0% + 5%, 10%, 20% PM do sabugo de milho.....	79
Figura 30 - Curvas típicas de tração, força vs deslocamento da RP 0% + 5%, 10%, 20% PG do volume de sabugo de milho .....	80
Figura 31 – Valores das propriedades mecânicas, tensão máxima (a) módulo de elasticidade (b) deformação (c) para as composições de RP 0% + 5%, 10%, 20% PG do sabugo de milho.....	82
Figura 32 – Valores da propriedade mecânica, tensão máxima de engenharia para todos os compósitos.....	83
Figura 33 – Valores da propriedade mecânica, módulo de elasticidade para todos os compósitos .....	83
Figura 34 – Valores da propriedade mecânica, deformação máxima de engenharia para todos os compósitos.....	84
Figura 35 - Curvas típicas de tração, força vs deslocamento da RP 0% + 5% PF, RP 0% + 10% PF, RP 0% +5% PM do volume de sabugo de milho .....	87
Figura 36 – Valores das propriedades mecânicas, (a) tensão máxima, (b) módulo de elasticidade (c) deformação para as composições de RP 0% + 5% PF, RP 0% + 10% PF, RP 0% + 5% PM do sabugo de milho .....	89
Figura 37 - Curvas típicas do ensaio de flexão, força vs deslocamento da RP 0% + 5%, 10%, 20% PF de volume do sabugo de milho .....	90

Figura 38 – Valores das propriedades mecânicas, (a) tensão máxima, (b) módulo de flexão (c) deflexão para as composições de RP 0% + 5%, 10%, 20% PF do sabugo de milho .....	93
Figura 39 - Curvas típicas do ensaio de flexão, força vs deslocamento da RP 0% + 5%, 10%, 20% PM de volume do sabugo de milho.....	94
Figura 40 - Valores das propriedades mecânicas, (a) tensão máxima, (b) módulo de flexão (c) deflexão para as composições de RP 0% + 5%,10%, 20% PM do sabugo de milho .....	96
Figura 41 - Curvas típicas do ensaio de flexão, força vs deslocamento da RP 0% + 5%, 10%, 20% PG de volume do sabugo de milho.....	97
Figura 42 – Valores das propriedades mecânicas, (a) tensão máxima, (b) módulo de flexão (c) deflexão para as composições de RP 0% + 5%, 10%, 20% PG do sabugo de milho .....	99
Figura 43 – Valores da propriedade mecânica, tensão de flexão para todos os compósitos .....	100
Figura 44 – Valores da propriedade mecânica, módulo de elasticidade para todos os compósitos .....	101
Figura 45 – Valores da propriedade mecânica, deflexão para todos os compósitos .....	101
Figura 46 - Valores de resistência ao impacto Izod para as composições de RP 0% + 5%, 10%, 20% PF do sabugo de milho .....	106
Figura 47 - Valores de resistência ao impacto Izod para as composições de RP 0% + 5%, 10%, 20% PM do sabugo de milho .....	107
Figura 48 - Valores de resistência ao impacto Izod para as composições de RP 0% + 5%, 10%, 20% PG do sabugo de milho .....	109
Figura 49 – Valores da resistência ao impacto para todos os compósitos.....	110
Figura 50 – Micrografia eletrônica de varredura da fibra do sabugo de milho triturado partícula fina (PF).....	112
Figura 51 – Micrografia eletrônica de varredura da fibra do sabugo de milho triturado partícula média (PM) .....	113
Figura 52 – Micrografia eletrônica de varredura da fibra do sabugo de milho triturado partícula grande (PG).....	114
Figura 53 – Análise fractográfica por MEV da amostra de resina pura (PR).....	115
Figura 54 – Análise fractográfica por MEV da amostra (RP) + 5% (PF).....	116

Figura 55 – Análise fractográfica por MEV da amostra (RP) + 10% (PF).....	117
Figura 56 – Análise fractográfica por MEV da amostra (RP) + 20% (PF).....	118
Figura 57 – Fractografia no MEV da amostra (RP) + 5% (PM) .....	119
Figura 58 – Fractografia no MEV da amostra RP + 10% (PM).....	120
Figura 59 – Fractografia no MEV da amostra (a) RP + 20% (PM) .....	121
Figura 60 – Fractografia no MEV da amostra (RP) + 5% (PG) .....	122
Figura 61 – Fractografia no MEV da amostra RP + 10% (PG).....	123
Figura 62 – Fractografia no MEV da amostra RP + 20% (PG).....	124
Figura 63 - Curva termogravimétrica para partícula fina (PF) .....	125
Figura 64 - Curva termogravimétrica para partícula média (PM).....	126
Figura 65 - Curva termogravimétrica para partícula grande (PG) .....	127
Figura 66 - Curvas termogravimétricas das partículas (PF, PM, PG) do sabugo de milho .....	128
Figura 67 - Curva termogravimétrica para resina poliéster pura .....	130
Figura 68 - Curva termogravimétrica para o compósito com 5% PF .....	131
Figura 69 - Curva termogravimétrica para o compósito com 10% PF .....	132
Figura 70 - Curva termogravimétrica para o compósito com 5% PM .....	133
Figura 71 - Curva termogravimétrica para o compósito com 20% PG .....	134
Figura 72 - Curvas termogravimétricas para a resina pura para os compósitos com 5%, 10% PF, 5% PM, 20% PG e as partículas do sabugo de milho .....	134
Figura 73 - Diagrama da variação da condutividade térmica da RP e dos compósitos com 5%, 10% PF, 5% PM e 20% PG .....	138

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferentes tipos de resina de poliéster .....	38
Tabela 2 - Propriedades da resina de poliéster insaturada ortoftálica.....	39
Tabela 3 - Composição dos corpos de prova .....	60
Tabela 4 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de tração em função do percentual de carga nos compósitos.....	73
Tabela 5 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de tração em função do percentual de carga nos compósitos.....	77
Tabela 6 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de tração em função do percentual de carga nos compósitos.....	81
Tabela 7 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de tração em função do percentual de carga nos compósitos.....	84
Tabela 8 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de tração em função do percentual de carga nos compósitos.....	88
Tabela 9 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de flexão em função do percentual de carga nos compósitos.....	91
Tabela 10 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de flexão em função do percentual de carga nos compósitos.....	95
Tabela 11 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de flexão em função do percentual de carga nos compósitos.....	98
Tabela 12 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de flexão em função do percentual de carga nos compósitos.....	102
Tabela 13 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaio de impacto Izod em função do percentual de carga nos compósitos.....	105
Tabela 14 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaio de impacto Izod em função do percentual de carga nos compósitos.....	107
Tabela 15 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaio de impacto Izod em função do percentual de carga nos compósitos.....	108
Tabela 16 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaio de impacto Izod em função do percentual de carga nos compósitos.....	110
Tabela 17 - Propriedades térmicas obtidas por método de dispositivo de placa quente compensada em função do percentual de carga dos compósitos.....	136

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
AT	Análise Térmica
CCDM	Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DTG	Derivada das Curvas Termogravimétricas
EPS	Poliestireno Expandido
ETEC	Escola Técnica
MDF	Medium Density Fiberboard
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PF	Partícula Fina
PG	Partícula Grande
PLA	Poliácido Láctico
PM	Partícula Média
PP	Polipropileno
RA	Resina Poliéster/Fibra de Açaí
RAC	Resina Poliéster/Fibra de Açaí e Curauá
RP	Resina Pura
RT	Resistência à Tração
SM	Sabugo de Milho
TGA	Análise Termogravimétrica



## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_{CN}$	Resistência ao impacto
$A$	Área seção transversal
$b$	Largura do corpo de prova
$d$	Espessura do corpo de prova
$d_t$	Temperatura
$d_x$	Comprimento que atravessa o fluxo de calor
$E$	Módulo de elasticidade
$E_c$	Energia real absorvida
$\varepsilon$	Deformação máxima
$F$	Força aplicada
$F_{max}$	Força máxima
$GPa$	Gigapascal
$J/m$	Joules/metro
$K$	Condutividade térmica
$K_e$	Condutividade térmica dos elétrons livres
$K_r$	Condutividade térmica a energia vibracional
$L$	Comprimento
$L_0$	Comprimento inicial
$LR$	Limite de resistência à tração
$ml/min$	Mililitros/minutos
$mm$	Milímetros
$MPa$	Megapascal
$m^2$	Metro quadrado
$\mu m$	Mícron
$N$	Newton
$N/m^2$	Newton/metro quadrado
$P$	Carga
$q_x$	Fluxo de calor
$S_0$	Área inicial seção transversal
$\sigma$	Tensão nominal

$\Delta L$	Varição no comprimento
$\Delta T$	Varição de temperatura
$W/m^2$	Watts/ metro quadrado

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>22</b>
1.1	OBJETIVOS	25
1.1.1	Objetivo Geral	25
1.1.2	Objetivos Específicos	25
1.2	JUSTIFICATIVA	26
1.3	HIPÓTESES	27
1.4	METODOLOGIA	27
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	28
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>29</b>
2.1	FIBRAS VEGETAIS	29
2.2	SABUGO DE MILHO	30
2.3	MATERIAIS COMPÓSITOS	34
2.4	MATRIZES POLIMÉRICAS	37
2.4.1	Matrizes Poliméricas Termorrígidas	37
2.5	RESINA POLIESTER	38
2.6	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	40
2.6.1	Propriedades Mecânicas	40
2.6.2	Ensaio de Tração	41
2.6.3	Ensaio de Flexão	44
2.6.4	Ensaio de Impacto	46
2.7	PROPRIEDADES TÉRMICAS	47
2.7.1	Condutividade Térmica	48
2.7.2	Condutividade Térmica de Materiais Sólidos	50
2.7.3	Materiais Poliméricos para Isolamento Térmico	51
2.8	ANÁLISES MICROSCÓPICAS	53
2.8.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	53
2.9	CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DOS COMPÓSITOS	54
2.9.1	Análise Termogravimétrica (TGA)	54

<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>56</b>
3.1	MATERIAIS	56
3.2	MÉTODOS	57
3.2.1	Preparação dos Resíduos Vegetais	57
3.2.2	Caracterização Morfológica das Fibras do Sabugo de Milho por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	58
3.2.3	Caracterização Térmica das Fibras do Sabugo de Milho por Termogravimetria (TGA)	58
3.2.4	Preparação dos Compósitos	59
3.2.5	Produção dos Corpos de Prova	60
3.3	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	61
3.3.1	Ensaio de Tração	61
3.3.2	Ensaio de Flexão de Três Pontos	63
3.3.3	Ensaio de Impacto	65
3.4	CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA	67
3.4.1	Caracterização Morfológica dos Compósitos de Sabugo de Milho por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	67
3.5	CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA	68
3.5.1	Caracterização Térmica dos Compósitos e da Matriz Polimérica por Termogravimetria (TGA)	68
3.6	ANÁLISE TÉRMICA	69
<b>4</b>	<b>RESULTADOSE DISCUSSÕES</b>	<b>72</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS	72
4.1.1	Ensaio de Tração	72
4.1.2	Ensaio de Flexão de Três Pontos	90
4.1.3	Ensaio de Impacto	105
4.2	CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DAS DIFERENTES GRANULOMETRIAS DO SABUGO DE MILHO POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	112
4.3	AVALIAÇÃO MORFOLÓGICA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DO POLIESTER E O COMPÓSITO COM 5% 10% 20% DE PF	114

4.4	AVALIAÇÃO MORFOLÓGICA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DO COMPÓSITO COM 5%,10%, 20% DE PM.....	118
4.5	AVALIAÇÃO MORFOLÓGICA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DO COMPÓSITO COM 5%, 10%, 20% DE PG.....	122
4.6	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DO FARELO DO SABUGO DE MILHO.	124
4.7	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DOS COMPÓSITOS COM FARELO DO SABUGO DE MILHO.....	129
4.8	ANÁLISE TÉRMICA .....	135
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>140</b>
<b>6</b>	<b>PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>142</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>143</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a criação dos primeiros polímeros termoplásticos em 1938, pelo químico da DuPont, W. Carothers (RAMOS, 2013), as múltiplas aplicações destes materiais e os estudos para a melhoria de suas propriedades atreladas a um menor custo de produção, vêm se tornando cada vez mais notáveis dado o avanço do consumo industrial em razão do crescimento econômico de países em desenvolvimento.

Com a crescente conscientização quanto à mudança de paradigma para processos cada vez mais ligados à preservação ambiental e à sustentabilidade, pesquisas vêm sendo desenvolvidas para avaliar a viabilidade da utilização de resíduos lignocelulósicos (sabugo de milho) como uma alternativa na substituição das fibras sintéticas convencionalmente utilizadas como reforço em materiais compósitos de matriz polimérica, procurando também obter novos materiais que apresentem uma boa resistência termomecânica e um custo menor, quando comparado com os polímeros sintéticos (SILVA, 2014).

Neste contexto, estão os materiais compósitos com matriz polimérica (resina poliéster), que podem ser utilizados para fabricação de estruturas, como por exemplo, protótipos solares e eólicos (OLIVEIRA, 2015).

Muitas são as vantagens deste compósito, como seu baixo custo, sua estabilidade térmica e dimensional, resistência química, facilidade de se moldar peças com grandes dimensões; no entanto, a sua baixa resistência à fratura torna necessária a utilização de reforços, com o uso de resíduos lignocelulósicos como reforço, mais especificamente o sabugo de milho triturado, que é a parte central da espiga de milho, onde ficam presos os grãos de milho.

O milho representa hoje a terceira espécie vegetal mais cultivada no mundo, ficando atrás somente do arroz e do trigo; para cada 100 kg de espigas, aproximadamente 18 kg compõem o sabugo, que ao final do processo de beneficiamento serão descartados (AGUIAR, 2010).

Os produtos gerados a partir do sabugo de milho são múltiplos, e suas aplicações são variadas; dentre elas se destacam a fabricação de painéis aglomerados, carga (suporte) para vários produtos químicos, na produção de

plásticos, colas adesivas, compostos de borrachas, abrasivo e polidor em produtos de limpeza, fabricação de tijolos, cerâmicas e ração animal (OLIVEIRA, 2015).

Alguns trabalhos foram realizados com a utilização de resíduos agrícolas como carga/reforço na formação de compósitos com matrizes poliméricas, mas nenhum utilizando resina de poliéster insaturada.

RAMOS, (2013), produziu e caracterizou compósitos de polipropileno com carga particulada de sabugo de milho como alternativa para a redução do consumo de polipropileno. O mesmo concluiu que a utilização do sabugo de milho como carga de enchimento na obtenção de compósitos é uma alternativa viável para redução de custos. Avaliou também que as propriedades mecânicas dos compósitos com até 20% de sabugo de milho demonstram propriedades semelhantes às do polipropileno puro, com um leve aumento do módulo de elasticidade e uma redução da resistência mecânica.

Segundo Oliveira (2015), que estudou a viabilidade do uso do farelo do sabugo de milho em três diferentes tipos de granulometria para a obtenção de um compósito de matriz polimérica, o compósito mostrou ser viável, para a fabricação de peças e estruturas aplicáveis a sistemas onde baixos esforços mecânicos são solicitados e também aplicáveis como um isolante térmico.

Obasi (2012), realizou um estudo sobre a biodegradabilidade e as propriedades mecânicas de compósitos de polietileno de alta densidade/farinha de sabugo de milho. Percebeu que a farinha de sabugo de milho ocasionou um aumento no módulo de elasticidade dos compósitos. Observou também, que a utilização de agentes acoplantes como anidrido maleico melhoram a dispersão do sabugo de milho na matriz e por consequência, melhora o desempenho mecânico dos compósitos.

Faludi (2012), preparou compósitos com matriz de Poliacido Láctico (PLA), reforçada com três frações de sabugo de milho (com granulometrias de 52, 108 e 135  $\mu\text{m}$  representando, respectivamente, palha fina/grossa, medula e anel lenhoso) e com farinha de madeira (363  $\mu\text{m}$ ) como referência para comparação das propriedades mecânicas entre os compósitos com as diferentes frações de sabugo. Segundo o autor há uma boa interação interfacial entre o Poliacido Láctico (PLA), e as diferentes estruturas do sabugo de milho, e estas possuem diferentes propriedades mecânicas, sendo o anel lenhoso, a fração mais resistente.

Por outro lado, Oladele e Agbabiaka (2015), prepararam compósitos com matriz de poliéster, reforçada com duas frações de sabugo de milho tratadas e não tratadas, (com granulometrias de 150 e 300  $\mu\text{m}$ ), analisando assim o efeito das partículas de sabugo de milho como reforço na matriz de poliéster nas propriedades mecânicas e de biodegradabilidade. Observaram que as partículas do sabugo de milho em ambos os tamanhos, tratadas e não tratadas, tem boa potencialidade para melhorar as propriedades mecânicas e de biodegradabilidade do compósito.

A proposta do presente trabalho é apresentar um estudo da avaliação das propriedades mecânicas e térmicas de um material compósito, buscando mostrar a viabilidade e a possível aplicação em diferentes setores da engenharia, porém, que não demandem grandes esforços mecânicos, mas que possuam boas propriedades como isolante térmico, como por exemplo juntas para motores, rotores e bombas.

Para a obtenção dos compósitos, foram utilizados, resina de poliéster insaturada como matriz e frações volumétricas de particulados, (5%,10%,20%) com três granulometrias diferentes em sua composição, partícula fina (44  $\mu\text{m}$ ), partícula média (850  $\mu\text{m}$ ) e partícula grande (2360  $\mu\text{m}$ ).

A caracterização interfacial reforço/matriz dos compósitos foram observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As influências da fração volumétrica do reforço nas propriedades mecânicas dos compósitos, em comparação com as propriedades da resina pura, foram avaliadas através dos ensaios de tração, flexão e impacto.

A estabilidade térmica e a identificação da temperatura de degradação do sabugo triturado, da resina pura e dos compósitos foram avaliados por termogravimetria (TGA). A condutividade térmica dos compósitos e da resina pura foram avaliadas através do método de dispositivo de placa quente compensada.



## 1.1 OBJETIVOS

Os objetivos que direcionam o presente trabalho estão divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo analisar as propriedades mecânicas e térmicas de um material compósito, empregando como carga o sabugo de milho triturado em três granulometrias diferentes, partícula fina (PF), partícula média (PM) e partícula grande (PG), além de verificar a sua viabilidade e a possível aplicação em diferentes setores da engenharia, porém, que não demandem grandes esforços mecânicos, possuam pouca deformação elástica e boas propriedades térmicas.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar as diferentes granulometrias do sabugo de milho, visando identificar a estrutura morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a estabilidade térmica de cada fase através da termogravimetria (TGA);
- Avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos variando o teor de material particulado (sabugo de milho), através dos ensaios de tração e flexão;
- Avaliar a tenacidade ao impacto;
- Analisar a qualidade interfacial (partícula/matriz) com os diferentes tamanhos de reforço e frações volumétricas do (sabugo de milho) por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Avaliar a estabilidade térmica do compósito polimérico através da técnica por termogravimetria (TGA);
- Avaliar a condutividade térmica do compósito, através do método de dispositivo de placa quente compensada.

- Viabilizar a aplicação do compósito como um importante elemento de isolamento térmico em juntas de motores, bombas e rotores.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

As questões ambientais estão ganhando um interesse crescente no mundo todo, a ponto de gerar uma conscientização a respeito da importância da sustentabilidade e da necessidade de uma conduta adequada para proteger o meio ambiente associado à tecnologia.

Tendo em vista os danos causados ao meio ambiente pelo acúmulo dos materiais poliméricos, que demoram anos para se decompor após o seu descarte, são necessárias alternativas que promovam o restringimento a substituição parcial ou até total da utilização desses materiais, por compósitos reforçados com fibras naturais.

O emprego de compósitos reforçados com fibras naturais é o reflexo das preocupações com as questões ambientais, como a poluição causada por resíduos que não são biodegradáveis.

Vale também lembrar que as fibras emanam de fontes renováveis, além de serem abundantes e de baixo custo comparadas às fibras sintéticas.

Diversas fibras naturais, obtidas a partir de plantas ricas em celulose, são especificadas como fibras lignocelulósicas, que têm sido investigadas e aplicadas na engenharia de compósitos.

Os ensaios realizados neste trabalho servirão para averiguar as propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos que compõem a matriz polimérica de poliéster insaturada e carga particulada de sabugo de milho e a possível viabilidade nos diversos setores da engenharia.

A eficiência de novos materiais produzidos a partir da fibra do sabugo de milho em matriz polimérica significa uma forma alternativa de causar menos danos ao meio ambiente e ao ser humano. Já que as fibras do sabugo de milho utilizadas são materiais residuais, e seus compósitos não liberam CO<sub>2</sub> para atmosfera, eles não causam, assim poluição do ar.

Desse modo, da perspectiva de observação ambiental, esse trabalho justifica-se, pois utiliza fibras vegetais em substituição às fibras sintéticas, contribuindo para minimizar os prováveis impactos gerados pelas indústrias de fabricação de fibras artificiais.

No campo da ciência, esse trabalho justifica-se pelo entendimento das propriedades mecânicas, físicas e térmicas desse material natural e dos mecanismos de reforço entre a fibra e a matriz poliéster.

Relevantemente, justifica-se o uso dessas fibras, pois apresentam baixo custo inicial, comparadas às fibras sintéticas, podendo se tornar uma sugestão para a produção de materiais de inovação tecnológica, como um isolante térmico.

### 1.3 HIPÓTESES

Por meio de estudos e testes experimentais, este trabalho apresenta um material compósito com matriz polimérica com reforço particulado de resíduos lignocelulósicos, o sabugo de milho triturado, como alternativa para substituição parcial de poliméricos sintéticos.

Através dos estudos, procuramos mostrar a viabilidade e aplicação em diferentes setores da engenharia, porém, que não demandem grandes esforços mecânicos, mas que possuam boas propriedades térmicas.

### 1.4 METODOLOGIA

Com o intuito de investigar as propriedades mecânicas e térmicas do material compósito, foi programado e realizado um procedimento para a confecção dos corpos de prova e conseqüentemente, uma série de experimentos práticos tais, como ensaios de tração, flexão e impacto para a verificação das propriedades mecânicas. A adesão entre reforço/matriz foi investigada por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), a avaliação da condutividade térmica foi realizada

através do método de dispositivo de placa quente compensada e para a caracterização térmica, foi realizado um ensaio de termogravimetria (TGA).

## 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está dividido em 6 capítulos, que são descritos a seguir.

O capítulo 1 apresenta a parte inicial do texto, na qual constam o tema e a delimitação do assunto tratado, os objetivos da pesquisa, a justificativa e as hipóteses do trabalho.

O capítulo 2 mostra a revisão da literatura para o desenvolvimento deste trabalho, citando e descrevendo os conceitos fundamentais das fibras vegetais, em especial o sabugo de milho, a fibra utilizada como reforço na composição do compósito, seguido de um breve relato de conceitos de materiais compósitos e matrizes poliméricas, em especial a resina de poliéster, pois o compósito é de matriz polimérica. Posteriormente, é apresentado um conceito fundamental sobre as propriedades dos materiais e os ensaios mecânicos realizados para a avaliação dos compósitos, além de uma breve discussão sobre propriedades térmicas, análises microscópicas e análises térmicas.

No capítulo 3, são apresentados os materiais utilizados e estabelecido o método adotado para o desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo 4, são discutidos os resultados dos ensaios realizados.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões e, por fim, no capítulo 6 estão descritas as propostas de continuidade e as referências bibliográficas utilizadas finalizando este estudo.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentado o levantamento do estado da arte referente à avaliação das propriedades mecânicas e térmicas de um compósito polimérico reforçado com sabugo de milho triturado. De modo geral, as discussões concentraram-se nas propriedades mecânicas e térmicas de um compósito polimérico, o material de estudo da presente dissertação. Inicialmente, são abordados os conceitos fundamentais das fibras vegetais, em especial a do sabugo de milho, a fibra utilizada como reforço na composição do compósito, seguido de um breve relato de conceitos de materiais compósitos e matrizes poliméricas, em especial a resina de poliéster, pois o compósito é de matriz polimérica. Posteriormente, é apresentado um conceito fundamental sobre as propriedades dos materiais e os ensaios mecânicos realizados para a avaliação dos compósitos.

Acrescentou-se, ainda, uma breve discussão sobre as propriedades térmicas e análises microscópicas.

### 2.1 FIBRAS VEGETAIS

As fibras vegetais vêm sendo utilizadas por muitas civilizações nas mais diferentes aplicações, como reforço em materiais compósitos poliméricos (MOTA, 2016).

A política ambiental e o custo reduzido são aspectos relevantes quando se considera as fibras naturais para a aplicação em materiais compósitos. Algumas vantagens das fibras naturais são atoxicidade, biodegradabilidade, reciclabilidade, baixo custo, baixa densidade, boas propriedades mecânicas, boa absorção e armazenagem de CO<sub>2</sub> (gás carbônico), baixo custo de energia em sua produção e são recursos naturais renováveis (BEVITORI, 2014).

Para (LEVY 2006 apud Silva, 2010), as fibras naturais de uma maneira geral podem ser de origem vegetal, animal ou mineral e possuem propriedades mecânicas inferiores as fibras sintéticas como vidro, aramida, por exemplo.

De acordo com Barbosa (2011), as propriedades físicas das fibras vegetais são determinadas principalmente pela composição química e física, tais como a estrutura das fibras, celulose, ângulo das fibrilas e pelo grau de polimerização.

A aplicação destas fibras como reforço para materiais compósitos poliméricos tradicionais termoplásticos e termofixos requer uma forte adesão, ou seja, uma boa molhabilidade entre a fibra e a matriz.

As propriedades mecânicas, assim como a composição das fibras, apresentam variações consideráveis em seus valores.

Estes fatores contribuem para que, em aplicações mais técnicas, seja necessária a modificação destas fibras com fins específicos (MOTA, 2016).

Questões sociais e ambientais são hoje, as vantagens mais consideráveis para a substituição de fibras sintéticas por fibras naturais. Além de solucionar parte dos problemas ambientais, a produção de fibras lignocelulósicas faz prosperar a economia de agricultores em regiões isoladas, representando uma importante fonte de renda.

## 2.2 SABUGO DE MILHO

O sabugo de milho é um resíduo agrícola sólido de grande volume que resulta do processamento do milho (LOPES, 2015).

O milho (*Zea mays*) pertence à família das póaceas, antigo grupo das gramíneas. É uma espécie que possui colheita anual e, devido ao seu valor nutritivo, vem sendo cultivado em todo mundo, utilizado principalmente para a alimentação humana e animal. O sabugo é um dos resíduos da planta do milho e se localiza na parte central das espigas, onde os grãos ficam presos (RAMOS, 2013).

Segundo Kleingesinds (2017), o sabugo de milho contém aproximadamente 391 g de celulose, 421 g de hemicelulose, 91 g de lignina, 17 g de proteína e 12 g de cinzas por quilo de matéria seca.

Estruturalmente o sabugo de milho divide-se em quatro partes fundamentais, palha fina, a região externa do sabugo, palha grossa, a camada que segue a palha fina, anel lenhoso, a região interna, e medula, a região interna do anel

lenhoso (OLIVEIRA, 2015, RAMOS 2013, FOLEY e VANDER HOOVEN, 1981 ZIGLIO, 2009).

A Figura 1 mostra a seção transversal do sabugo de milho e suas partes constituintes.



**Figura 1 - Partes constituintes do sabugo de milho**  
Fonte: Adaptado Ramos (2013).

Segundo Ziglio et al. (2009), a palha fina constitui aproximadamente 4,1% do sabugo de milho em peso; a palha grossa 33,7%; o anel lenhoso 60,3% e a medula, 1,9%.

De acordo com Ramos (2013), a estrutura porosa, com a formação baseada na orientação de várias fibras em forma circular, como anéis se sobrepondo ao longo de eixos dando origem a estruturas tubulares interligadas por uma resina resultando numa estrutura esponjosa bastante porosa que seria a característica da medula; uma mais sólida, semelhante a madeira, com a presença de várias fibras mais orientadas também recobertas pela resina representando o anel lenhoso; e uma estrutura mais fina, com a presença de poucas fibras dispostas aleatoriamente numa camada de resina, indicando ser a palha grossa.

Já a palha fina é identificada, segundo Ramos (2013), como uma estrutura sem fibras, provavelmente constituída apenas de lignina que envolve as fibras nas outras estruturas do sabugo.

A Figura 2 apresenta, em um corte transversal à região central do sabugo de milho, a porosidade da medula (a-b), a palha grossa e a palha fina da parte externa do sabugo (c-d) e o anel lenhoso (e-f).

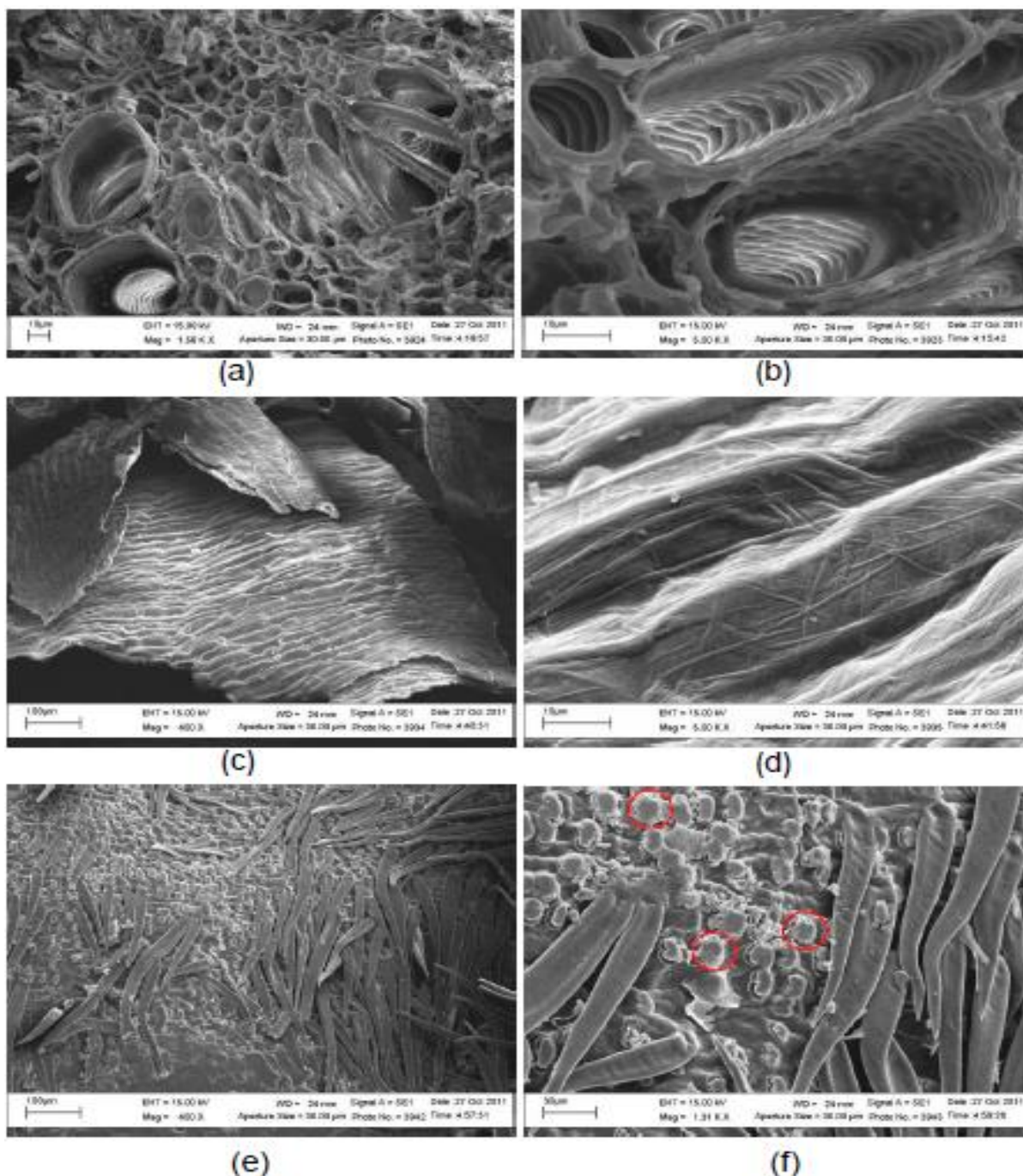


Figura 2 - Micrografias por MEV mostrando (a-b) porosidade da medula, (c-d) palha grossa e palha fina região externa do sabugo de milho e (e-f) região do anel lenhoso que envolve a medula do sabugo de milho

Fonte: Adaptado Ramos (2013).



Atualmente existe uma crescente preocupação com o descarte dos resíduos lignocelulósicos, que podem levar a problemas ambientais pela presença de substâncias de alto valor orgânico, potenciais fontes de nutrientes para microrganismos, como também a perdas de biomassa e energia (OLIVEIRA, 2015).

Uma das culturas geradoras de resíduos no país é a cultura do milho, produzido para a alimentação; os grãos proporcionam uma série de produtos industrializados; entretanto, algumas partes da planta não possuem um uso direto (OLIVEIRA, 2015).

Segundo Oliveira (2015), o sabugo, juntamente com a palha, também se torna um resíduo excedente e sem utilização definida, que na maioria das vezes é deixado no campo após a colheita. O destino principal deste resíduo é a ração animal.

Segundo o Ministério da agricultura, a produção de milho no Brasil na temporada de 2016, foi de 83,82 milhões de toneladas. O Brasil é o terceiro maior produtor mundial e autossuficiente para o consumo interno.

De acordo com a Conab (2015), o milho se destaca entre as espécies agrícolas com potencial de fornecimento de biomassa para a produção de energia, pela grande área cultivada no Brasil, cerca de 15 milhões de hectares, e pela alta produção de biomassa residual.

Devido às características de dureza e resistência à abrasão, os componentes do sabugo possuem várias aplicações na indústria. A dureza do anel lenhoso na escala mohs é de 4,5 sendo equivalente à do ferro (RAMOS, 2013).

O sabugo de milho apresenta grande utilidade como carga (suporte) para vários produtos químicos, na produção de colas adesivas, compostos de borrachas, pneus (RAMOS, 2013).

É utilizado como abrasivo e polidor em produtos de limpeza, na fabricação de tijolos e cerâmicas (OLIVEIRA, 2015). Também é utilizado como veículo de vitaminas em veterinária e ração animal (RAMOS, 2013).

Ainda no âmbito industrial, uma das utilizações do sabugo de milho é a produção do composto químico furfural, tendo outras utilidades o sabugo de milho é utilizado como aditivos em óleos vegetais (LOPES, 2015).

## 2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS

A busca de um material que combine adequadas resistências mecânicas, térmicas e acústicas tem merecido destaque em recentes pesquisas científicas. Em todos os eventos científicos nacionais e internacionais um grande número de trabalhos está voltado para essa finalidade (OLIVEIRA, 2015).

Os materiais compósitos têm sido estudados cada vez mais nos últimos tempos e a tendência é que o número de pesquisas a cerca deste assunto aumente. Ainda são necessárias investigações e desenvolvimento desta classe de material para melhor entendimento de suas características, da melhor maneira de processo e obtenção e onde melhor aplicá-los (OLIVEIRA, 2015).

Com esse propósito, os compósitos têm sido utilizados em larga escala, principalmente aqueles que têm resíduos em sua composição. Essa vertente deve-se à busca de minimizar os efeitos danosos da exposição desses resíduos na natureza, causando danos irreparáveis (MOTA, 2016).

Os compósitos a partir de recursos renováveis ganharam muita importância no cenário mundial, devido à sua natureza biodegradável. Produtos biodegradáveis estão se tornando cada vez mais atraentes, devido também ao crescimento dos preços e à escassez de petróleo bruto.

Os resíduos naturais de celulose, fibras, partículas, (micro e nano), são substitutos atraentes para serem utilizados como reforços e enchimentos ao fazer compósitos plásticos (ASOKAN e SONAL, 2012).

A crescente procura por materiais ecologicamente corretos, nos últimos anos, tem possibilitado o desenvolvimento de materiais de matrizes poliméricas com resíduos naturais. A utilização destes resíduos em compósitos vem crescendo no setor industrial devido à baixa densidade, à boa adesão à matriz e aos baixos custos das matérias primas, oriundas de fontes renováveis e inesgotáveis (OLIVEIRA, 2015).

O uso de materiais combinados sempre esteve presente na História da humanidade, desde o antigo Egito, na fabricação de tijolos e na Idade Média com as espadas medievais (CALLISTER, 2015).

No entanto, foi somente com o início da produção comercial de resinas plásticas, na primeira metade do século XX, que os compósitos para aplicações mais sofisticadas apareceram em grande escala (FILHO, 2013).

No início, a fibra natural era empregada apenas como reforço; como exemplo disso pode-se mencionar, dentre outras, a madeira, os tecidos e a serragem. Foi em 1940 que se iniciou o uso de compósitos com matriz polimérica reforçada por fibras de vidro, iniciando-se assim, a era dos compósitos avançados.

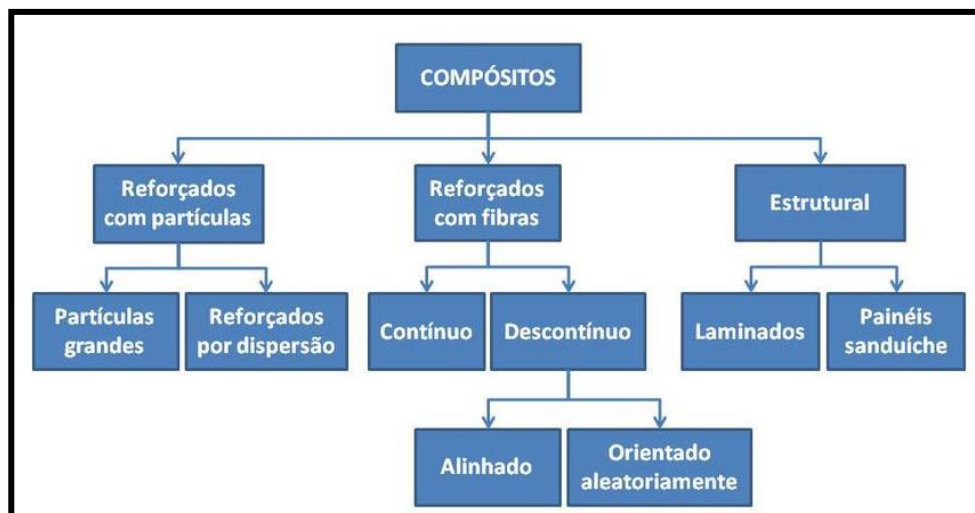
Os compósitos são materiais de moldagem estrutural, constituídos por uma fase contínua conhecida como matriz que abrange três tipos: cerâmica, polimérica e metálica; e por uma fase descontínua ou dispersa chamada de reforço, carga ou agregado, dependendo do tamanho ou do formato de suas partículas, ao se utilizar partículas a fase dispersa pode ser chamada de carga (GOMES, 2015).

A função básica do elemento denominado matriz em materiais compósitos é agir com um meio de transferência ou distribuição de carga para os reforços através do cisalhamento entre a matriz e reforço. Outra função da matriz em um compósito é proteger o reforço da abrasão mutua e de danos provocados por agentes externos, evitando assim a degradação pré-matura do reforço (NETO, 2016).

Na natureza também nos deparamos com materiais compósitos, como é o caso da madeira, que é constituída por fibras de celulose (fase descontínua) envolvida por uma matriz (fase contínua) de lignina. Por ser um material constituído de várias fases, além das propriedades de cada constituinte, o compósito apresenta ainda propriedades intermediárias decorrentes da formação de uma região interfacial. (MOTA, 2016).

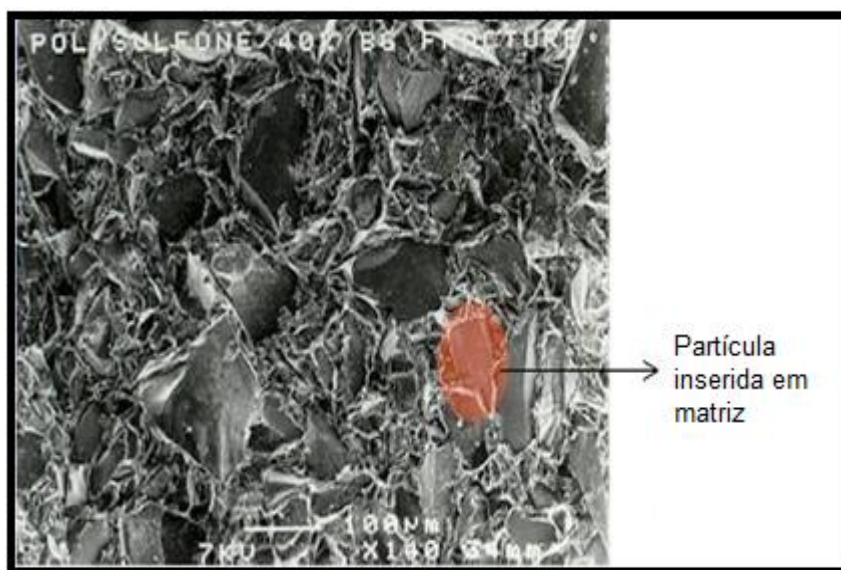
Segundo Oliveira (2015), a adesão de um material a outro está associada ao estabelecimento de interações que podem ser dos seguintes tipos: eletrostáticas, ligações de hidrogênio, ligações covalentes ou forças de Van der Waals. A natureza destas interações está associada à afinidade química entre a matriz e a fase dispersa.

Callister (2015), propõe uma classificação dos materiais compósitos de acordo com o tipo dos materiais constituintes e dos processos de fabricação. A Figura 3 mostra a classificação dos materiais compósitos.



**Figura 3 - Classificação dos materiais compósitos**  
 Fonte: Livro Callister, 2015.

Uma destas classificações define os compósitos em termos da morfologia de seus agentes de reforço: compósitos particulados, com fibras ou fibroso e laminados. O compósito estudado nessa pesquisa é do tipo particulado, que consiste na adição de partículas de um ou mais materiais em uma matriz polimérica. A Figura 4 apresenta um exemplo de compósito particulado.



**Figura 4 - Compósitos particulados**  
 Fonte: Adaptado Oliveira, (2015).

## 2.4 MATRIZES POLIMÉRICAS

Em geral os compósitos com matrizes poliméricas consistem em uma resina polimérica como a fase matriz, com fibras como o meio de reforço. Esses materiais são usados na maior diversidade de aplicações dos compósitos, assim como nas maiores quantidades, como consequência das suas propriedades à temperatura ambiente, da facilidade de fabricação e do seu custo (CALLISTER, 2015).

De acordo com Neto (2016), as propriedades dos polímeros são inadequadas para várias aplicações estruturais. A sua resistência e dureza são inferiores quando comparadas aos metais e cerâmicas. Isto significa que há um ganho considerável nas propriedades mecânicas específicas quando se adiciona aos polímeros reforços.

Outra vantagem dos compósitos de matriz polimérica é que a sua fabricação envolve altas pressões e baixas temperaturas, evitando-se problemas associados à degradação do reforço durante a fabricação. Por essas razões, o desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica cresceu rapidamente, assim como suas aplicações estruturais (ALMEIDA e MONTEIRO, 1998, apud NETO, 2016).

### 2.4.1 Matrizes Poliméricas Termorrígidas

As matrizes termorrígidas são polímeros em rede, que se tornam permanentemente rígidos durante a sua formação e não amolecem sob determinadas temperaturas.

Segundo Figueiredo et al. (2013), os polímeros termorrígidos são obtidos a partir de oligômeros de baixo peso molecular e normalmente se apresentam na forma de um líquido de baixa e média viscosidade. A reação de reticulação se dá através da adição de um agente de cura (catalizador) ou pelo aumento da temperatura.

As matrizes poliméricas termorrígidas (termofixas) apresentam ligações cruzadas covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes. Somente aquecimentos com temperaturas excessivas causarão o rompimento dessas ligações cruzadas e a degradação desta matriz (CALLISTER, 2015).

## 2.5 RESINA POLIESTER

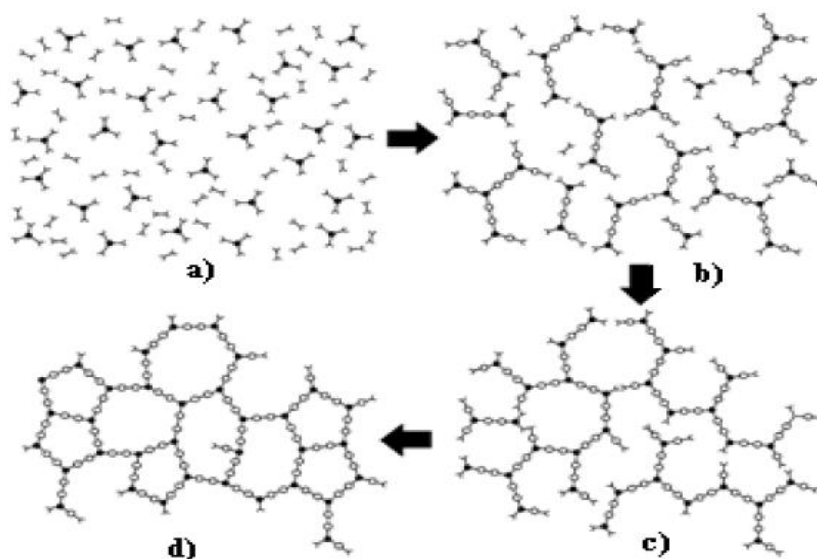
Poliéster é o nome dado a uma classe de materiais adquiridos por meio de uma reação de condensação entre um poli álcool e um ácido poli carboxílico. O tipo de ácido influencia as características finais das resinas poliésteres ortoftálicas, isoftálicas e tereftálicas. Se um ou ambos os componentes principais são insaturados, ou seja, contêm uma ligação dupla relativa entre os átomos de carbono, a resina resultante é insaturada (MOTA, 2016). A Tabela 1 mostra algumas resinas de poliéster.

**Tabela 1 - Diferentes tipos de resina de poliéster**

TIPOS	COMENTÁRIOS
Ortoftálica	Resina mais comum e de menor custo para usos básico.
Tereftálica	Possui resistências físicas pouco superiores a ortoftálica, porém baixa resistência a UV.
Isoftálica	Melhores características mecânicas, químicas e térmicas que as anteriores.
Isoftálica c/ NPG	O NPG melhora a resistência a hidrólise.
Bisfenólica	Possui melhores características químicas e térmicas.

**Fonte: Adaptado Mota, (2016).**

Segundo Dalibor (2013), a resina de poliéster insaturada durante a polimerização, chamada de cura, realizada com iniciador e em alguns casos com o catalizador, forma a rede entrecruzada conforme pode ser observado na Figura 5, na qual observamos (a) monômeros com baixa massa molecular, (b) o início das ligações entrecruzadas, (c) as ligações entrecruzadas incompletas, mas após o ponto de gel, (d) as ligações entrecruzadas são completadas.



**Figura 5 - Etapas da cura do polímero termofixo**  
 Fonte: Adaptado Dalibor, (2013).

De acordo com Mota (2016), as composições químicas do poliéster sólido determinam algumas características, tais como a flexibilidade, dureza, resistência mecânica, resistência química e resistência térmica. A Tabela 2 apresenta algumas propriedades da resina de poliéster insaturada ortoftálica, a mesma utilizada no trabalho.

**Tabela 2 - Propriedades da resina de poliéster insaturada ortoftálica**

PROPRIEDADES	VALORES	UNIDADES
<b>Tração</b>		
Resistência Máxima	57	MPa
Módulo de Elasticidade	1,97	GPa
Alongamento	3,2	%
<b>Flexão</b>		
Resistência Máxima	84,4	MPa
Módulo de Elasticidade	2,81	GPa

Fonte: Adaptado Mota, (2016).

As resinas de poliéster apresentam uma gama de vantagens, entre elas:

- Boa estabilidade dimensional;
- Ótima resistência a ambientes quimicamente agressivos;
- Excelentes propriedades elétricas;

- Fácil pigmentação;
- Cura a frio;
- Utilização de moldes simples e baratos.

## 2.6 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Todos os campos da tecnologia, especialmente aqueles referentes à construção de máquinas e estruturas, estão intimamente ligados aos materiais e às suas propriedades. Tomaremos como base as mudanças que ocorrem nos materiais, como as das propriedades físicas.

Uma propriedade física tem a característica de poder ser medida ou observada sem que a composição ou integridade da substância, seja afetada. São exemplos de propriedades físicas: as propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, ópticas e magnéticas. (CALLISTER, 2015).

### 2.6.1 Propriedades Mecânicas

A aplicação tecnológica de um material submetido a algum esforço mecânico depende de um estudo prévio detalhado de suas propriedades mecânicas para que essa aplicação alcance o êxito desejado. O desempenho dos compósitos é fortemente influenciado pelas propriedades de seus materiais constituintes, sua distribuição, fração volumétrica e interação entre eles (JESUS, 2014).

Uma importante ferramenta para a determinação das propriedades mecânicas são os ensaios de tração, flexão, impacto, obtendo-se valiosas informações sobre as características do material como, rigidez, resistência, ductilidade e tenacidade (CALLISTER, 2015).



### 2.6.2 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é um ensaio estático que consiste em aplicar uma força longitudinal crescente nas extremidades de um corpo de prova padronizado até que o mesmo se rompa. Através deste ensaio é possível levantar as características mecânicas do material, tais como tensão nominal ou de engenharia ( $\sigma$ ), resistência à tração (RT), deformação máxima ( $\epsilon$ ) e módulo de elasticidade (E), sendo o último relacionado com a dureza e a tenacidade do material (CALLISTER, 2015).

Normalmente em ensaios de tração utilizam-se corpos de prova de seção retangular em formato de gravata. A parte de maior interesse do corpo de prova é o comprimento, “a região (L)”, pois esta é a região onde são feitas as medidas das propriedades mecânicas do material. As cabeças são as extremidades, que servem para prender o corpo de prova à máquina, de modo que a força de tração atuante seja axial. As regiões das extremidades devem ter seção maior do que a parte útil para que a ruptura do corpo de prova não ocorra nelas (GARCIA et al, 2000), segundo a norma ASTM D638 (2016).

Registra-se durante o ensaio, a carga aplicada (F) e o aumento do comprimento do corpo de prova (L), conforme a Equação 1 onde  $\sigma$  é a tensão nominal, definida como a carga aplicada dividida pela área original da seção transversal da amostra.

$$\sigma = F / S_0 \quad (1)$$

Onde

$\sigma$  = Tensão Nominal (MPa ou N/m<sup>2</sup>);

F = Força aplicada no corpo de prova (N);

S<sub>0</sub> = Área inicial da seção transversal (m<sup>2</sup>).

O limite de resistência a tração convencional ou de engenharia, é a tensão correspondente ao ponto de máxima carga atingida durante o ensaio.

$$LR = F_{\max} / S_0 \quad (2)$$

Onde

LR = Limite de resistência à tração (MPa ou N/m<sup>2</sup>);

F<sub>max</sub> = Força máxima aplicada (N);

S<sub>0</sub> = Área inicial da seção transversal (m<sup>2</sup>).

A deformação de engenharia ( $\epsilon$ ) é determinada pela Equação 3, em que ( $\Delta L$ ) é o alongamento ou a variação no comprimento em um dado instante, em referência ao comprimento inicial.

$$\epsilon = \Delta L / L_0 \quad (3)$$

Onde

$\epsilon$  = deformação;

$\Delta L$  = variação do comprimento (m);

L<sub>0</sub> = comprimento inicial (m).

Quando um corpo de prova é submetido a um ensaio de tração, o equipamento de ensaio fornece um gráfico conforme a Figura 6, que exhibe as relações entre a força e o deslocamento ocorridas durante o ensaio. Este gráfico é chamado de diagrama tensão *versus* deformação, convencional quando a força é dividida pela área inicial e o alongamento pelo comprimento inicial.

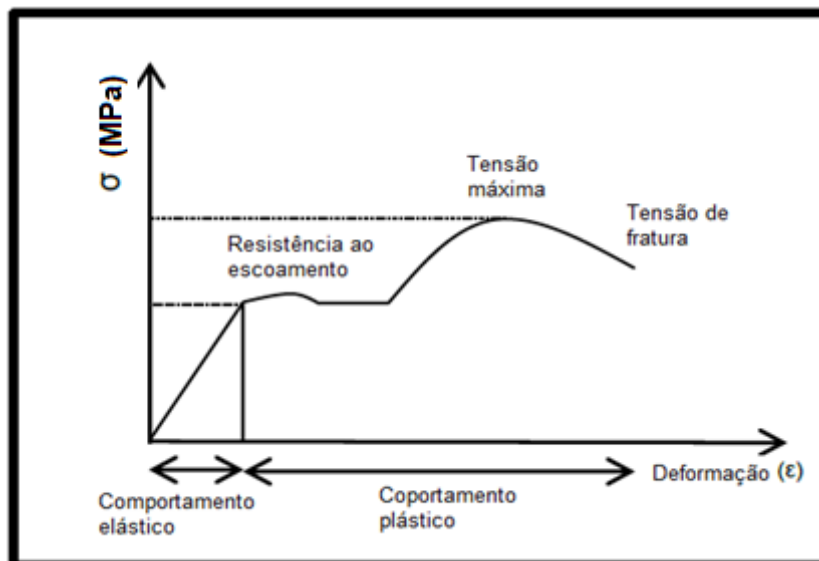


Figura 6 - Diagrama tensão e deformação convencional  
Fonte: Adaptado Jesus, (2014).

Em termos de comportamento mecânico é evidenciada, primeiramente, a região elástica, considerada a parte linear inicial do gráfico que possui comportamento reversível, ou seja, permite o retorno do corpo de prova à sua forma e dimensões originais, quando da ausência de carga aplicada. Esta região linear corresponde a uma fase de deformação elástica, ocorrendo uma proporcionalidade direta entre tensão e deformação que é definida pela Equação 4, onde E é denominado Módulo de Elasticidade ou Módulo de “Young” (CALLISTER, 2015).

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (4)$$

O módulo de elasticidade possui como definição a medida da rigidez do material, e depende fundamentalmente das forças de ligação interatômicas dos átomos, da composição química e da estrutura cristalina. Portanto, quanto maior o módulo, menor será a deformação elástica e mais rígido será o material (JESUS, 2014).

A região plástica é definida a partir do fim da região elástica até a ruptura do material. Esta é considerada irreversível, ou seja, quando a carga é retirada, o

material não recupera suas dimensões originais, fazendo com que os planos atômicos se desloquem para novas posições uns em relação aos outros.

Esta região prossegue até ser atingida uma tensão máxima denominada de limite de resistência. Essa tensão é anterior ao fenômeno de estricção do material.

A região de ruptura para materiais dúcteis é caracterizada pelo fenômeno da estricção, considerada uma diminuição da secção transversal do corpo de prova. É nessa região que ocorre a ruptura do corpo de prova e a deformação torna-se não-uniforme, fazendo com que a força deixe de agir unicamente na direção normal à secção transversal do corpo de prova. Além disso, os materiais são comumente classificados em dois grandes grupos: dúcteis e frágeis (GARCIA et al, 2000).

Os materiais dúcteis experimentam grandes deformações antes de sofrerem ruptura, ao passo que os frágeis evidenciam deformações muito menores, pouco ou nenhum escoamento. Assim, os materiais frágeis, ao contrário dos dúcteis, tendem a sofrer rupturas bastante bruscas, sem qualquer “aviso”, chegando até mesmo a romperem sob altas tensões (REDIGHIERI e COSTA, 2006).

Por fim, a técnica de ensaio de tração demonstra grande importância para a análise de matrizes poliméricas com reforço de fibras vegetais, geralmente, para a produção de compósitos, e o produto final demonstra uma combinação de boas propriedades mecânicas e vantagens ambientais. A estrutura e a natureza da interface fibra-matriz desempenham um papel importante nas propriedades mecânicas e físicas dos materiais compósitos, porque é através da interface que ocorre a transferência de carga (energia) da matriz para a fibra (REDIGHIERI e COSTA, 2006).

### 2.6.3 Ensaio de Flexão

Segundo Mota (2016), o ensaio de flexão consiste na aplicação de uma carga crescente em determinados pontos de uma barra de geometria padronizada. A carga aplicada inicia-se de um valor zero e cresce lentamente até a ruptura do corpo de prova.

Jesus (2014), relata que o ensaio consiste em apoiar o corpo de prova em dois pontos distanciados de um comprimento (L) e aplicar lentamente uma força de flexão (F) no centro deste conforme Figura 7.

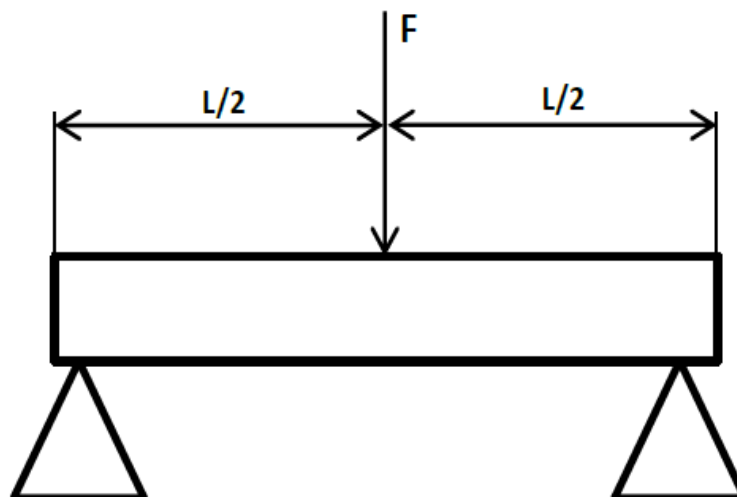


Figura 7 - Representação esquemática do ensaio de flexão  
Fonte: Adaptado Jesus, (2014).

A principal utilização do ensaio de flexão é avaliar a propriedade mecânica de materiais frágeis e dúcteis: são analisadas as tensões internas na fase elástica, isto é, quando o material é submetido a um esforço e apresenta a capacidade de absorver energia, ocorrendo um desarranjo em sua estrutura interna e devolvendo esta energia ao meio, retornando naturalmente à forma inicial em que se encontrava (FILHO, 2013).

Através deste ensaio, é possível levantar as características mecânicas do material, tais como a tensão de flexão ( $\sigma$ ) que é calculada pela Equação 5 (JESUS, 2014).

$$\sigma = 3 * P * L/2 * b * d^2 \quad (5)$$

Onde;

$\sigma$  = tensão de flexão (MPa);

P = carga (N);

L = distância entre os apoios;

b = largura do corpo de prova (mm);  
d = espessura do corpo de prova (mm).

Outra propriedade importante a ser obtida no ensaio de flexão é o módulo de elasticidade à flexão (E) que pode ser calculado pela Equação 6 (JESUS, 2014), em que E é o módulo de elasticidade, em MPa, e m é a inclinação da tangente da curva carga *versus* deflexão.

$$E = L^3 * m / 4 * b * d^3 \quad (6)$$

Onde;

E = módulo de elasticidade (MPa);

m = inclinação da tangente da curva vs deflexão.

#### 2.6.4 Ensaio de Impacto

De acordo com Callister (2015), o grau de resistência de um material polimérico a uma carga de impacto pode ser relevante em algumas aplicações. Os ensaios Charpy ou Izod são usados normalmente para avaliar a resistência ao impacto.

O comportamento dúctil – frágil dos materiais podem ser extensamente evidenciados nos ensaios de impacto quando a carga for aplicada, na forma de esforços por choque (dinâmicos), sendo o impacto obtido por meio da queda de um pêndulo de uma determinada altura, sobre a peça a examinar.

A principal aplicação desse ensaio refere-se à caracterização do comportamento dos materiais, na transição da propriedade dúctil para a frágil como função da temperatura, possibilitando a determinação da faixa de temperatura na qual um material muda de dúctil para frágil (GARCIA, 2000; SANTOS, 2000).

De maneira semelhante aos metais, os polímeros podem exibir fratura dúctil ou fratura frágil sob uma carga de impacto, dependendo da temperatura, do tamanho da amostra, da taxa de deformação e do modo de aplicação da carga.

No entanto, eles apresentam uma transição dúctil – frágil em uma faixa de temperatura relativamente estreita; a resistência ao impacto apresenta uma diminuição gradual em temperaturas ainda mais elevadas, conforme o polímero começa a amolece. Normalmente as duas características de impacto mais desejadas, são de uma elevada resistência ao impacto a temperatura ambiente, e que a temperatura de transição dúctil – frágil ocorra abaixo da temperatura ambiente.

A resistência ao impacto  $a_{cN}$  pode ser calculada em J/m. O valor de  $a_{cN}$  em J/m é calculado através da Equação 7:

$$a_{cN} = E_c/h * 10^3 \text{ (J/m)} \quad (7)$$

Onde:

$a_{cN}$  = Resistência ao impacto;

$E_c$  = Energia real absorvida (em Joules);

$h$  = Espessura do corpo de prova (em mm).

## 2.7 PROPRIEDADES TÉRMICAS

Segundo Callister (2015), a propriedade térmica refere-se à resposta de um material à aplicação de calor. Conforme um sólido absorve energia na forma de calor, sua temperatura e suas dimensões aumentam. A energia pode ser transportada para regiões mais frias da amostra caso existam gradientes de temperatura e, por fim, a amostra pode fundir. A capacidade calorífica, a expansão térmica e a condutividade térmica são propriedades analisadas para a utilização prática dos sólidos.

De acordo com (GIGLIO, 2005, apud MOTA 2016), a análise do desempenho térmico de sistemas construtivos está vinculada ao conhecimento das

propriedades térmicas de seus elementos, os quais podem ser definidos pela condutividade térmica.

### 2.7.1 Condutividade Térmica

A condutividade térmica  $\kappa$  é uma propriedade física dos materiais de grande importância quando se avalia a transferência de calor por condução. Ela está relacionada com a facilidade que um determinado material tem de conduzir calor, ou seja, quanto maior seu valor, mais facilmente a energia térmica será transferida, porém, quando seu valor é reduzido, o fluxo de calor encontrará maior dificuldade em sua passagem. Em aplicações em que o objetivo é o isolamento térmico, a transferência de calor entre dois meios deve ser minimizada e para isso um material com baixo valor de condutividade térmica deve ser selecionado. Contudo, quando é necessário o aumento da eficiência da transferência de calor, um material com alto valor de condutividade térmica é empregado. É esta propriedade que demarca o grau da temperatura de trabalho do material, tornando-se importante na transferência de calor transiente (SOUZA, 2015).

De acordo com Callister (2015), a condutividade térmica é o fenômeno pelo qual o calor é transportado das regiões de alta temperatura para as de baixa temperatura em uma substância. Segundo Callister (2015), a propriedade que caracteriza a habilidade de um material de transferir calor é a condutividade térmica.

A condutividade térmica é uma característica específica de cada material e caracteriza-se pela capacidade de um material em transferir calor de um ponto onde sua temperatura é maior, para um outro ponto onde sua temperatura é menor (Incropera e DeWitt, 2008).

De acordo com Mota (2016), a condução de calor é o processo de troca de energia entre sistemas, ou partes deles em diferentes temperaturas, que ocorre pela interação entre camadas eletrônicas transferindo energia, pelo impacto entre elétrons, as outras, de menor nível energético, gerando uma onda térmica, cuja velocidade de propagação depende claramente da natureza da matéria.



A lei básica da condução de calor é baseada nos experimentos de Fourier como descrito por (MOTA, 2016), e a partir dela a condutividade térmica é definida de acordo com a Equação 8.

$$K = q_k / A \cdot dx / dT \quad (8)$$

Onde:

$K$  = Condutividade térmica de material (W/m.K);

$q_k$  = Fluxo de calor (W);

$A$  = Área perpendicular ao fluxo de calor (m<sup>2</sup>);

$dT$  = Temperatura (°C ou K);

$dx$  = Comprimento que atravessa o fluxo de calor (m).

Os intervalos de condutividade térmica dos inúmeros materiais aplicados em engenharia são muito amplos. Os valores de condutividade térmica mais elevados referem-se a metais puros, muito condutores, enquanto os de valores mais baixos referem-se a gases e vapores, por exemplo. Os sólidos não-metálicos e os líquidos têm condutividades térmicas intermediárias (THOMAZONI et al., 2010).

A condutividade térmica depende da fase em que o material se encontra, do peso específico, da porosidade, da umidade e principalmente da temperatura. A variação da condutividade com a temperatura em alguns materiais, dentro de um certo intervalo, é bastante pequena e pode ser desprezada, mas, em muitos casos, esta variação é significativa com a temperatura (THOMAZONI et al., 2010).

Quanto maior a condutividade térmica de um material, maior será a sua capacidade de transferir calor então, este material terá uma característica de um condutor térmico.

Na Figura 8 é possível observar os valores de condutividade térmica em (W/m<sup>2</sup>. K) para diferentes estados da matéria.

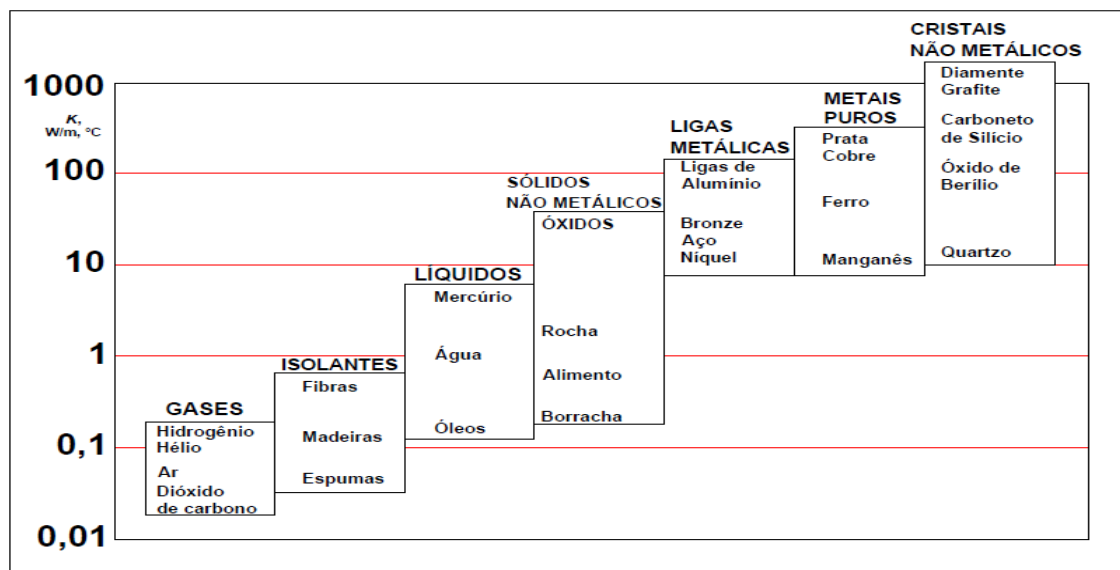


Figura 8 - Faixa de condutividade térmica para diferentes estados da matéria  
Fonte: Adaptado Souza, 2015.

### 2.7.2 Condutividade Térmica de Materiais Sólidos

A energia térmica em um material sólido pode ser transportada devido à ocorrência de dois efeitos. O primeiro é a movimentação dos elétrons livres presentes na estrutura atômica do material, o outro é decorrente das ondas de vibração do retículo cristalino ou rede (arranjo periódico dos átomos). Essas ondas são denominadas de fônons. A cada um desses mecanismos está associada uma condutividade térmica, esses efeitos são aditivos, logo a condutividade térmica do material é a resultante da soma das duas contribuições (CALLISTER 2015 e INCROPERA et al, 2008).

Assim, a condutividade térmica de um material pode ser expressa em função das contribuições relativas aos elétrons livres e aos fônons de acordo com a Equação 9.

$$K = K_e + K_r \quad (9)$$

Onde  $K_e$  é a condutividade térmica devido ao movimento dos elétrons livres e  $K_r$  é a condutividade térmica devido à energia vibracional do retículo cristalino.

A parcela de  $K_r$  é originada pelo movimento global dos fônons, causado pela existência de um gradiente de temperatura, permitindo assim que estes se desloquem de regiões com temperaturas maiores para regiões com temperaturas menores.

De acordo com Callister (2015), quando uma região de um material tem sua temperatura elevada, os elétrons dessa área apresentam um aumento na sua energia cinética. Estes, por sua vez, deslocam-se para regiões com temperaturas menores, nas quais parte de sua energia é transferida aos próprios átomos, como energia vibracional, devido às colisões com os fônons e imperfeições existentes no cristal. A influência de  $K_e$  sobre  $K$  é diretamente proporcional ao número de elétrons livres, ou seja, quanto maior o número de elétrons livres, maior a contribuição de  $K_e$ , já que uma quantidade maior de colisões irá ocorrer. O mecanismo eletrônico de transporte de calor nos materiais metálicos de alta pureza é mais eficiente. Isto se deve ao grande número de elétrons livres, as altas velocidades dos elétrons e também ao fato de que os elétrons não são tão facilmente dispersos, ao contrário dos fônons. Isso explica o fato de os materiais metálicos serem bons condutores de calor (CALLISTER, 2015).

### 2.7.3 Materiais Poliméricos para Isolamento Térmico

Isolamento térmico é definido como a proteção de superfícies aquecidas ou resfriadas, com o objetivo de reduzir a efetividade da troca de calor com o meio no qual a superfície está localizada. Como exemplo de superfícies que podem receber a proteção de um isolamento térmico temos: as paredes de um forno industrial, as paredes externas e internas de uma edificação ou as paredes internas de uma garrafa térmica. Na prática o isolamento térmico é feito pela aplicação de materiais de baixa condutividade térmica ou de compostos produzidos a partir da combinação de materiais de condutividade térmica reduzida (SOUZA, 2015).

Segundo (BORGES, 2009, apud SANTOS, 2015), relatou que o desperdício de energia é uma preocupação contemporânea e a partir desse sentimento, partilhado entre os mais diversos setores da sociedade, desenvolve-se a consciência da utilização racional da energia e, portanto, ocorre a ampliação da demanda de aplicação de isolantes térmicos.

Ford et al. (2010), indica que a escolha do material adequado para uma aplicação de isolamento térmico é realizada através de análises de propriedades mecânicas, físicas e térmicas. Como não existe um material isolante ideal, a comparação entre as opções disponíveis possibilita a escolha daquele que melhor satisfaça ao princípio fundamental da engenharia: a relação custo *versus* benefício.

Galvão (2012), ressaltou que existem muitos materiais classificados como isolantes térmicos e que para cada aplicação desses materiais existem especificações de acordo com o gradiente de temperatura, que pode ser, por exemplo, o clima da região onde o isolamento será utilizado.

Para estabelecer as especificações dos mais diversos isolantes térmicos, tomamos como base o fato de existir a necessidade de análises de desempenho térmico a partir de protótipos experimentais, para constatar e quantificar a eficiência de materiais isolantes, que tem o objetivo de reduzir ao máximo as trocas térmicas indesejáveis, procurando manter constante a temperatura de um dado sistema fechado (SANTOS, 2015).

Souza (2015), evidencia que geralmente os materiais empregados no isolamento térmico são porosos, pois, no interior dos poros o ar é aprisionado. Este fato além de evitar a movimentação do fluido, evita também a transferência de calor por convecção. Por isso, materiais porosos de baixa condutividade térmica com poros pequenos e paredes finas são tidos como bons isolantes térmicos.

Segundo (VAN WYLEN; SONNTAG, 1988 apud FORD, 2011), a condutividade térmica é considerada a propriedade mais importante de um isolante, pois especifica a capacidade que um dado material tem de transferir energia térmica.

Para materiais poliméricos a transferência de energia, que define a condutividade térmica, é realizada através da vibração e da rotação das moléculas da cadeia polimérica.

Entretanto, a resistência térmica e a condutividade térmica dos polímeros estão relacionadas com o grau de cristalinidade deste material, pois quanto mais cristalino o material se apresentar, maior será a sua condutividade térmica tendo, em

vista que as vibrações das moléculas ocorrerão de forma coordenada e mais efetiva entre as cadeias moleculares (CALLISTER 2015).

Segundo Callister (2015), a condutividade térmica para a maioria dos polímeros é da ordem de 0,3 W/m.k.

Por outro lado (WANG, 1988 apud CRAVO, 2013), afirma que para um material ser considerado um isolante térmico, sua condutividade térmica tem que ser menor que 0,25 W/m.k.

## 2.8 ANÁLISES MICROSCÓPICAS

Ocasionalmente, é necessário ou desejável examinar os elementos estruturais e os defeitos que influenciam as propriedades dos materiais.

Os microscópios ópticos, eletrônicos de varredura com sonda são comumente usados em microscopia. Esses instrumentos auxiliam nas investigações das características microestruturais de todos os tipos de materiais.

O exame microscópico é uma ferramenta extremamente útil no estudo e na caracterização dos materiais.

As importantes aplicações dos exames são: assegurar que as associações entre as propriedades e a estrutura sejam compreendidas da forma correta, a fim de prever as propriedades dos materiais uma vez que essas relações tenham sido estabelecidas; projetar ligas com novas combinações de propriedades e determinar se um material foi tratado termicamente de maneira correta. (CALLISTER 2015).

### 2.8.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A MEV é uma ferramenta de investigação extremamente útil onde a superfície de uma amostra a ser examinada é varrida com um feixe de elétrons e o feixe de elétrons refletido é coletado e exibido na mesma taxa de varredura em tubos de raios catódicos (semelhante a tela de uma TV). A imagem pode ser fotografada,

representando as características da superfície da amostra. São possíveis ampliações que variam entre 10 e mais de 50.000X. (CALLISTER, 2015)

Segundo Mota (2016), a MEV é uma ferramenta importante para avaliar o mecanismo de danos, pois com esta ferramenta é possível identificar a interação e adesão entre fibra polimerizada e a matriz.

## 2.9 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DOS COMPÓSITOS

A análise térmica (AT) conceitua-se como um conjunto de técnicas que permite avaliar as mudanças de propriedades físico-químicas de materiais em função da temperatura ou do tempo.

A análise térmica possui algumas vantagens e desvantagens. Dentre as vantagens podem-se destacar a necessidade de uma pequena quantidade de amostra para análise, a variedade de resultados em um único gráfico, e o fato de que não há necessidade de preparo da amostra e aplicação em diversas áreas.

Porém, entre as desvantagens há o custo alto dos equipamentos, a sensibilidade e a precisão das medidas de mudanças físico-químicas que são relativamente baixas comparadas com técnicas espectroscópicas e o fato de ser uma técnica destrutiva (JESUS, 2014).

A propriedade física investigada por meio de análises térmicas neste trabalho foi a análise termogravimétrica (TGA).

### 2.9.1 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica é uma técnica na qual a massa de uma amostra em uma atmosfera controlada é registrada continuamente em função da temperatura ou do tempo, enquanto a temperatura da amostra é aumentada (geralmente linearmente com o tempo).

Um gráfico de massa ou porcentagem de massa em função do tempo é chamado de curva de decomposição térmica, curva termogravimétrica ou curva TGA (JESUS, 2014).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção do trabalho são apresentados e descritos os materiais, os equipamentos e os métodos empregados nos ensaios e análises do compósito estudado.

No estudo proposto foram avaliadas, as características mecânicas, através dos ensaios de tração seguindo a norma ASTM-D638, o ensaio de flexão seguindo a norma ASTM-D790 e o ensaio de impacto Izod seguindo a norma ASTM-D256. As características morfológicas das fibras do sabugo de milho, a adesão reforço/matriz dos compósitos foram analisadas utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As avaliações térmicas das fibras do sabugo de milho e dos compósitos foram analisadas através da termogravimetria (TGA) seguindo a norma ASTM-E1131 e a condutividade térmica dos compósitos, foram avaliadas pelo método de dispositivo de placa quente compensada, seguindo a norma ANSI/ASTM C 177-76.

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a produção dos compósitos são fibras oriundas do sabugo de milho com três diferentes granulometrias, partícula fina (PF) com 44  $\mu\text{m}$ , partícula média (PM) com 850  $\mu\text{m}$  e partícula grande (PG) com 2360  $\mu\text{m}$ . As fibras foram fornecidas, sem custos, pelo Sr. Marcilio Albuquerque, residente da cidade de Assis – SP.

A resina utilizada como matriz foi a resina de poliéster insaturada (adesivo de laminação) composto por Monômero de Estireno com uma proporção do catalisador metil-etil-cetona de 5% em peso, adquirida comercialmente.

O desmoldante utilizado, para se obter um melhor acabamento de superfície, bem como facilitar a retirada dos corpos de prova dos moldes, foi a vaselina industrial.

Para a produção dos corpos de prova dos ensaios mecânicos foram utilizados moldes de silicone, e na produção dos corpos de prova para o ensaio



térmico os moldes utilizados foram os de madeira MDF. A Figura 9 (a) mostra os moldes em silicone, e a Figura 9 (b) o molde em MDF.

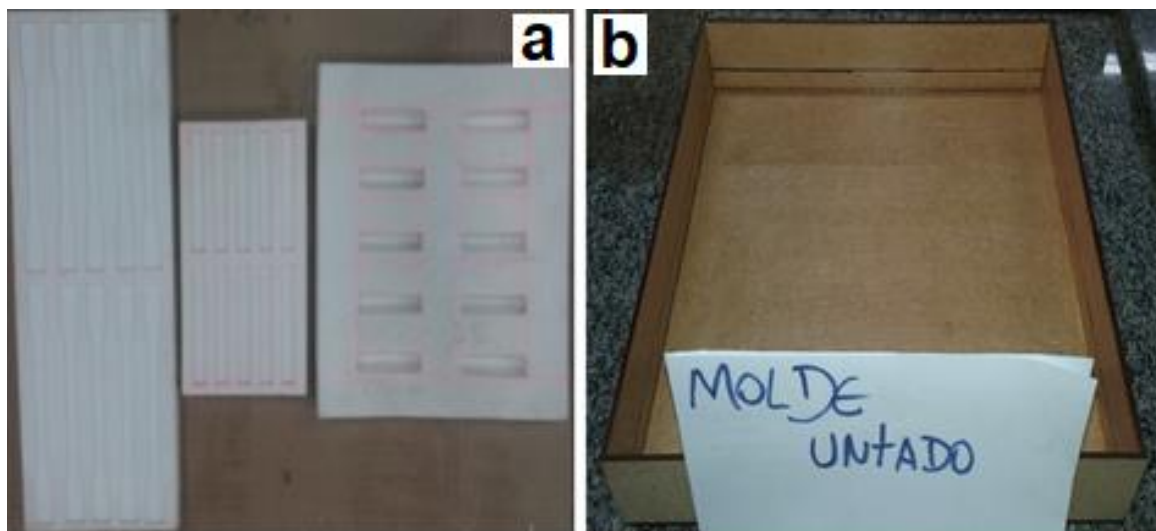


Figura 9 - Molde de silicone (a) molde em madeira MDF (b)  
Fonte: Autoria própria.

## 3.2 MÉTODOS

Para a obtenção e caracterização dos compósitos foram necessários a execução de alguns procedimentos, os quais são apresentados a seguir.

### 3.2.1 Preparação dos Resíduos Vegetais

Os reforços de adição de sabugo de milho triturado, partícula fina (PF), partícula média (PM) e partícula grande (PG) passaram por um processo de peneiramento manual para que fossem eliminadas todas ou qualquer tipo de impurezas, e para que fossem conhecidas as suas granulometrias. A Figura 10 mostra a aparência das três granulometrias utilizadas.



**Figura 10 - Partícula fina 44  $\mu\text{m}$  (a) partícula média 850  $\mu\text{m}$  (b) partícula grande 2360  $\mu\text{m}$  (c)**  
Fonte: Autoria própria.

### 3.2.2 Caracterização Morfológica das Fibras do Sabugo de Milho por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A morfologia das fibras do sabugo de milho foi investigada por MEV utilizando amostras de cada uma das frações granulométricas separadamente, para identificar se há separação das diferentes partes constituintes do sabugo (palha fina, palha grossa, medula e anel lenhoso), este ensaio foi realizado junto ao CMCM – Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR - Câmpus Curitiba.

As amostras foram fixadas em um suporte metálico com fita de carbono e em seguida metalizadas com ouro para a análise microscópica. O equipamento usado foi o Microscópio eletrônico de varredura Carl Zeiss/EVO MA.

### 3.2.3 Caracterização Térmica das Fibras do Sabugo de Milho por Termogravimetria (TGA)

A estabilidade térmica das fibras do sabugo de milho foi investigada por termogravimetria (TGA), utilizando amostras de cada uma das frações granulométricas para identificar em que temperatura ocorrem degradações em suas diferentes partes constituintes.

Os ensaios foram realizados junto ao CCDM - Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar,

em um analisador térmico TGA Q500 (TA Instruments) utilizando amostras com a massa variando entre 4,3 e 7,6 mg, em suporte de amostra de alumina, sob atmosfera dinâmica de nitrogênio (N<sub>2</sub>), com vazão de gás de 50 ml/min. As amostras foram aquecidas a partir da temperatura ambiente 23°C a 800 °C e a razão de aquecimento de 10 °C/min.

#### 3.2.4 Preparação dos Compósitos

Os resíduos lignocelulósicos foram pesados em uma balança analítica de precisão da marca SHIMADZU AUX carga máxima 220 g, como mostra a Figura 11.



**Figura 11 - Balança analítica de precisão Shimadzu Aux**  
**Fonte: Aatoria própria.**

Na sequência, os reforços foram incorporados e misturados manualmente com a resina de poliéster. Essa composição foi misturada por aproximadamente 20 minutos, em seguida foi inserido catalisador nas proporções volumétricas de 0%, 5%, 10% e 20%, como apresenta a Tabela 3 abaixo.

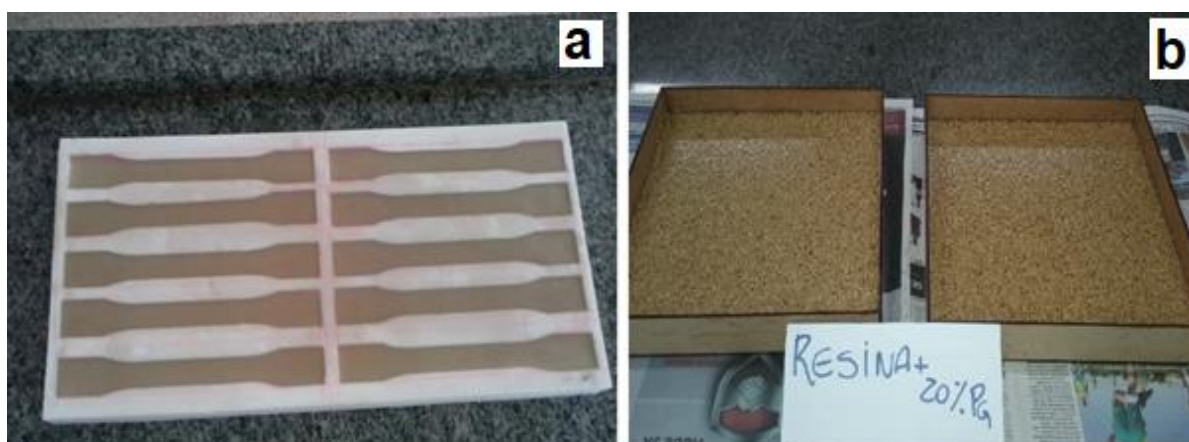
**Tabela 3 - Composição dos corpos de prova**

Composições	Matéria prima (% em volume)	
	Resina (%)	Reforço (%)
Resina Pura (RP)	100	0
Compósito (PF)	95	5
Compósito (PF)	90	10
Compósito (PF)	80	20
Compósito (PM)	95	5
Compósito (PM)	90	10
Compósito (PM)	80	20
Compósito (PG)	95	5
Compósito (PG)	90	10
Compósito (PG)	80	20

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.2.5 Produção dos Corpos de Prova

Realizada a incorporação dos reforços nas suas devidas proporções e misturadas manualmente com a resina e o catalisador, os compósitos foram envasados manualmente em moldes de silicone para fabricação dos corpos de prova para os ensaios mecânicos, e em moldes de MDF para o ensaio térmico, como mostra a Figura 12.



**Figura 12 – Molde de silicone corpo de prova para ensaio de tração (a) molde em madeira MDF corpo de prova para ensaio térmico (b)**

**Fonte: Autoria própria.**

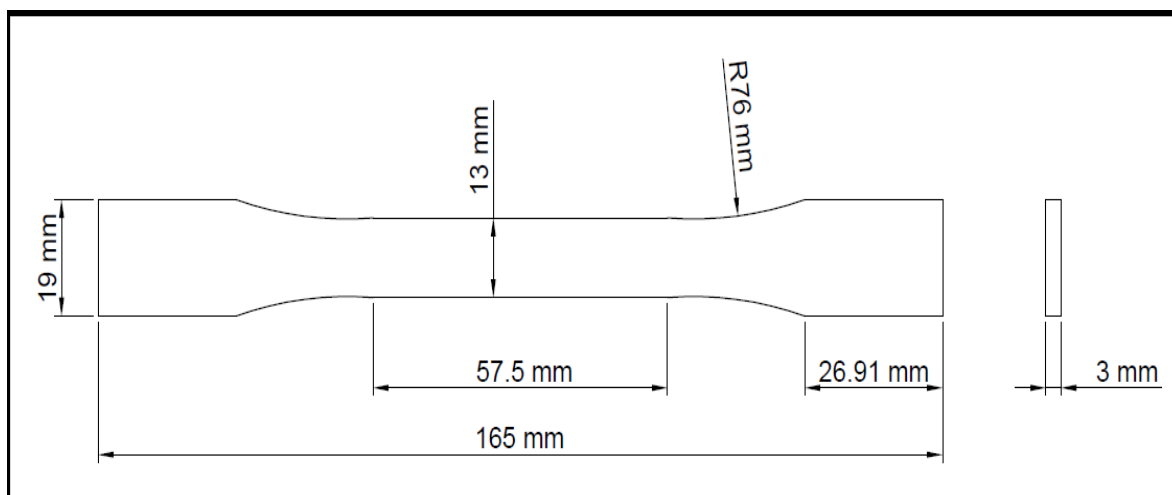
### 3.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Para o levantamento das características mecânicas foram realizados os ensaios de tração, flexão e impacto. Através destes foi possível levantar as características como resistência à tração, resistência à flexão e resistência ao impacto.

#### 3.3.1 Ensaio de Tração

Os corpos de prova para os ensaios de tração foram produzidos conforme a norma ASTM-D638, com formato de gravata, com comprimento total de 165 mm; comprimento útil 80 mm; largura da secção estreita 12,7 mm e a espessura de 3 mm.

A Figura 13 mostra as dimensões do corpo de prova utilizado nos ensaios de resistência à tração, sendo do tipo I o utilizado para este estudo.



**Figura 13 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de resistência à tração tipo I**  
Fonte: Norma ASTM-D638.

A Figura 14 apresenta alguns exemplos dos corpos de prova de resistência à tração, utilizados neste estudo.



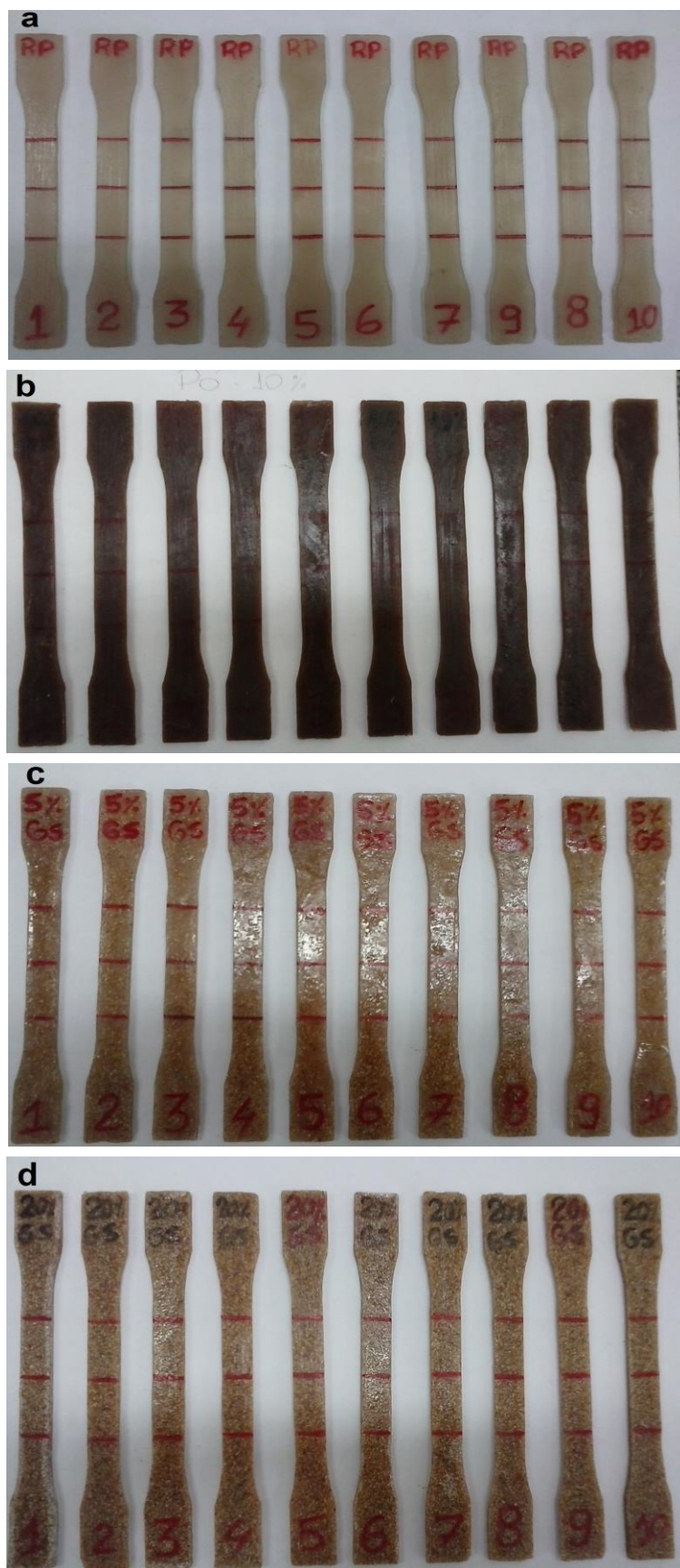


Figura 14 - Corpo de prova RP 0% (a) corpo de prova RP + PF 10% (b) corpo de prova RP + PM 5% (c) corpo de prova RP + PM 20% (d)  
Fonte: Autoria própria.

Os ensaios mecânicos de tração foram realizados na (ETEC – Escola Técnica Pedro D’Arcádia Neto) na cidade de Assis – SP, utilizando uma máquina de ensaios universal da marca TIME GROUP INC com célula de carga de 100 KN nas seguintes condições; velocidade do ensaio 1 mm/min e temperatura ambiente 25 °C.

Foram testadas 10 amostras para cada composição, utilizando uma média de no mínimo 5 resultados como requer a norma ASTM-D638. Segue a Figura 15, que mostra a máquina universal de ensaio de tração.



**Figura 15 - Máquina universal ensaio de tração Time Group Inc**  
Fonte: Autoria própria.

### 3.3.2 Ensaio de Flexão de Três Pontos

Os corpos de prova para os ensaios de flexão em três pontos foram produzidos conforme a norma ASTM-D790 em forma de barras retangulares, com comprimento total de 80 mm; largura 12,7 mm e a espessura de 3 mm.

A Figura 16 mostra as dimensões do corpo de prova utilizado nos ensaios de resistência à flexão.

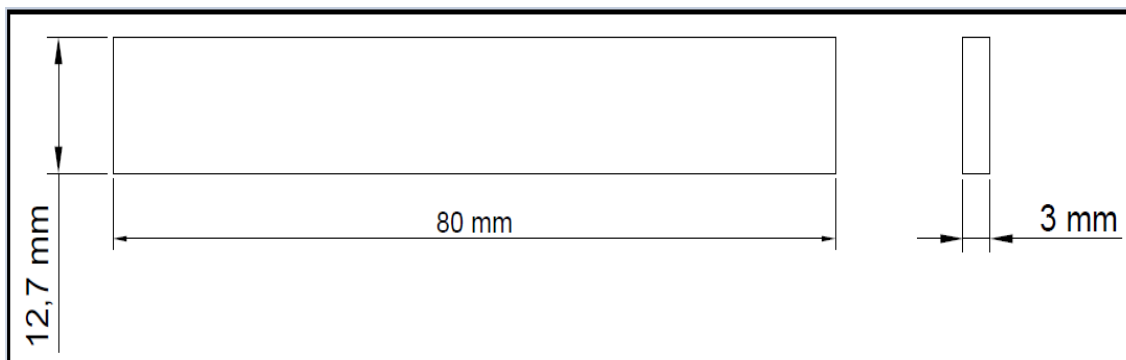


Figura 16 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de resistência à flexão de três pontos

Fonte: Norma ASTM-D790.

A Figura 17 apresenta alguns exemplos dos corpos de prova de resistência à flexão de três pontos, utilizados neste estudo.

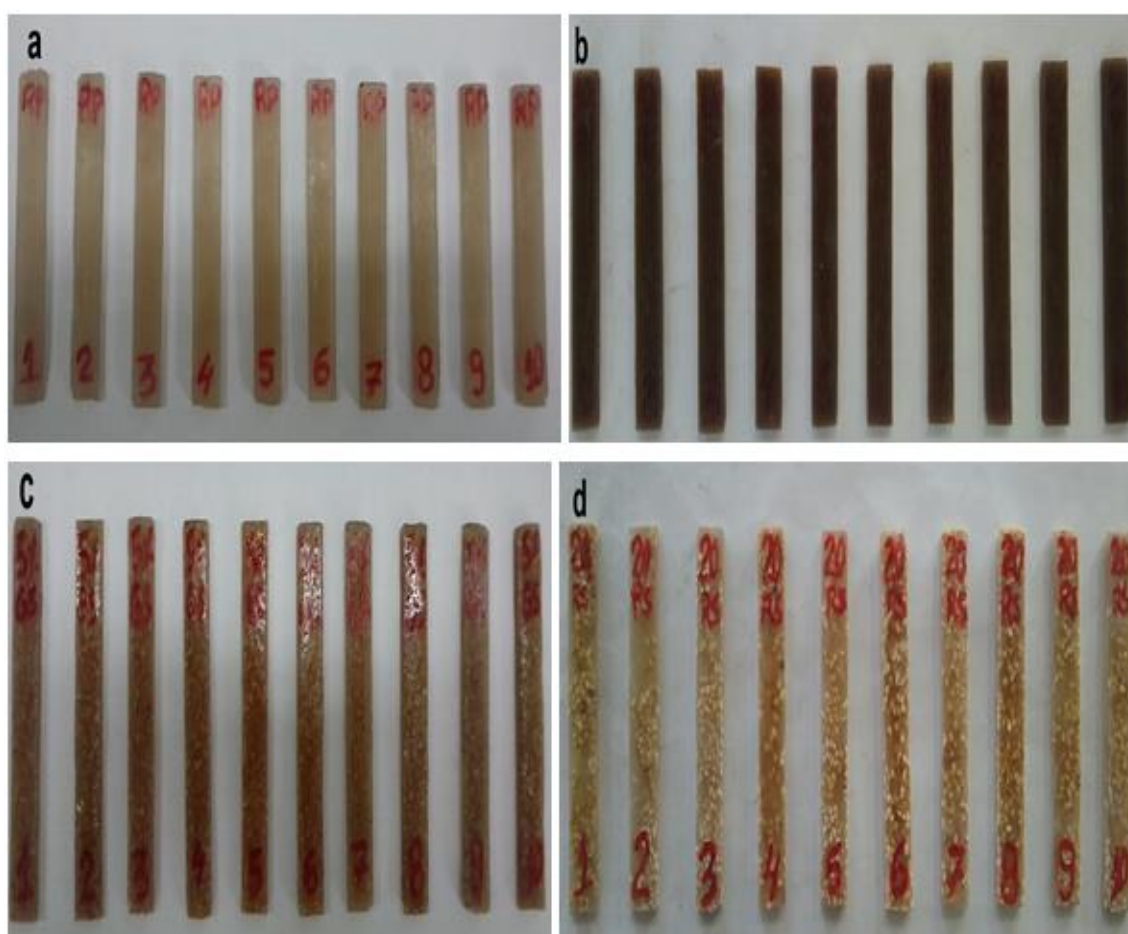


Figura 17 - Corpo de prova RP 0% (a) corpo de prova RP + PF 10% (b) corpo de prova RP + PM 5% (c) corpo de prova RP + PG 20% (d)

Fonte: Autoria própria.



Os ensaios mecânicos de flexão foram realizados na (Etec – Escola Técnica Pedro D’Arcádia Neto) na cidade de Assis – SP utilizando uma máquina de ensaios universal da marca TIME GROUP INC com célula de carga de 100 KN nas seguintes condições: distância entre apoios 50 mm; com velocidade de 2 mm/min e temperatura ambiente 25 °C.

Foram testadas 10 amostras para cada composição, utilizando uma média de no mínimo 5 resultados, conforme a norma ASTM-D790. Segue a Figura 18, que mostra a máquina universal de ensaio de flexão.



**Figura 18 - Máquina universal ensaio de flexão Time Group Inc**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 3.3.3 Ensaio de Impacto

Os corpos de prova com entalhe para o ensaio de impacto Izod foram produzidos conforme a norma ASTM-D256, com formatos de barras retangulares com comprimento de 63,5 mm, espessura; 12,7 mm; largura 10 mm; e 2,54 mm de entalhe.

A Figura 19 mostra as dimensões do corpo de prova utilizado nos ensaios de resistência ao impacto.

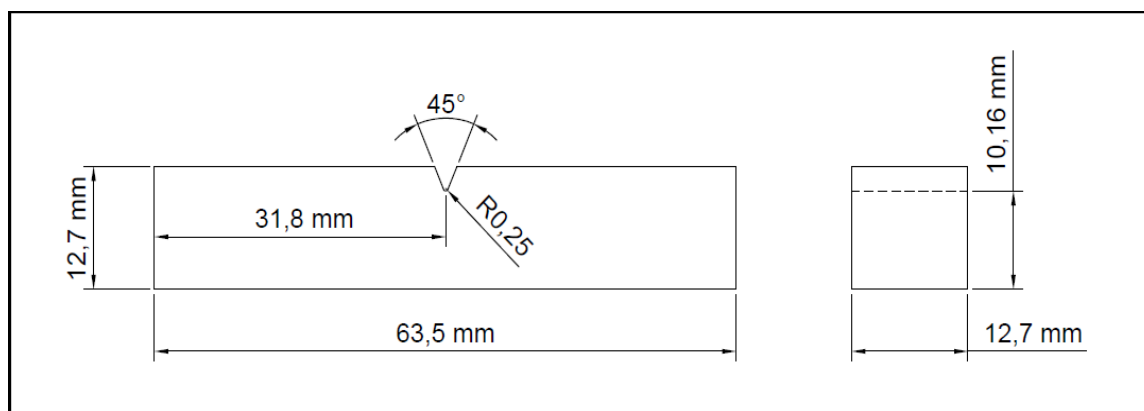


Figura 19 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de resistência ao impacto  
Fonte: Norma ASTM-D256.

A Figura 20 apresenta alguns exemplos dos corpos de prova de resistência ao impacto, utilizados neste estudo.

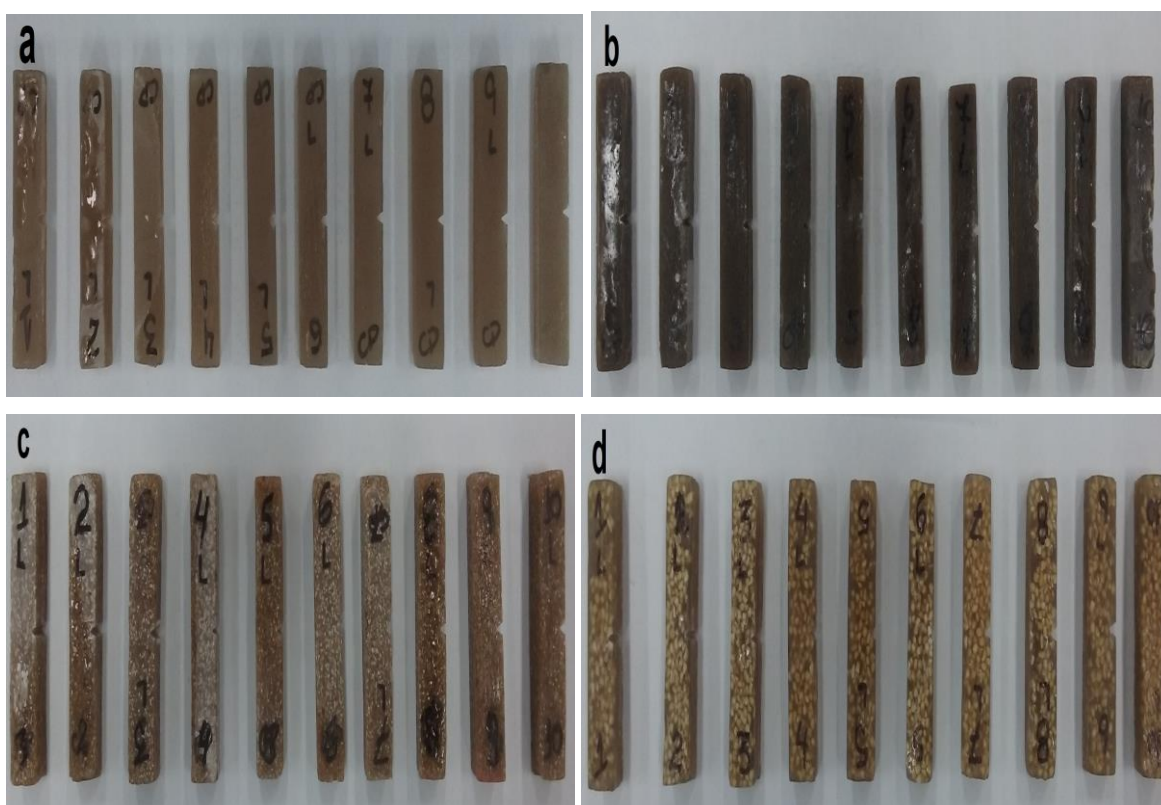


Figura 20 - Corpo de prova RP 0% (a) corpo de prova RP + PF 10%(b) corpo de prova RP + PM 5% (c) corpo de prova RP + PG 20% (d)  
Fonte: Autoria própria.

Os ensaios mecânicos de impacto Izod foram realizados, junto ao CCDM Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, com temperatura ambiente 23°C, utilizando uma máquina de impacto modelo Impactor, da Ceast, conforme mostra a Figura 21.

Foram testadas 10 amostras para cada composição, utilizando uma média de no mínimo 5 resultados, segundo a norma ASTM-D256.



**Figura 21 - Máquina de ensaio de impacto – modelo Impactor Ceast**

**Fonte: Autoria própria.**

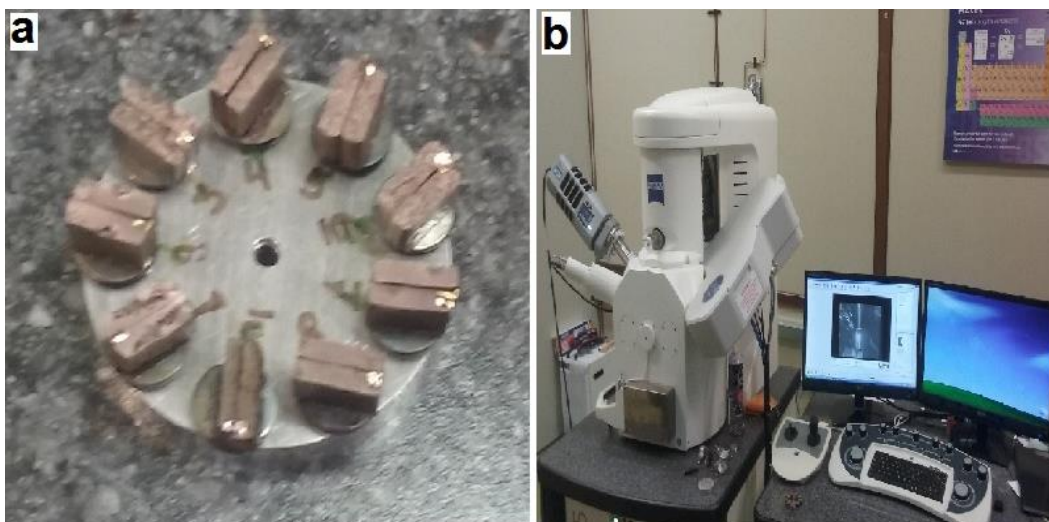
### 3.4 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

#### 3.4.1 Caracterização Morfológica dos Compósitos de Sabugo de Milho por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A interface reforço/matriz de distribuição e dispersão das variadas frações granulométricas do sabugo de milho triturado na matriz foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Este ensaio foi realizado junto ao CMCM Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR - Câmpus Curitiba.

As amostras foram fixadas em um suporte metálico com fita de carbono e em seguida metalizadas com ouro para a análise microscópica. O equipamento usado foi o microscópio eletrônico de varredura Carl Zeiss/EVO MA, como mostra a Figura 22.



**Figura 22 - Amostras presas no suporte (a) Microscópio eletrônico de varredura (b)**  
Fonte: Autoria própria.

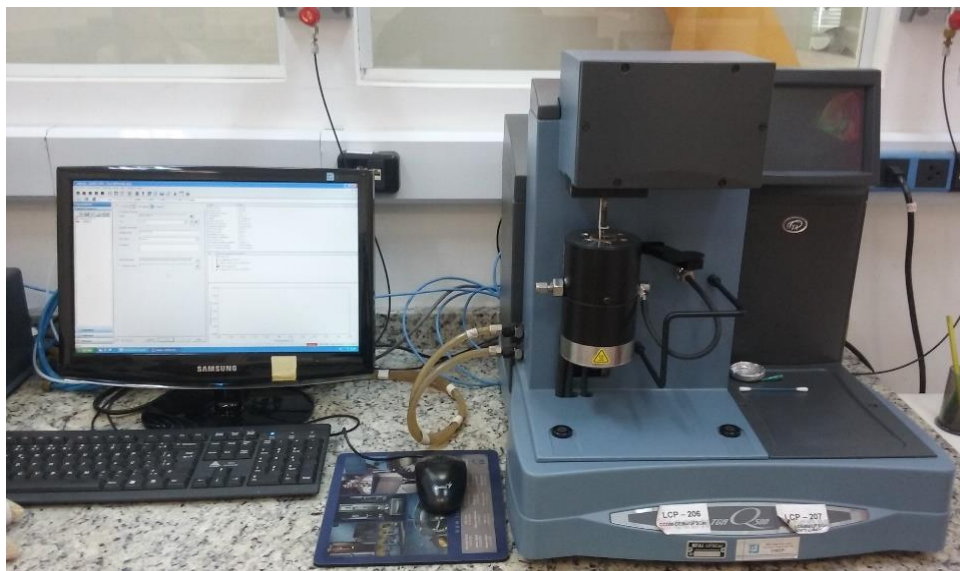
### 3.5 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA

#### 3.5.1 Caracterização Térmica dos Compósitos e da Matriz Polimérica por Termogravimetria (TGA)

A caracterização e o comportamento térmico de cada fase dos compósitos foram analisados por termogravimetria (TGA) e comparados ao comportamento da resina de poliéster, para a avaliação dos efeitos da presença do sabugo de milho na estabilidade térmica dos compósitos. Os ensaios foram realizados junto ao CCDM - Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, em um analisador térmico TGA Q500 (TA Instruments), como mostra a Figura 23.

Foram utilizadas amostras com a massa variando entre 4,3 e 7,6 mg, em suporte de amostra de alumina, sob atmosfera dinâmica de nitrogênio (N<sub>2</sub>), com

vazão de gás de 50 ml/min. As amostras foram aquecidas a partir da temperatura ambiente 23°C a 800°C e a razão de aquecimento de 10°C/min.

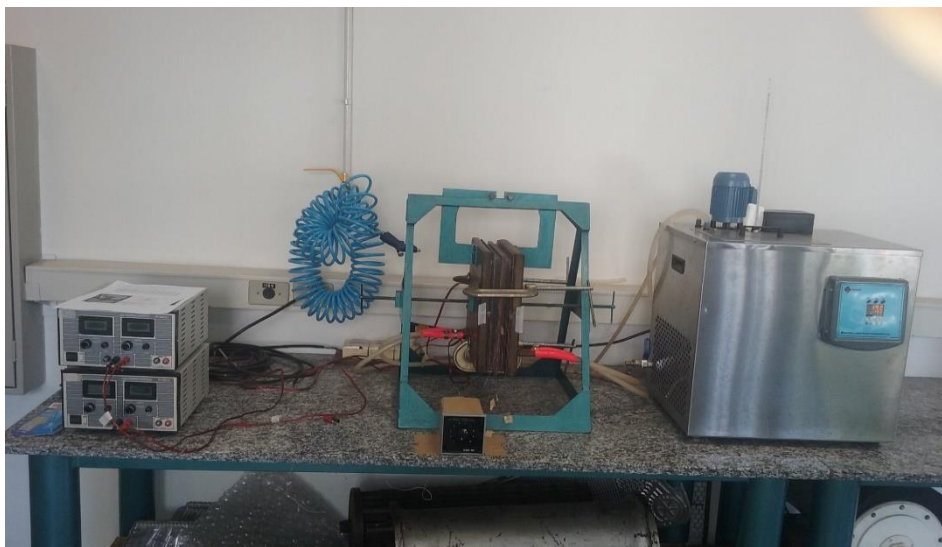


**Figura 23 - Analisador térmico TGA Q500 (TA Instruments)**  
Fonte: Autoria própria.

### 3.6 ANÁLISE TÉRMICA

Para o levantamento das propriedades térmicas dos compósitos, foi utilizado o método de dispositivo de placa quente compensada e um limite de temperatura de até 40°C, de acordo com as especificações do equipamento, conforme mostra a Figura 24, na qual o mesmo é embasado na norma ANSI/ASTM C 177-76.





**Figura 24 - Dispositivo de placa quente compensada**  
Fonte: Autoria própria.

Estas análises foram realizadas no laboratório de transferência de calor do DEM – Universidade Estadual Paulista – UNESP - Ilha Solteira.

O método se aplica para a medição, em regime permanente, da condutividade térmica de materiais sólidos. Nesse caso, o procedimento usual é colocar a amostra em forma de placa plana, entre uma placa quente e uma placa fria formando um “sanduíche”, ficando sujeita à diferença de temperatura ( $T_1 - T_2$ ).

Essas medidas foram realizadas por meio de termopares em condições nas quais o fluxo de calor que atravessa a amostra seja unidirecional. Em condições de regime permanente a condutividade térmica é calculada pela medição do fluxo de calor e do gradiente médio de temperatura ao longo da amostra. O fluxo de calor através da amostra é obtido a partir da energia gerada para manter constante a temperatura da placa quente. O calor gerado provém da dissipação de energia elétrica em uma resistência embutida na placa quente.

No respectivo trabalho foi usado o método em regime permanente, no qual a condutividade térmica da resina de poliéster e dos compósitos é determinada a partir de simulações experimentais, conforme a Equação 10.

$$K = qx'' * L/A * \Delta T \quad (10)$$

Onde:

$K$  = Condutividade térmica de material (W/mK);

$q_x$  = fluxo de calor;

$\Delta T$  = Diferença de temperatura entre as faces quente e fria da amostra (K);

$L$  = espessura da amostra (m).

Os corpos de prova utilizados para o ensaio de condutividade térmica foram produzidos conforme a norma ANSI/ASTM C 177-76, com as seguintes medidas; 300 x 300 x 15 mm. Foram produzidas amostras de resina pura (RP), resina pura com 5 % de partícula fina (RP + 5% PF), resina pura com 10% de partícula fina (RP + 10% PF), resina pura com 5% de partícula média (RP + 5% PM) e resina pura com 20% de partícula grande (RP + 20% PG), conforme apresenta a Figura 25.

Os corpos de prova aqui analisados, foram os que mais se aproximaram dos valores de tensão máxima, comparados ao corpo de prova da resina pura, exceto o compósito de resina pura com 20% de partícula grande (RP + 20% PG) o mesmo foi escolhido devido ao fato das partículas serem porosas.



**Figura 25 - Corpos de prova de ensaios térmicos**

**Fonte: Autoria própria.**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização de todos os experimentos, são apresentados e discutidos os resultados das propriedades mecânicas e térmicas de um material compósito, empregando como reforço o sabugo de milho triturado em três granulometrias diferentes, partícula fina (PF) com 44  $\mu\text{m}$ , partícula média (PM) com 850  $\mu\text{m}$  e partícula grande (PG) com 2360  $\mu\text{m}$ .

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados das propriedades mecânicas, através dos ensaios de tração, flexão e impacto, de um material compósito de matriz polimérica, empregando como reforço o sabugo de milho triturado em três granulometrias diferentes, partícula fina (PF) com 44  $\mu\text{m}$ , partícula média (PM) com 850  $\mu\text{m}$  e partícula grande (PG) com 2360  $\mu\text{m}$ .

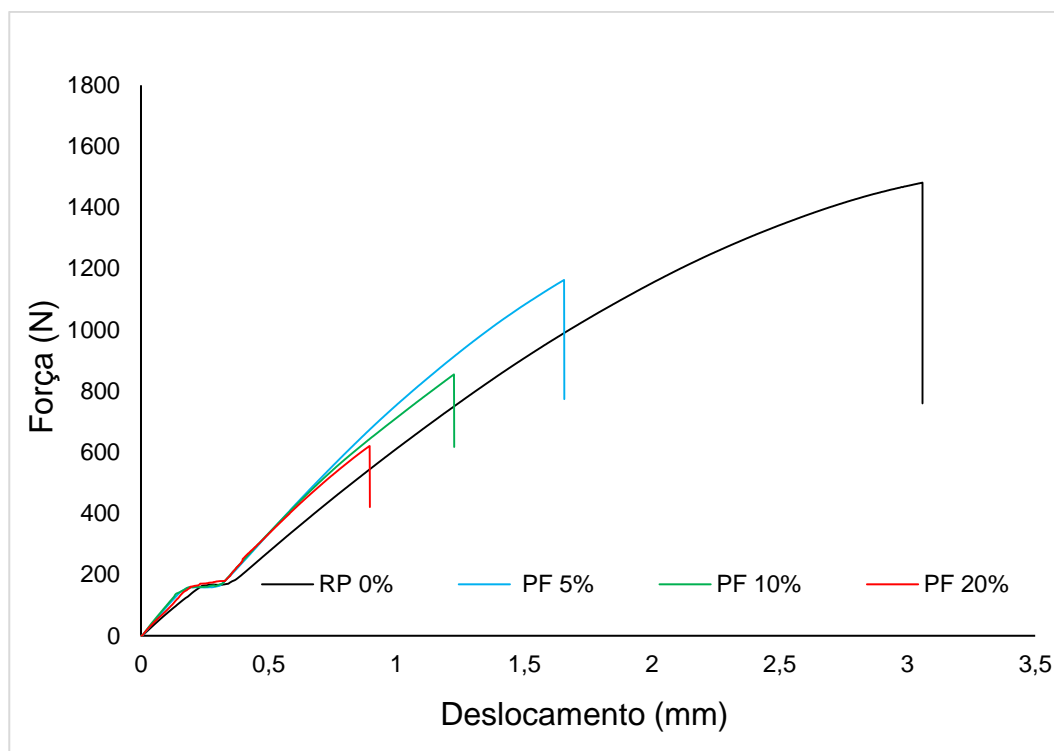
#### 4.1.1 Ensaios de Tração

Neste tópico são apresentados, a tensão máxima, o módulo de elasticidade e a deformação dos compósitos reforçados com as partículas, os mesmos, foram determinados por ensaio de tração nos corpos de prova confeccionados e testados segundo a norma ASTM-D638.

Na Figura 26 estão ilustradas as curvas típicas de força *versus* deslocamento dos ensaios. As curvas representativas são ilustradas para 0%, 5%, 10% e 20% da fração de volume da PF do sabugo de milho.

A aparência comum é que todas as curvas dos compósitos apresentam pouca ou nenhuma deformação plástica. A ruptura inesperada indica que a RP e os compósitos com as PF, são materiais relativamente frágeis.





**Figura 26 - Curvas típicas do ensaio de tração, força vs deslocamento da RP 0% + 5%, 10%, 20% PF de volume do sabugo de milho**  
**Fonte: Autoria própria.**

A partir das curvas convencional de força *versus* deslocamento, calculou-se a tensão máxima convencional, a deformação máxima e o módulo de elasticidade. A Tabela 4 apresenta os valores médios para essas propriedades de tração para 0%, 5%, 10% e 20% dos volumes dos particulados (fibras) do sabugo de milho.

**Tabela 4 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de tração em função do percentual de partículas finas nos compósitos**

Volume de fibra de sabugo de milho (%)	Tensão máxima convencional (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (%)
RP 0%	37,00±2,46	1,48±0,21	2,50±0,33
PF5%	27,96±2,61	2,06±0,16	1,35±0,26
PF 10%	21,85±0,90	2,12±0,05	1,02±0,02
PF 20%	15,65±1,60	2,19±0,25	0,71±0,11

**Fonte: Autoria própria.**

Os dados da Tabela 4 mostram que os comportamentos mecânicos, como a tensão máxima e a deformação na ruptura das amostras com a adição de 5%, 10% e 20% de fração em volume das partículas, comparadas à amostra de RP, decrescem com o aumento do percentual de reforço. A amostra de resina com 5% de PF, comparada à amostra com 0%, obteve uma redução de 24,4% na tensão máxima, e uma redução de 46% na deformação do compósito; a amostra de resina com 10% de PF obteve um decréscimo de 40,95% na tensão máxima e a deformação do compósito foi de 59,2%, para a amostra de resina com 20% de PF a redução na tensão máxima chegou a 57,71%, e a redução da deformação deste compósito foi de 71,6% comparada a resina pura. As quedas das propriedades mecânicas, certamente se relacionam com as porcentagens e características granulométricas das partículas agregadas na matriz polimérica.

Ramos (2013), avaliou, através do ensaio de tração, o comportamento mecânico como resistência à tração, o alongamento na ruptura e o módulo de elasticidade dos compósitos de polipropileno e sabugo de milho (PP/SM) com diferentes teores de partículas (cargas), e observou que há uma tendência da redução na tensão máxima e no alongamento, ou seja, quanto maior o teor de partículas (carga) na composição, menor é o desempenho do compósito em resposta à tensão normal aplicada no ensaio.

Oliveira (2015), avaliou as características mecânicas através do ensaio de tração de compósitos fabricados a partir da resina tereftálica (escura) com adição de resíduo do sabugo de milho nas proporções 20% (PF, PM, PG), e os comparou com a resina pura. O resultado da resina pura apresentou resistência à tração de 24,2 MPa e os compósitos com 20% PF, PM, PG de resíduo do sabugo de milho apresentaram os respectivos valores de resistência à tração: 3,25 MPa, 2,94 MPa e 2,80 MPa, mostrando que a porcentagem e a granulometria das partículas (carga) também influenciam nas propriedades mecânicas no caso, a resistência à tração é inferior à da resina pura.

Conforme os resultados de Costa et al., (2012), a resina de poliéster ortoftálica pura apresentou resistência à tração de 37,87 ( $\pm$  2,24) MPa e os compósitos de poliéster 15,5 % de pó de açaí e poliéster 25 % de pó de açaí apresentaram os respectivos valores de resistência à tração, 18,27 ( $\pm$  0,49) e 18,87 ( $\pm$  1,21) MPa, mostrando que o aumento no volume de fibras de açaí foi indiferente em relação à resistência, mas se comparado o resultado da resina pura com os

compósitos, observou-se que ocorreu uma redução da resistência à tração de 50,2%, similar ao encontrado neste trabalho.

Da mesma maneira, Gehlen (2014), que analisou através de ensaios mecânicos de tração, compósitos de matriz poliéster insaturada ortoftálica reforçados com fibras lignocelulósicas (açai e curauá) e os comparou com compósitos reforçados com fibra de vidro, o mesmo relata que a resistência à tração de materiais compósitos constituídos por reforços fibrosos depende de alguns fatores, tais como resistência mecânica, orientação, teor e comprimento das fibras, além da estabilidade química da matriz e da interface fibra-matriz.

Por outro lado, o módulo de elasticidade (rigidez) aumenta quando comparado à resina pura. Isto se dá devido ao aumento das proporções de partículas distribuídas ao longo da área transversal do corpo de prova, ou seja, uma maior fração da área transversal é constituída de partículas de sabugo de milho, reduzindo assim a resistência efetiva e aumentando o módulo de elasticidade do compósito.

Conforme Ramos (2013), mostra em seus estudos que o aumento da rigidez e a redução de flexibilidade do compósito estão relacionados às partículas de sabugo de milho, pois elas agem no polímero como um agente nucleante na matriz polimérica, aumentando assim o grau de cristalinidade da mesma; isto foi observado nas análises de calorimetria exploratória diferencial (DSC).

Segundo Gehlen (2014), a deformação na ruptura em compósitos de matriz polimérica reforçadas com fibras lignocelulósicas diminui com a adição das fibras *in natura*, e isso se deve ao fato de as fibras possuírem menor deformação e maior rigidez do que a matriz polimérica.

Neste estudo a amostra com 20% de PF apresentou maior módulo de elasticidade e menor resistência à tração em relação às demais amostras, devido ao aumento do percentual de partículas no compósito, este comportamento é atribuído aos defeitos como bolhas e vazios analisados nos ensaios por MEV, contribuindo negativamente para o desempenho do compósito.

Já a amostra com 5% de PF, comparada às outras amostras (10%, 20%), obteve um melhor comportamento mecânico; isto nos leva a entender que este compósito teve uma mistura mais homogênea, por ter um menor percentual de partículas (carga) agregado à matriz.

A composição de melhor resultado em relação à tensão máxima comparada à resina pura foi a amostra com 5% de PF do volume de fibra.

A Figura 27 apresenta as variações da tensão máxima à tração, o módulo de elasticidade e a deformação, apresentados na Tabela 4 para amostras, RP 0%, 5%, 10% e 20% de PF.

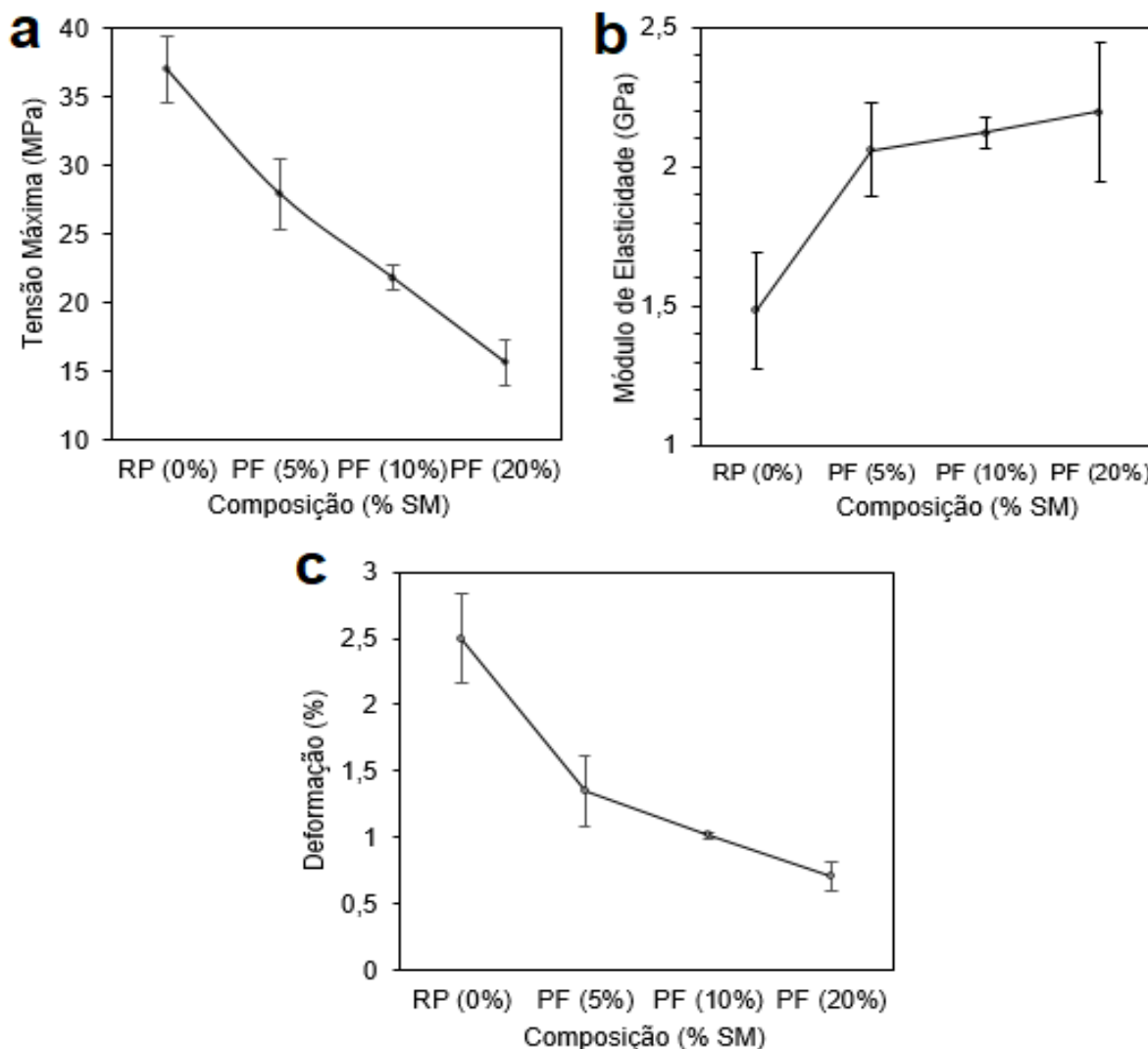
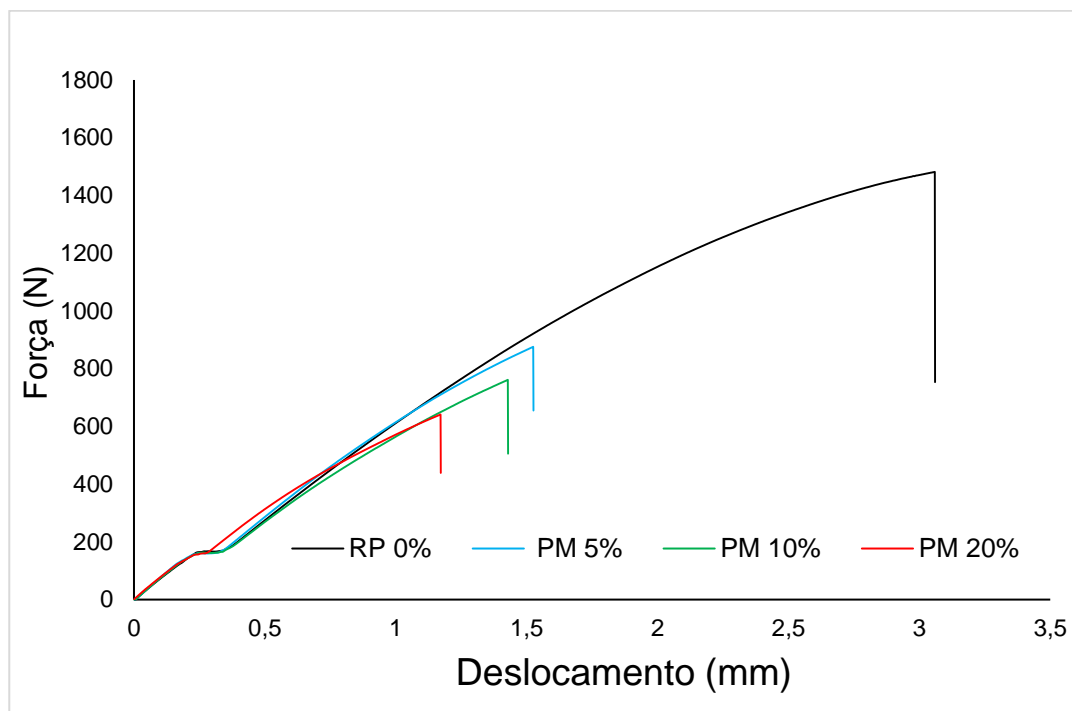


Figura 27 – Valores das propriedades mecânicas, tensão máxima (a), módulo de elasticidade (b) deformação (c) para as composições das amostras RP 0% + 5%, 10%, 20% PF do sabugo de milho

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 28 estão ilustradas as curvas típicas de força *versus* deslocamento para os compósitos com partícula média (PM). As curvas representativas são ilustradas para 0%, 5%, 10% e 20% da fração de volume da PM do sabugo de milho. A aparência comum é que todas as curvas dos compósitos

apresentam pouca ou nenhuma deformação plástica. A ruptura inesperada indica que os compósitos de farelo de sabugo de milho são materiais relativamente frágeis.



**Figura 28 - Curvas típicas do ensaio de tração, força vs deslocamento das amostras RP 0% + 5%, 10%, 20% PM de volume do sabugo de milho**  
**Fonte: Autoria própria.**

A partir das curvas de força *versus* deslocamento, calculou-se a tensão máxima convencional, a deformação máxima convencional e o módulo de elasticidade. A Tabela 5 apresenta os valores médios para essas propriedades de tração para 0%, 5%, 10% e 20% dos volumes das fibras do sabugo de milho.

**Tabela 5 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de tração em função do percentual de partículas médias nos compósitos**

Volume de fibra de sabugo de milho (%)	Tensão máxima convencional (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima convencional (%)
RP 0%	37,00±2,46	1,48±0,21	2,50±0,33
PM 5%	21,28±1,57	2,21±0,07	0,96±0,06
PM 10%	19,00±1,32	2,49±0,14	0,76±0,08
PM 20%	13,20±1,05	2,78±0,02	0,47±0,07

**Fonte: Autoria própria.**

A tensão máxima e o alongamento na ruptura são propriedades que dependem extremamente da adesão entre as fases matriz polimérica/reforço, ou seja, a boa interação entre essas fases resultará positivamente ou negativamente no desempenho do compósito.

Os dados da Tabela 5 nos mostram que as propriedades das amostras com a incorporação de 5%, 10% e 20% de PM, comparadas com a resina pura, sofrem uma redução expressiva da tensão máxima e da deformação do compósito. Esta performance ineficaz está relacionada com a fraca adesão reforço/matriz, observada na análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

De acordo com Barbosa (2011), possíveis acúmulos de tensão, dificuldade de adesão ou umidade excessiva também podem influenciar as propriedades mecânicas do compósito.

Como observado por Barbosa (2011), um dos inconvenientes na utilização de fibras lignocelulósicas, em matriz poliéster é sua natureza hidrofílica, devido à água absorvida na superfície da fibra. Assim, as matrizes poliéster apresentam caráter hidrofóbico, formando uma fraca interação fibra/matriz.

De acordo com Figueiredo (2013), o módulo de elasticidade (rigidez) aumenta quando comparado à resina pura, esse aumento acontece devido à incorporação de partículas rígidas em uma matriz dúctil.

Segundo Brambilla (2013), o aumento do módulo de elasticidade no compósito, está relacionado com a influência da fibra de restringir a mobilidade molecular e proporcionar uma maior rigidez e, com isso, interferir nas propriedades mecânicas de resistência à tração.

O mesmo foi observado por Candido (2014), que analisou as propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. Ao serem adicionadas as frações em volume de fibra houve um aumento nos valores médios do módulo de elasticidade, e a redução na deformação destes compósitos; isto se dá devido à fraca interação reforço/matriz, observada na análise via MEV.

A amostra com 20% de PM, continua a apresentar maior módulo de elasticidade em relação às demais amostras. Já a amostra com 5% de PM, comparada às amostras 10% e 20% PM, teve também um melhor comportamento mecânico.

Este resultado pode ser explicado pelo fato de uma menor percentagem na mistura permitindo, assim, uma melhor distribuição do reforço, reduzindo as irregularidades do material.

A Figura 29 apresenta as variações da tensão máxima à tração, o módulo de elasticidade e deformação, apresentados na Tabela 5 para amostras de RP, com 5%, 10% e 20% PM.

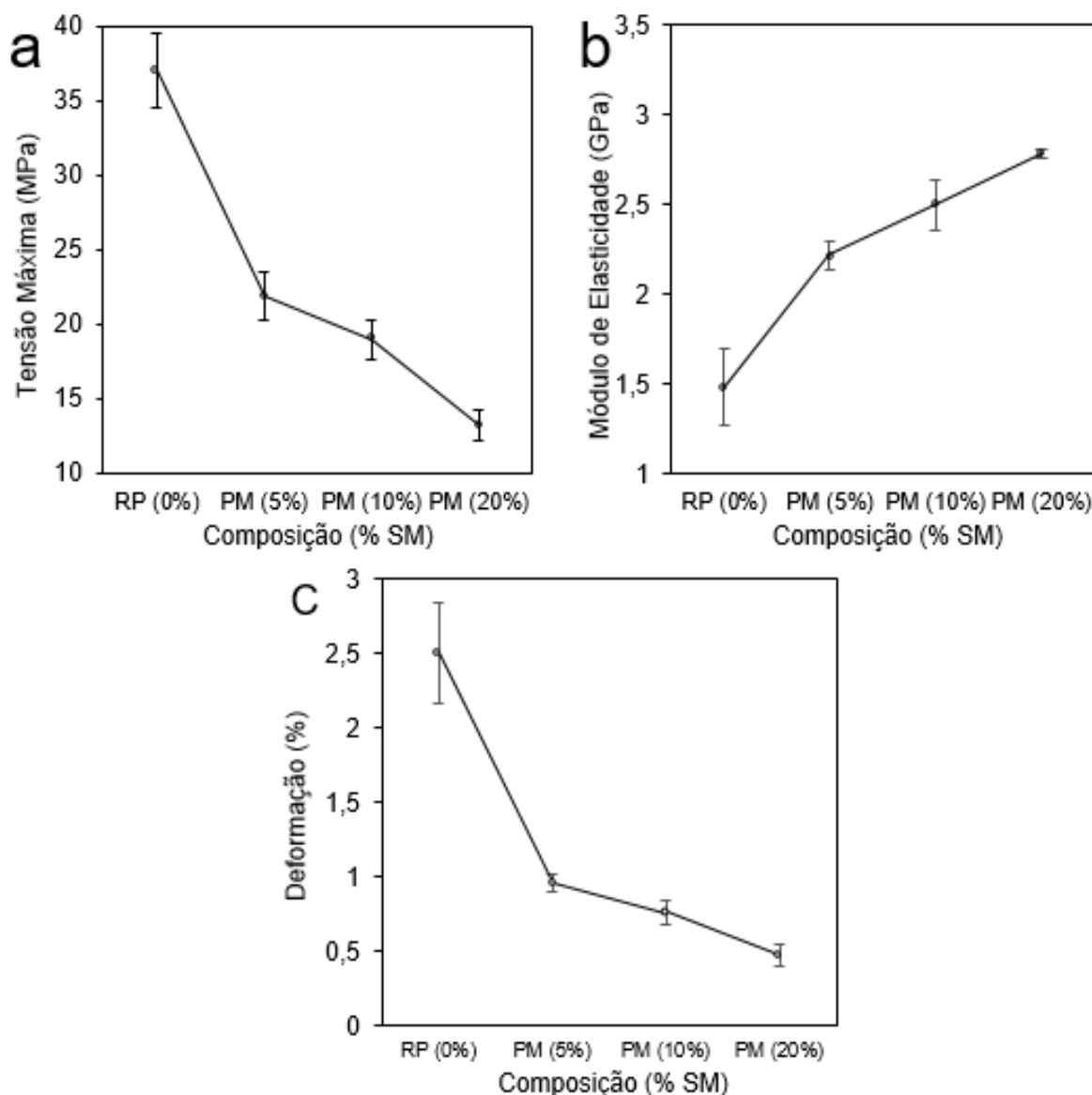
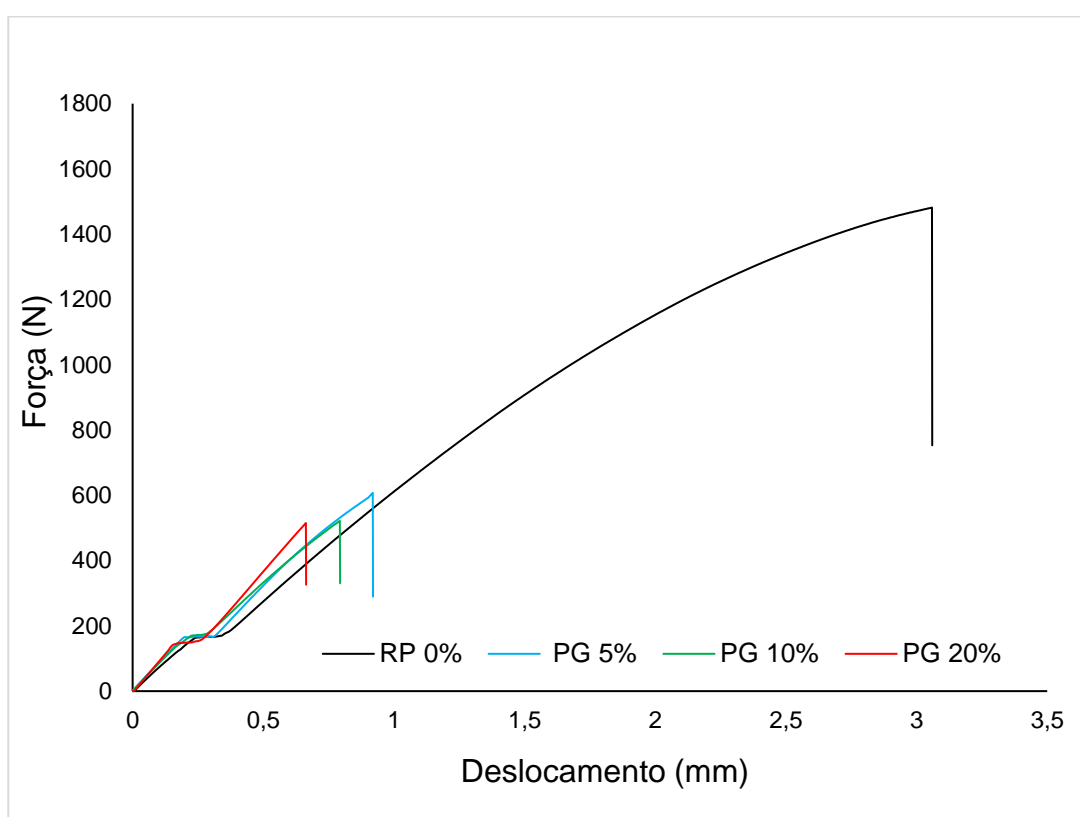


Figura 29 – Valores das propriedades mecânicas, tensão máxima (a), módulo de elasticidade (b) deformação (c) para as composições de RP 0% + 5%, 10%, 20% PM do sabugo de milho

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 30 estão ilustradas as curvas típicas de força *versus* deslocamento para o ensaio dos compósitos com partícula grande (PG). As curvas representativas são ilustradas para 0%, 5%, 10% e 20% da fração de volume da PG do sabugo de milho. A aparência comum é que todas as curvas dos compósitos apresentam pouca ou nenhuma deformação plástica. A ruptura inesperada indica que os compósitos de farelo de sabugo de milho são materiais relativamente frágeis.



**Figura 30 - Curvas típicas de tração, força vs deslocamento da RP 0% + 5%, 10%, 20% PG do volume de sabugo de milho**

Fonte: Autoria própria.

A partir das curvas de força *versus* deslocamento, calculou-se a tensão máxima convencional, a deformação máxima convencional e o módulo de elasticidade. A Tabela 6 apresenta os valores médios para essas propriedades de tração para 0%, 5%, 10% e 20% dos volumes dos particulados (fibras) do sabugo de milho.



**Tabela 6 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de tração em função do percentual de partículas grandes nos compósitos**

Volume de fibra de sabugo de milho (%)	Tensão máxima convencional (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima convencional (%)
RP 0%	37,00±2,46	1,48±0,21	2,50±0,33
PG 5%	13,29±0,63	2,25±0,07	0,60±0,01
PG 10%	12,42±0,79	2,54±0,23	0,50±0,05
PG 20%	11,50±1,03	2,84±0,33	0,40±0,05

**Fonte: Autoria própria.**

Os dados da Tabela 6 mostram que a tensão máxima e a deformação dos compósitos com a adição de 5%, 10% e 20% de PG comparadas a RP, continua a sofrer redução.

Este desempenho ineficaz pode estar relacionado com à fraca adesão entre matriz/fibra, ocorrendo o arrancamento (*pull-out*) das fibras na matriz; isto foi observado nas análises por MEV.

De acordo com Callister (2015), é essencial que as forças de ligação adesivas entre a fibra e a matriz sejam grandes, para minimizar o arrancamento das fibras. De fato, a resistência da ligação é uma consideração importante na seleção da combinação matriz/fibra. A resistência do compósito depende em grande parte da boa eficiência dessa ligação.

Candido (2014), afirma que, de maneira geral, os valores relativamente baixos de resistência à tração e à flexão dos compósitos podem estar associados à resistência relativamente baixa das fibras e à baixa adesão entre as fibras e a matriz, devido à molhabilidade ineficiente.

Para que haja um reforço efetivo, é necessário que a carga aplicada seja transferida da matriz para as fibras; logo, é desejável a existência de uma interface que favoreça uma boa aderência dos materiais (VERMA et al., 2012).

A amostra com 20% de PG, continua a apresentar maior módulo de elasticidade e menor tensão de resistência à tração em relação às demais fibras de sabugo de milho.

Já na amostra com 5% de PG, comparada às amostras com 10% e 20%, observou-se um melhor comportamento mecânico.

A Figura 31 apresenta as variações da tensão máxima à tração, módulo de elasticidade e a deformação, apresentados na Tabela 6 para amostras de RP, com 5%, 10% e 20% PG.

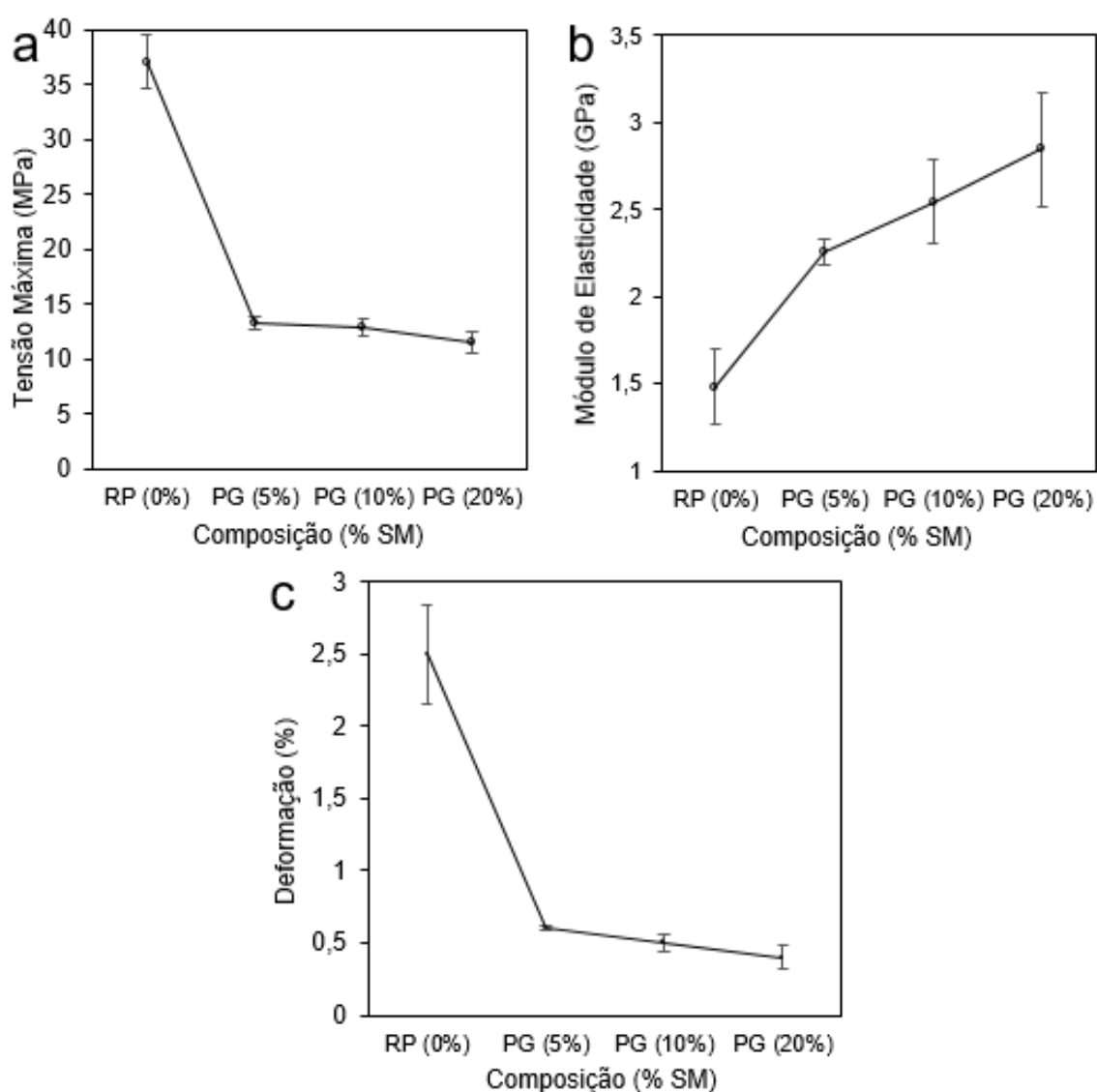
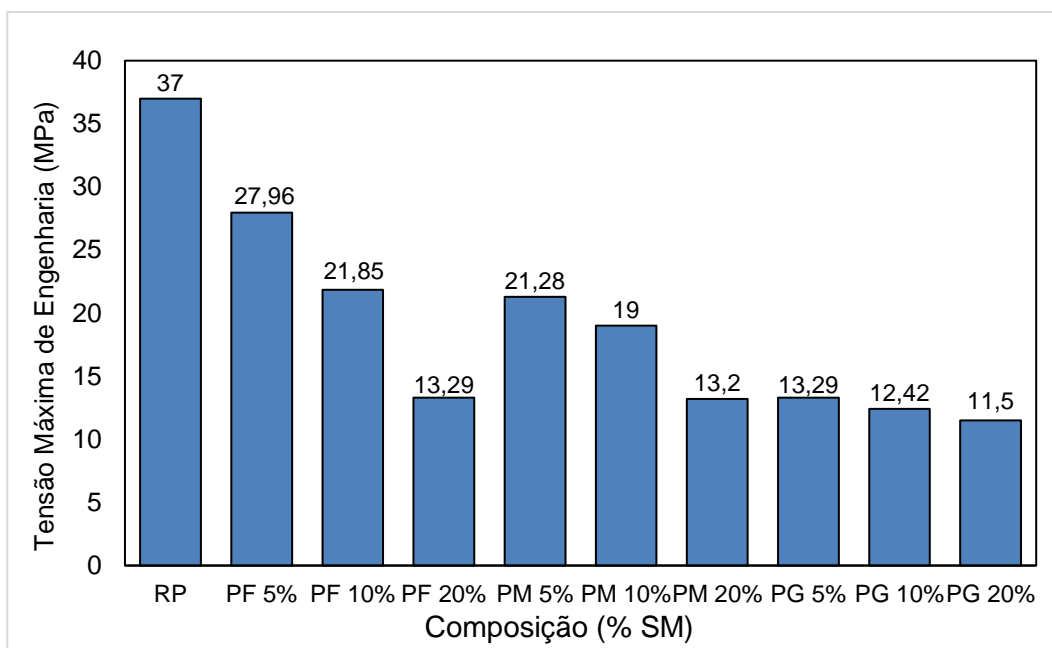


Figura 31 - Valores das propriedades mecânicas, tensão máxima (a) módulo de elasticidade (b) deformação (c) para as composições de RP 0% + 5%, 10%, 20% PG do sabugo de milho

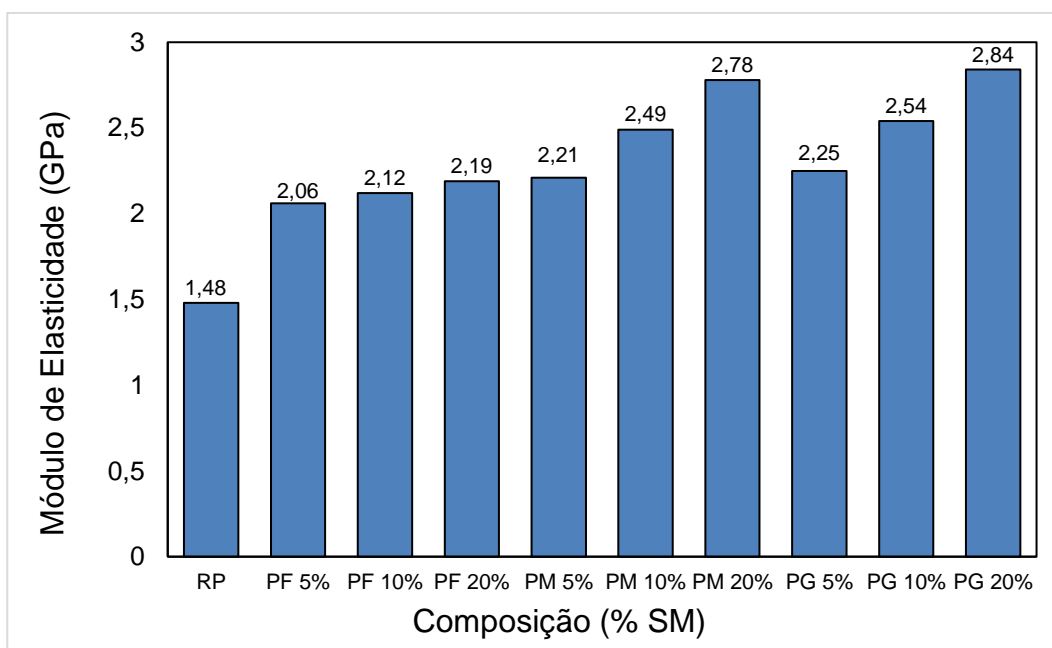
Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 32, 33 e 34, são comparadas as propriedades mecânicas de tração obtidas no ensaio mecânico, como tensão máxima de engenharia, módulo de elasticidade e deformação máxima de engenharia para todos os compósitos.



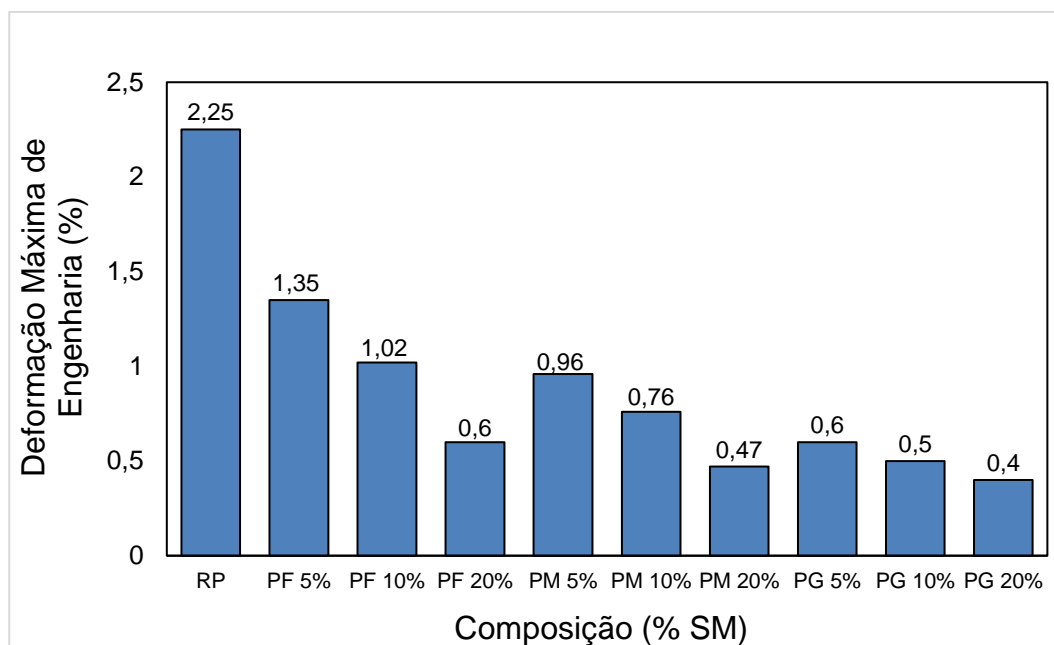
**Figura 32 – Valores da propriedade mecânica, tensão máxima de engenharia para todos os compósitos**

Fonte: Autoria própria.



**Figura 33 – Valores da propriedade mecânica, módulo de elasticidade para todos os compósitos**

Fonte: Autoria própria.



**Figura 34 – Valores da propriedade mecânica, deformação máxima de engenharia para todos os compósitos**

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 7 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de tração em função do percentual dos particulados nos compósitos**

Volume de Fibra de Sabugo de Milho (%)	Tensão Máxima de Engenharia (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação Máxima de Engenharia (%)
RP 0%	37,00±2,46	1,48±0,21	2,50±0,33
PF5%	27,96±2,61	2,06±0,16	1,35±0,26
PF 10%	21,85±0,90	2,12±0,05	1,02±0,02
PF 20%	15,65±1,60	2,19±0,25	0,71±0,11
PM 5%	21,28±1,57	2,21±0,07	0,96±0,06
PM 10%	19,00±1,32	2,49±0,14	0,76±0,08
PM 20%	13,20±1,05	2,78±0,02	0,47±0,07
PG 5%	13,29±0,63	2,25±0,07	0,60±0,01
PG 10%	12,42±0,79	2,54±0,23	0,50±0,05
PG 20%	11,50±1,03	2,84±0,33	0,40±0,05

Fonte: Autoria própria.

Os dados da Tabela 7 apresentam os resultados da tensão máxima, o módulo de elasticidade e a deformação de todos os compósitos estudados neste trabalho.

Constatou-se que a tensão máxima (resistência á tração) dos compósitos é mais baixa do que na resina pura (RP), verificando-se que nesse caso as partículas (fibras) não apresentaram comportamento de reforço; as mesmas agiram como material de enchimento (carga), não proporcionando melhorias nas propriedades mecânicas dos compósitos.

No entanto, os compósitos que apresentaram melhores resultados de tensão máxima foram os compósitos com 5%, 10% de PF e 5% de PM.

Os compósitos com 20% do volume de todas as fibras (PF, PM, PG), apresentaram resultados não satisfatórios de tensão máxima. Conforme o resultado pode-se observar que aumentando o volume das fibras nas composições e a granulometria das partículas, a resistência máxima decresce contribuindo negativamente para o desempenho do compósito.

Segundo Ribeiro e Fujiyama (2014), esta diminuição da resistência é compatível com a literatura, pois reforços particulados inseridos em matrizes poliméricas, podem atuar como pontos concentradores de tensão, nucleando trincas e reduzindo assim a resistência.

Hillig et al. (2011), trabalhando com Polietileno de alta densidade (HDPE) reforçado com 20% (m/m) de fibras de madeira, alega que a resistência à tração de seus compósitos reduziu em 23% em relação à matriz sem reforço.

Os compósitos obtêm a redução na resistência máxima e na deformação, com o aumento do percentual de partículas de sabugo de milho; isso atribui ao compósito maior rigidez e menor flexibilidade, como mostram os resultados do módulo de elasticidade do compósito.

O compósito que apresentam o menor módulo de elasticidade entre todas as composições são os compósitos com 5% do volume de todas as fibras.

Observou-se que, entre as partículas, as que mostram melhores resultados são as (PF) partículas finas. Já os compósitos com maior módulo de elasticidade entre todas as composições são os compósitos com 20% do volume de todas as fibras.

Entre as partículas utilizadas no estudo, as que apresentaram resultados negativos foram as (PG) partículas grandes.

O mesmo foi observado por Oliveira (2015), que apresenta em seus estudos, um decréscimo da resistência à tração, deformação e o aumento do módulo de elasticidade. Esse comportamento se dá à medida que se aumenta a granulometria das partículas.

Segundo Oliveira (2015), essas constatações estão associadas a uma mistura mais homogênea do compósito para a (PF) de menor granulometria, fazendo com que esse compósito tenha um melhor comportamento mecânico.

Conforme os dados da Tabela 7, pode ser observado que há uma tendência na redução da tensão de tração, e na deformação para as amostras com as mesmas partículas (PF, PM, PG), aumentando a percentagem do volume das partículas no caso 5%, 10%, 20% no compósito. Na medida em que se aumenta o percentual de reforço (carga) no compósito, eleva-se diretamente a proporção de partículas distribuídas ao longo da área transversal, ou seja, uma maior fração da área transversal é constituída por partículas de sabugo de milho, reduzindo a resistência efetiva do compósito.

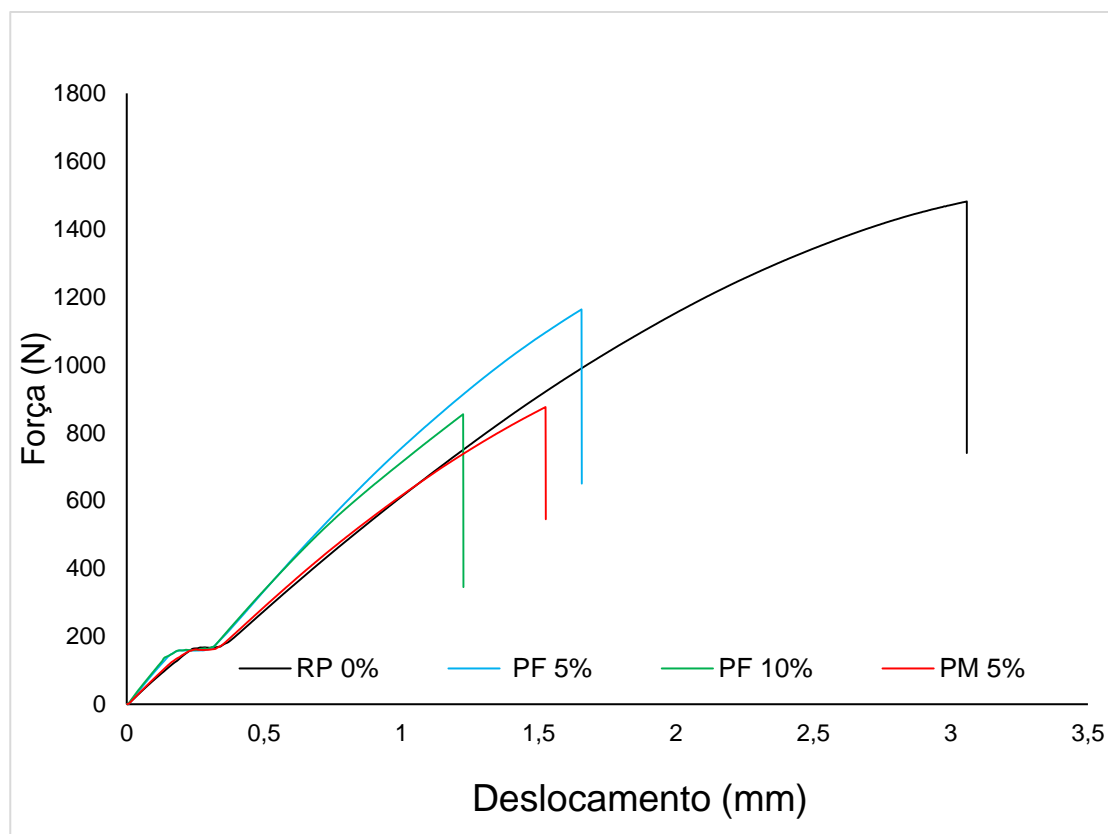
Como já citado neste trabalho Ramos (2013), mostra em seus estudos que a redução da resistência efetiva do compósito está relacionada com as partículas de sabugo de milho, pois elas agem no polímero como um agente nucleante na matriz polimérica, aumentando assim o grau de cristalinidade da mesma. Isto foi observado nas análises de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), realizadas por Ramos (2013).

Conforme observado até aqui, a Tabela 7 mostra a redução dos valores da tensão máxima e deformação de todos os compósitos; no entanto, a Figura 35 mostra o comportamento das curvas típicas de força *versus* deslocamento, curvas essas escolhidas para as composições em que os valores das propriedades mecânicas de resistência à tração mais se aproximaram da (RP) resina pura, no caso os compósitos com 5%, 10% de PF e 5% de PM.

Na Figura 35 observou-se que o teor de material particulado (carga) inserido na composição influencia no desempenho do compósito em resposta à força aplicada no ensaio.

De acordo com Rosa (2007), a tensão máxima do compósito polipropileno com casca de arroz (PP/CA) diminui com o aumento do teor do material particulado (carga).

Aumentando a proporção de reforço (carga), aumenta a área interfacial entre a matriz hidrofóbica e o reforço hidrofílico, produzindo um aumento da fragilidade, o que resulta na redução da tensão máxima suportada pelo compósito.



**Figura 35 - Curvas típicas de tração, força vs deslocamento da RP 0% + 5% PF, RP 0% + 10% PF, RP 0% + 5% PM do volume de sabugo de milho**  
Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados da Força de tração vs curvas de deslocamento, tais como os mostrados na Figura 35, o módulo de elasticidade e a tensão total foram avaliados. A Tabela 8 apresenta o valor médio dessas propriedades de tração para a fração de volume distinta incorporados nos compósitos de resina de poliéster.

**Tabela 8 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de tração em função do percentual de partículas finas nos compósitos**

Volume de fibra de sabugo de milho (%)	Tensão máxima convencional (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima convencional (%)
RP 0%	37,00±2,46	1,48±0,21	2,50±0,33
PF 5%	27,96±2,61	2,06±0,16	1,35±0,26
PF 10%	21,85±0,90	2,12±0,05	1,02±0,02
PM 5%	21,28±1,57	2,21±0,07	0,96±0,06

**Fonte: Autoria própria.**

Os dados da Tabela 8 mostram que a tensão máxima e a deformação, decrescem com a incorporação das diferentes porcentagens do reforço no compósito.

É visível o aumento da rigidez quando comparada à resina pura, e o compósito com 5% de partícula média (PM) neste caso apresenta um maior módulo de elasticidade em relação as demais fibras de sabugo de milho.

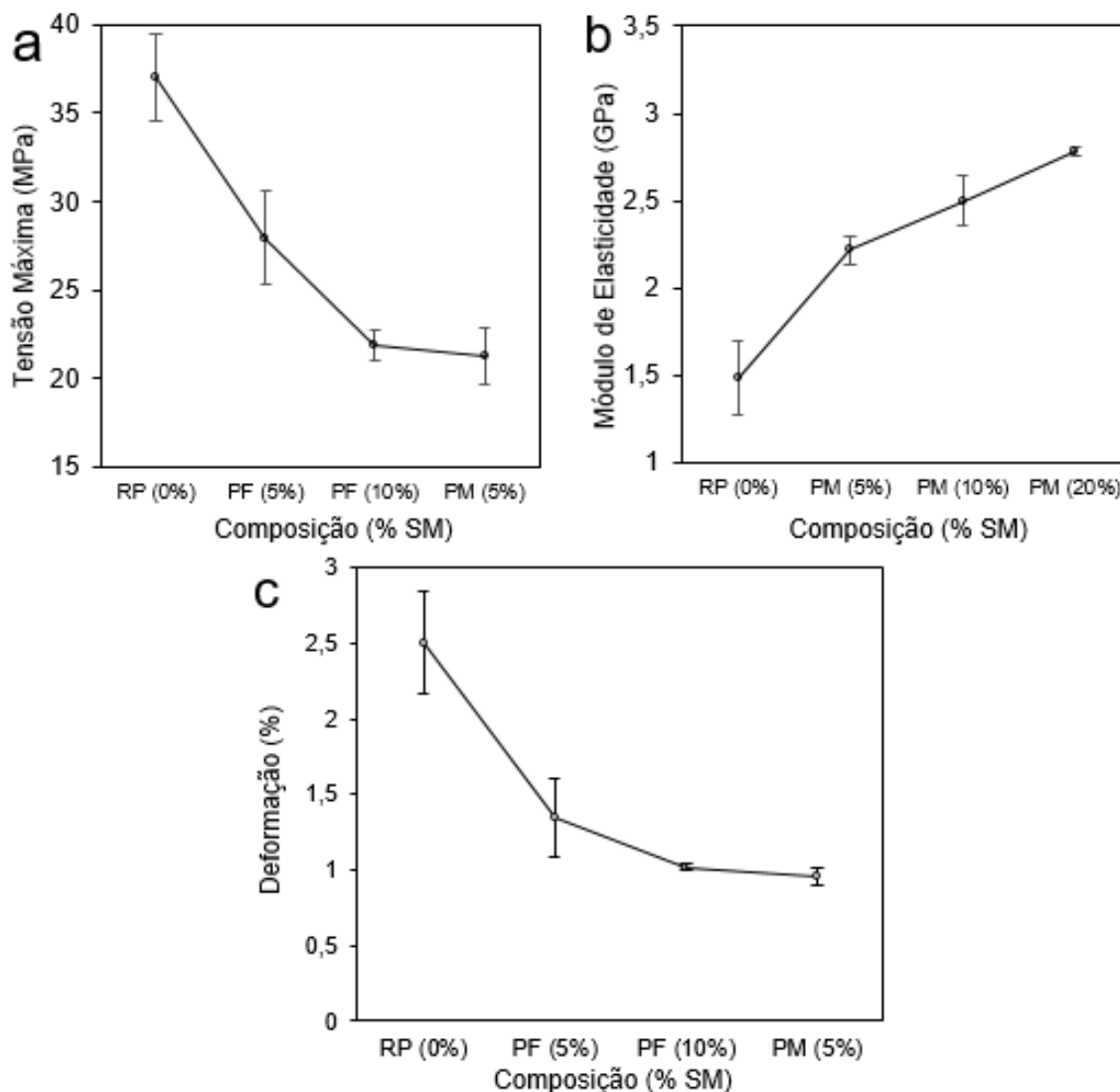
Sendo que a partícula média apresenta uma granulometria de 850 µm, e a partícula fina (PF) apresenta uma granulometria de 44 µm.

Segundo Ramos (2013), a deformação na ruptura com o aumento do teor de material particulado (carga) é uma consequência pois o mesmo está distribuído aleatoriamente, dificultando a mobilidade das cadeias, impossibilitando seu alongamento no sentido da sollicitação mecânica, fazendo com que as cadeias atinjam o máximo de estiramento em direções aleatórias e antecipando a ruptura em níveis de deformações mais baixas.

Estes resultados mostram que o sabugo de milho adicionado à resina de poliéster servirá como material de enchimento no sentido de reduzir a quantidade da resina de poliéster utilizada, e deve ser utilizada em aplicações em que a quantidade adicionada no caso 5% de PF, não comprometa o seu desempenho mecânico. Por outro lado, a adição da PF do sabugo de milho acarretará numa redução do uso e do acúmulo da resina de poliéster no meio ambiente.

A Figura 36 apresenta as variações da tensão máxima à tração, o módulo de elasticidade e a deformação, apresentados na Tabela 8 para amostras de RP (resina pura), as amostras com 5%, 10% de PF (partícula fina) e a amostra com 5% de PM (partícula média) do sabugo de milho.





**Figura 36** – Valores das propriedades mecânicas, (a) tensão máxima, (b) módulo de elasticidade (c) deformação para as composições de RP 0% + 5% PF, RP 0% + 10% PF, RP 0% + 5% PM do sabugo de milho  
 Fonte: Autoria própria.

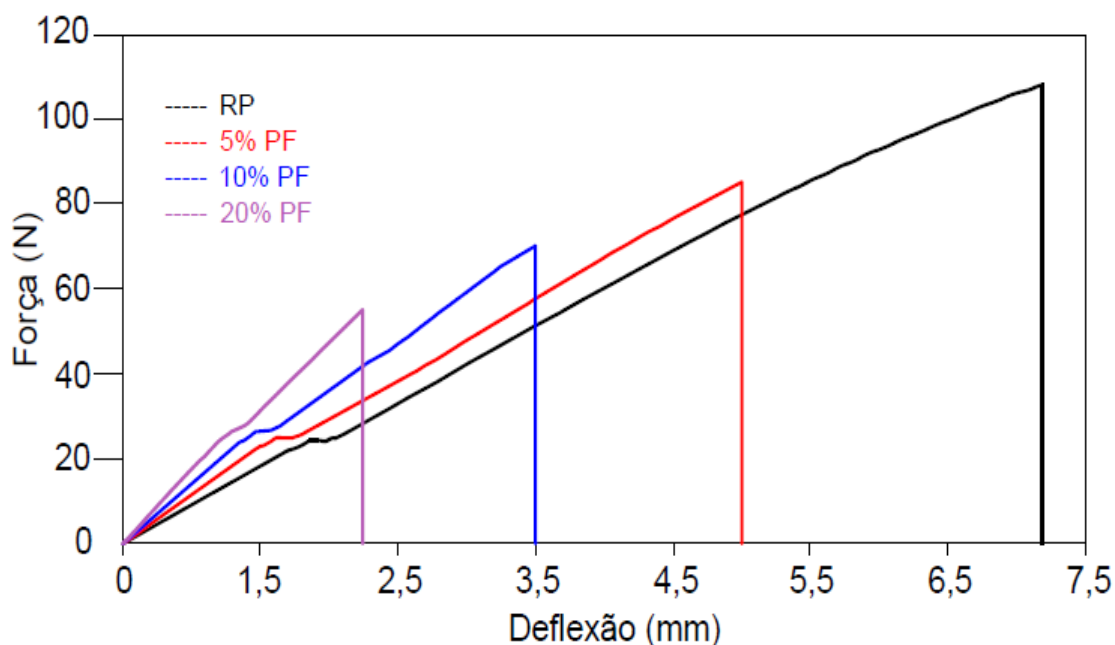
É possível notar, a partir da Figura 36 acima, que a adição das partículas do sabugo de milho, conforme já explicado, aumenta o módulo de elasticidade do compósito e causa o decréscimo na resistência e na deformação do compósito.

Conforme já citado, estes resultados mostram que o sabugo de milho adicionado à resina de poliéster servirá como material de enchimento no sentido de reduzir a quantidade da resina de poliéster utilizada, e deve ser utilizado em aplicações em que a quantidade adicionada, no caso 5% de PF, não comprometa o seu desempenho mecânico.

#### 4.1.2 Ensaios de Flexão de Três Pontos

Neste tópico, são apresentados e discutidos os valores da tensão de flexão, módulo de flexão e deflexão dos compósitos, os mesmos foram determinados através do ensaio de flexão dos corpos de prova confeccionados e testados segundo a norma ASTM-D790.

O comportamento mecânico dos corpos de prova de resina pura, com 5%, 10% e 20% de PF do sabugo de milho, sob o ensaio de flexão de três pontos, estão ilustrados através das curvas de força vs deslocamento na Figura 37.



**Figura 37 - Curvas típicas do ensaio de flexão, força vs deslocamento da RP 0% + 5%, 10%, 20% PF de volume do sabugo de milho**  
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 37 observou-se que a curva de flexão da resina pura é linear, correspondendo ao regime elástico até a ruptura, caracterizando um comportamento frágil, ou seja, comportamento com nenhuma deformação até se romper. O mesmo acontece com as curvas de flexão dos compósitos aqui analisados, que também apresentaram características frágeis. Isto significa que ao se atingir o ponto de máxima resistência, a ruptura é súbita, com imediata queda de praticamente toda a carga aplicada.

As curvas indicam que os comportamentos mecânicos dos compósitos em flexão são afetados com a incorporação do sabugo de milho.

A partir das curvas ilustradas na Figura 37, calculou-se a tensão máxima de engenharia à flexão e o módulo de elasticidade. A Tabela 9 apresenta os valores médios para essas propriedades de flexão para 0%, 5%, 10% e 20% de volume de partículas finas do sabugo de milho.

**Tabela 9 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de flexão em função do percentual de partículas finas nos compósitos**

Volume de fibra de sabugo de milho (%)	Tensão de flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deflexão (mm)
RP 0%	75,25±5,74	1,40±0,19	7,44±0,74
PF 5%	59,00±1,75	1,64±0,07	5,00±0,50
PF 10%	48,60±2,84	1,92±0,26	3,50±0,17
PF 20%	37,50±4,74	2,31±0,33	2,25±0,11

**Fonte: Autoria própria.**

Com os dados da Tabela 9 foi possível observar que as propriedades mecânicas como tensão de flexão e deflexão dos compósitos são inferiores se comparadas às da resina pura.

A amostra de resina com 5% de PF, comparada à amostra com 0%, obteve uma redução de 21,6% na tensão de flexão, e uma redução de 32,8% na deflexão do compósito. A amostra de resina com 10% de PF obteve um decréscimo de 35,42% na tensão de flexão e a deflexão do compósito foi de 52,96%. Para a amostra de resina com 20% de PF a redução na tensão de flexão chegou a 50,17%, e a redução da deflexão deste compósito foi de 69,76% comparada à resina pura.

Esta redução das propriedades mecânicas certamente se relaciona com as porcentagens e o perfil granulométrico das partículas inseridas na matriz polimérica.

Da mesma maneira Gehlen (2014), encontrou nos compósitos resina de poliéster/fibra de açaí (RA), resina de poliéster/fibras de açaí e curauá (RAC), que possuem valores de resistência inferiores a resina de poliéster (R).

Gehlen (2014), observou os fatos através dos ensaios de flexão, valores de resistência à flexão da resina de poliéster (R) 40,00 MPa e nos compósitos resina de poliéster/fibra de açaí (RA) 15,00 MPa, para o compósito resina de poliéster/fibras de açaí e curauá (RAC) 33 MPa. Conforme Gehlen (2014) esses valores decrescem comparados aos da resina pura devido à incorporação de fibras curtas.

Nos ensaios de flexão realizados neste trabalho é visível o aumento do módulo de elasticidade de todos os compósitos quando comparados à resina pura.

Também é observado que ocorre um aumento gradativo da rigidez, à medida que se aumenta o teor de carga do sabugo de milho na resina, o mesmo comportamento foi apresentado nos ensaios de tração.

Neste caso, o compósito que apresentou um maior módulo de elasticidade em relação aos demais, é o compósito com 20% de partícula fina.

A Figura 38 apresenta as variações da tensão de flexão, o módulo de flexão (módulo de elasticidade) e a deflexão, apresentados na Tabela 9 para amostras de resina pura (RP), e as amostras, com 5%, 10% e 20% partícula fina (PF).

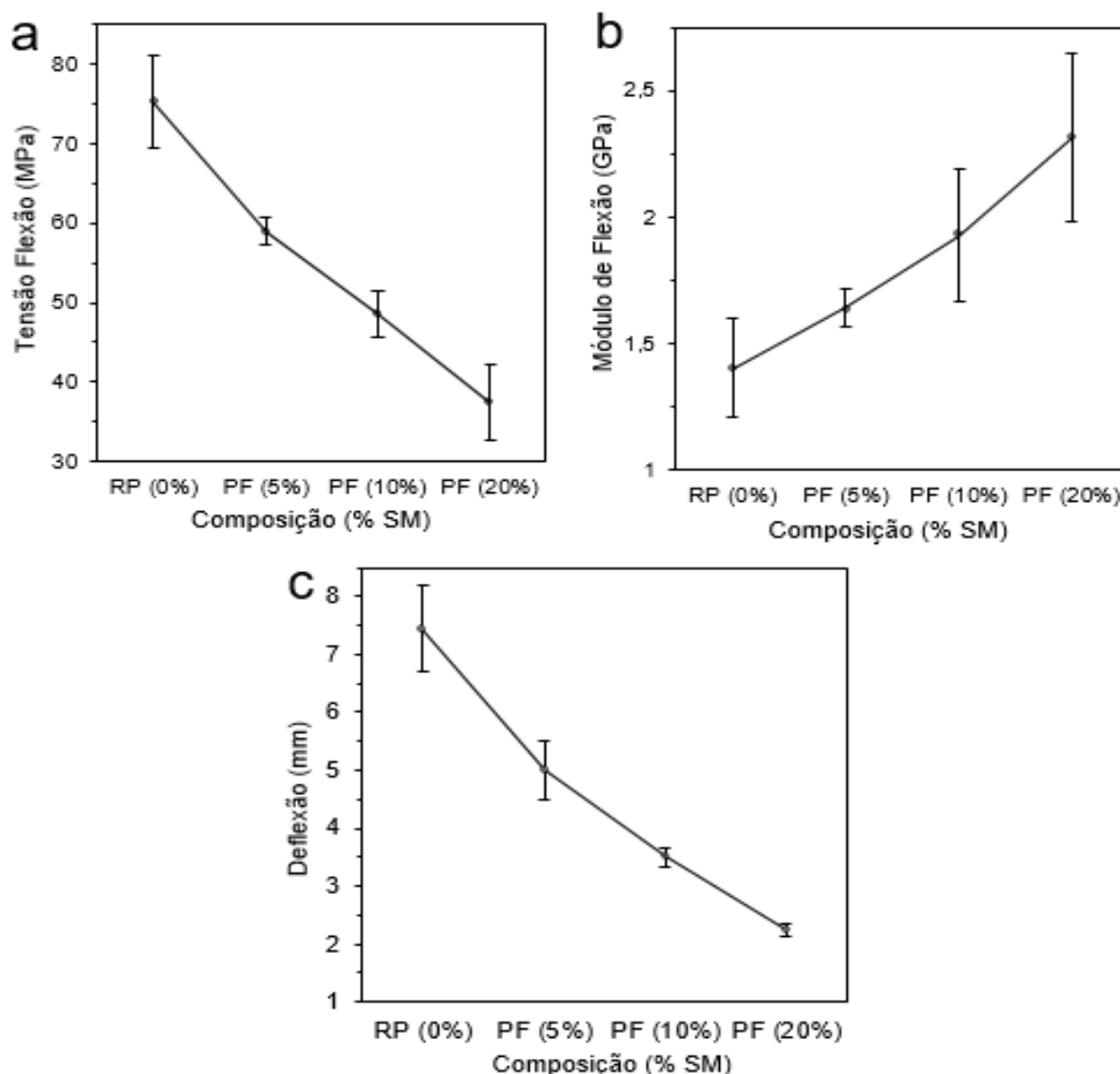


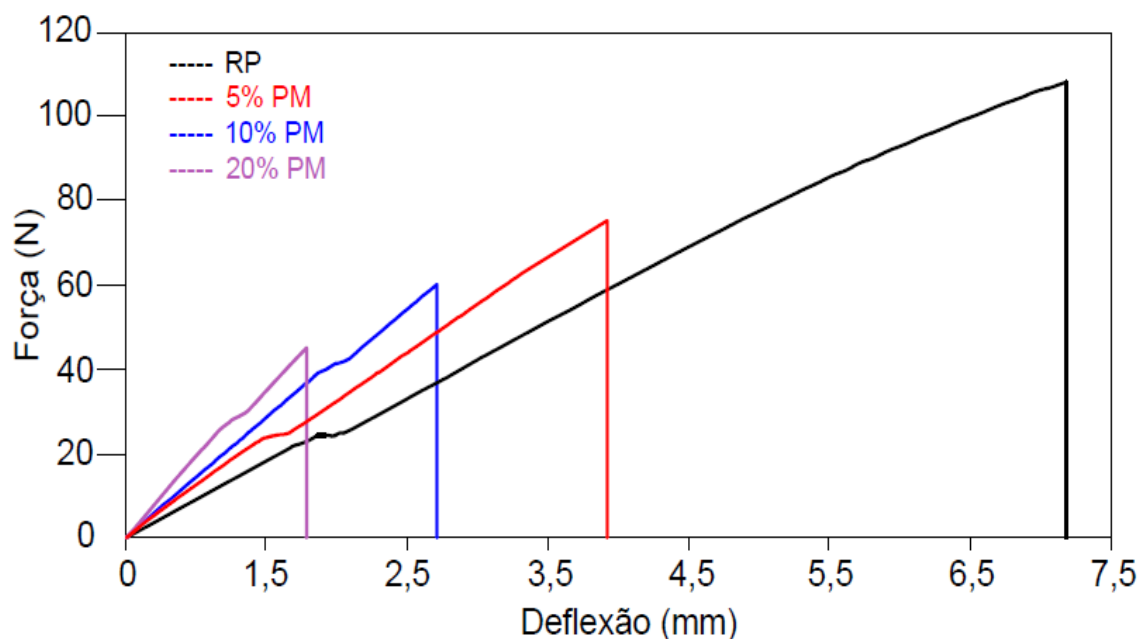
Figura 38 – Valores das propriedades mecânicas, (a) tensão máxima, (b) módulo de flexão (c) deflexão para as composições de RP 0% + 5%, 10%, 20% PF do sabugo de milho

Fonte: Autoria própria.

Os valores das propriedades mecânicas apresentadas na Figura 38, confirmam a tendência observada nos ensaios de tração; quanto maior o teor das partículas inseridas na resina, maior o módulo de elasticidade e menores as propriedades de resistência à flexão (tensão de flexão) e deflexão.

Esse fato é confirmado através do compósito com 20% de PF, tendo um módulo de elasticidade de 41,15% maior que o compósito com 5% de PF e 64,76% maior que o da resina pura. Isto se dá devido à fraca interação partícula/matriz e aos vazios identificados nas análises de MEV, nos compósitos com 20% de partícula fina.

Na Figura 39 estão ilustradas as curvas típicas de força *versus* deslocamento (deflexão) das amostras de RP, as amostras com 5%, 10% e 20% de partícula média (PM), através do ensaio de flexão de três pontos.



**Figura 39 - Curvas típicas do ensaio de flexão, força vs deslocamento da RP 0% + 5%, 10%, 20% PM de volume do sabugo de milho**

**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 39 acima, observa-se que todas as curvas dos compósitos apresentaram pouca ou nenhuma deformação plástica. A ruptura inesperada indica que os compósitos com partículas médias (PM) são materiais com comportamentos frágeis. Isto significa que ao se atingir o ponto de máxima resistência, a ruptura é súbita, com imediata queda de toda a carga aplicada.

A partir das curvas ilustradas na Figura 39, calculou-se a tensão máxima à flexão e o módulo de elasticidade. A Tabela 10 apresenta os valores médios para essas propriedades de flexão para RP e os compósitos com 5%, 10% e 20% de PM.

**Tabela 10 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de flexão em função do percentual de partículas médias nos compósitos**

Volume de fibra de sabugo de milho (%)	Tensão de flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deflexão (mm)
RP 0%	75,25±5,74	1,40±0,19	7,44±0,74
PM 5%	51,75±2,66	1,84±0,21	3,90±0,34
PM 10%	41,66±2,93	2,18±0,50	2,65±0,37
PM 20%	31,25±4,32	2,41±0,37	1,80±0,53

Fonte: Autoria própria.

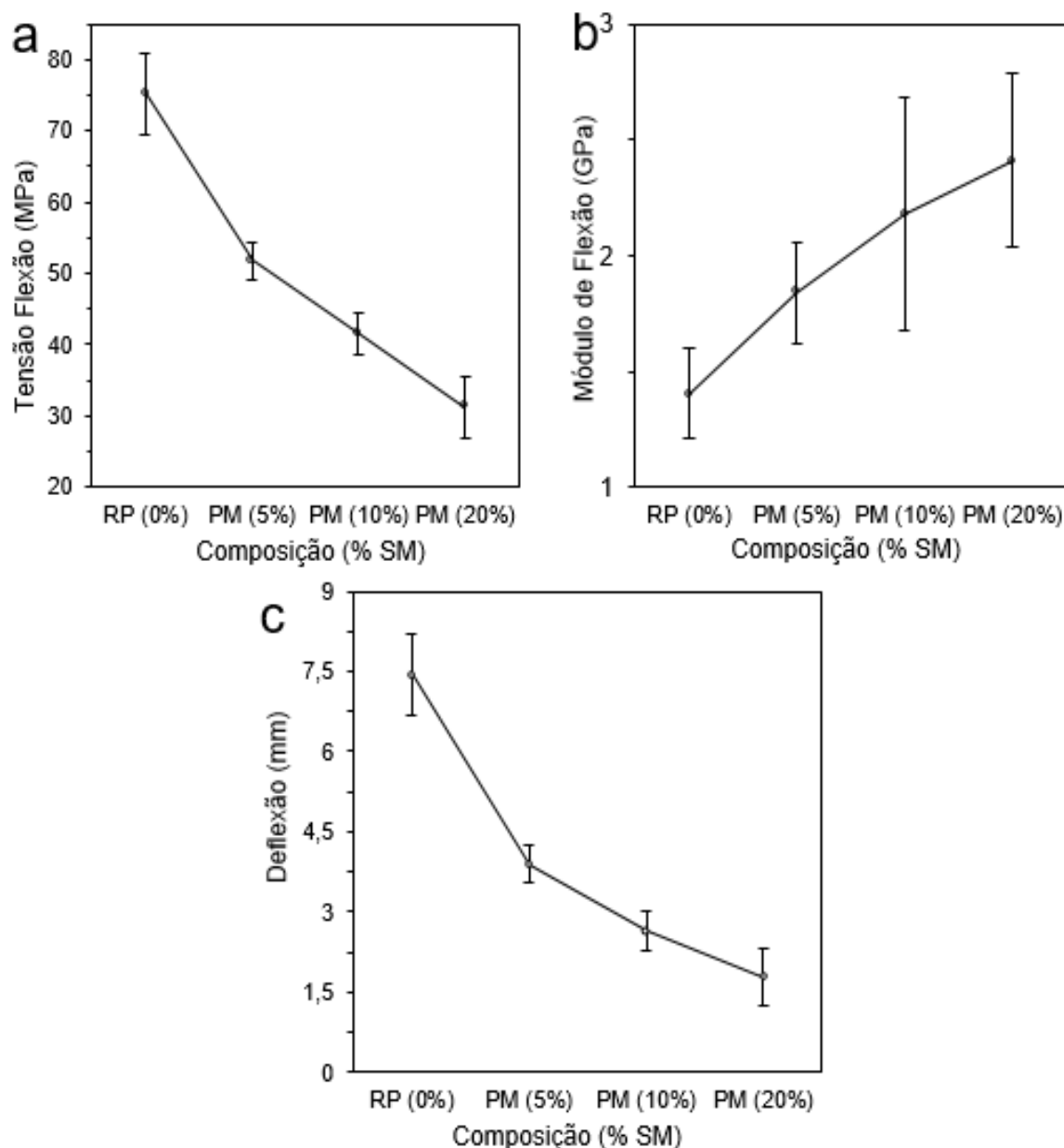
Os resultados da Tabela 10 mostram que a tensão máxima e a deflexão, decrescem com a incorporação das partículas médias no compósito. Esta redução da resistência à flexão é compatível com a literatura, pois reforços particulados, inseridos em matrizes poliméricas, podem atuar como pontos concentradores de tensão, nucleando trincas e reduzindo assim a resistência.

Da mesma maneira como se observou na Tabela 9, nos resultados da inserção das partículas finas, aqui também se observou o aumento da rigidez de todos os compósitos quando comparados à resina pura. Observa-se que ocorre também um aumento gradual do módulo de elasticidade, à medida que se aumentou o teor de carga do sabugo de milho na resina; o mesmo comportamento foi apresentado nos ensaios de tração.

Isso também relata Candido (2014), em seus estudos de caracterização e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar, o aumento do módulo de elasticidade dos compósitos com 20% e 30% em volume de fibra. Segundo Candido (2014), esse fato pode estar associado à baixa adesão da fibra na matriz, o que não favoreceu um reforço efetivo. Essa baixa adesão pode estar também associada ao elevado teor de lignina presente na fibra.

Neste caso, o compósito que apresenta um maior módulo de elasticidade em relação aos demais, é o compósito com 20% de partícula média.

A Figura 40 apresenta as variações da tensão de flexão, o módulo de flexão (módulo de elasticidade) e a deflexão, apresentados na Tabela 10 para amostras RP (resina pura) e as amostras, com 5%, 10% e 20% de PM (partícula média) do sabugo de milho.



**Figura 40 - Valores das propriedades mecânicas, (a) tensão máxima, (b) módulo de flexão (c) deflexão para as composições de RP 0% + 5%,10%, 20% PM do sabugo de milho**  
**Fonte: Autoria própria.**

Os valores das propriedades mecânicas apresentadas na Figura 40, confirmam a tendência observada nos ensaios de tração, quanto maior o teor das partículas inseridas na resina, maior o módulo de elasticidade e menores as propriedades de resistência à flexão (tensão de flexão) e deflexão.

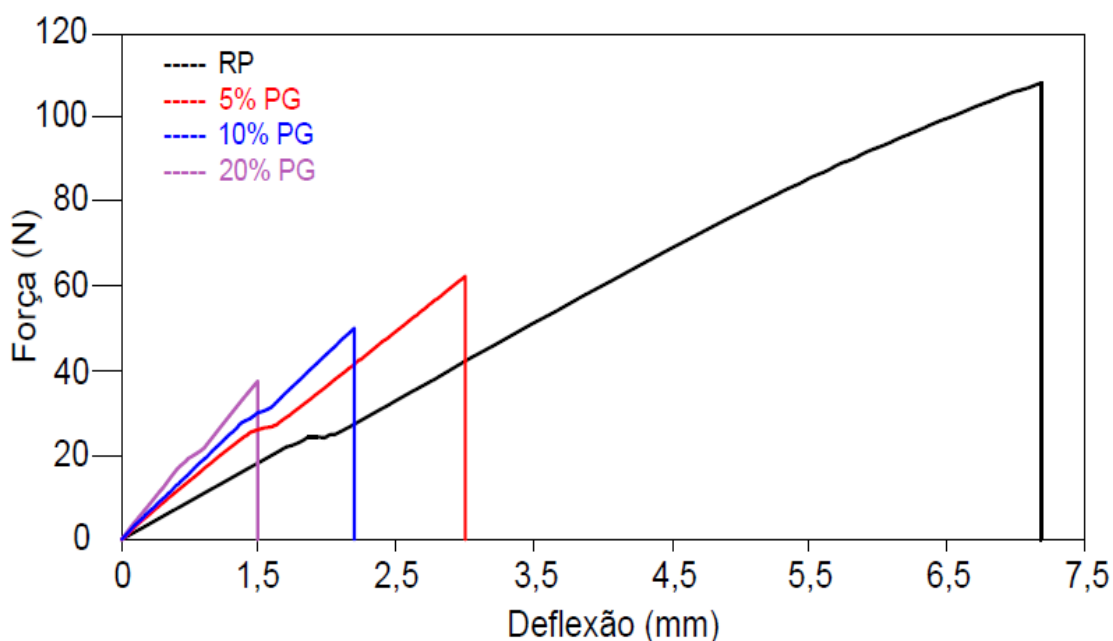
Esse fato é confirmado através do compósito com 20% de PM com um módulo de elasticidade de 30,85% maior que o compósito com 5% de PM e por sua vez, 71,6% maior que o da resina pura, evidenciando mais uma vez que o módulo



de elasticidade (rigidez) aumenta quando comparado à resina pura. Isto se dá devido ao aumento das proporções de partículas. Entretanto, tais fatos se dão devido aos sinais de arrancamento (*pull-out*) das partículas na matriz, indicando a fraca interação carga/matriz, o que foi também confirmado e identificado nas análises de MEV.

Na Figura 41 estão ilustradas as curvas típicas de força *versus* deslocamento (deflexão) das amostras de RP, as amostras com 5%, 10% e 20% PG, através do ensaio de flexão de três pontos.

A aparência é que todas as curvas dos compósitos apresentam nenhuma deformação plástica, típica de polímero termofixo. A ruptura inesperada indica que os compósitos com partículas grandes (PG) são materiais relativamente frágeis. Uma vez que não houve adesão entre partícula e matriz.



**Figura 41 - Curvas típicas do ensaio de flexão, força vs deslocamento da RP 0% + 5%, 10%, 20% PG de volume do sabugo de milho**  
**Fonte: Autoria própria.**

Nesta Figura 41 observou-se que as curvas das amostras, como verificado nas Figuras 37 e 39, são curvas de materiais frágeis sem nenhum tipo de deformação.

As curvas dos compósitos apresentam curvas lineares que correspondem ao comportamento elástico, existindo pouca ou nenhuma deformação até a sua ruptura, o que caracteriza um comportamento frágil.

Isto significa que, ao se atingir o ponto de máxima resistência, a ruptura é rápida, com a caída imediata de toda a carga aplicada.

As curvas obtidas indicam que os comportamentos mecânicos dos compósitos em flexão são afetados com a incorporação das PG.

A partir das curvas ilustradas na Figura 41, calculou-se a tensão máxima a flexão e o módulo de elasticidade. A Tabela 11 apresenta os valores médios para essas propriedades de flexão para a RP e os compósitos com 5%, 10% e 20% de volume de partículas grandes do sabugo de milho.

**Tabela 11 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de flexão em função do percentual de partículas grandes nos compósitos**

Volume de fibra de sabugo de milho (%)	Tensão de flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deflexão (mm)
RP 0%	75,25±5,74	1,40±0,19	7,44±0,74
PG 5%	43,05±2,11	1,99±0,35	3,00±0,25
PG 10%	35,76±2,58	2,31±0,50	2,15±0,50
PG 20%	26,40±3,84	2,44±0,38	1,50±0,38

**Fonte: Autoria própria.**

Os dados da Tabela 11 mostram que a tensão máxima e a deflexão, reduz com a incorporação das partículas grandes no compósito, o mesmo ocorreu com a inserção das partículas finas e partículas médias, aumento da rigidez de todos os compósitos, quando comparados à resina pura.

Pode-se observar também que ocorreu um aumento do módulo de elasticidade, à medida que se aumentou o teor de particulado do sabugo de milho na resina; o mesmo comportamento foi apresentado nos ensaios de tração.

Neste caso, também o compósito que apresenta um maior módulo de elasticidade em relação aos demais, é o compósito com 20% de partícula grande.

Este fato ocorre devido à fraca interação carga/matriz, comprovados nas análises do MEV, onde observou-se o total arrancamento das partículas grandes na matriz.

Segundo Barbosa (2011), um dos inconvenientes na utilização de fibras lignocelulósicas, em matriz poliéster é a sua natureza hidrofílica, devido à água absorvida na superfície da fibra. Assim, as matrizes poliéster apresentam caráter hidrofóbico, formando uma fraca interação fibra/matriz.

A Figura 42 apresenta as variações da tensão de flexão, módulo de flexão (módulo de elasticidade) e a deflexão, apresentados na Tabela 11 para amostras de resina pura (RP) e as amostras com 5%, 10% e 20% de partículas grandes (PG) do sabugo de milho.

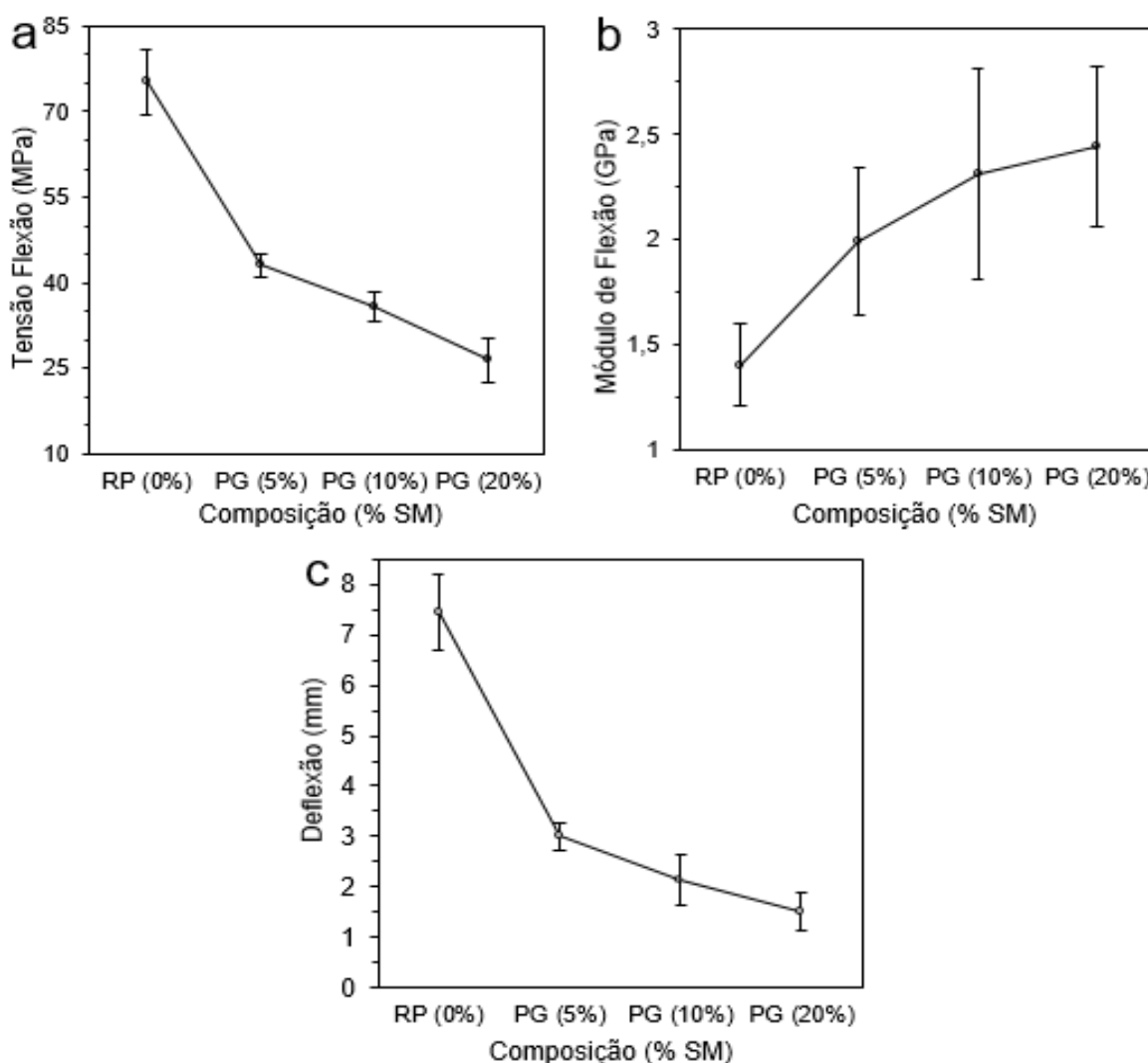


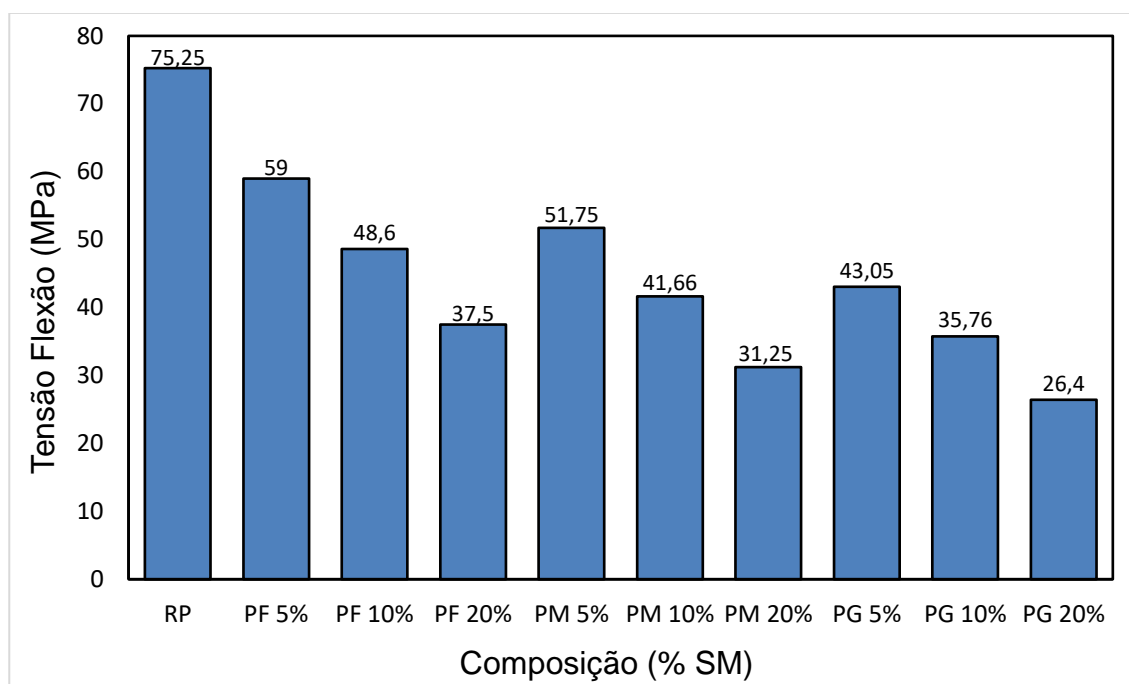
Figura 42 – Valores das propriedades mecânicas, (a) tensão máxima, (b) módulo de flexão (c) deflexão para as composições de RP 0% + 5%, 10%, 20% PG do sabugo de milho

Fonte: Autoria própria.

Os valores das propriedades mecânicas apresentados na Figura 42, também nos confirmam a tendência observada nos ensaios de tração; quanto maior o teor das partículas inseridas na resina, maior o módulo de elasticidade e menores as propriedades de resistência à flexão (tensão flexão) e deflexão.

Esse fato é confirmado através do compósito com 20% de PG tendo um módulo de elasticidade de 20,6% maior que o compósito com 5% de PG e 73,91% maior que o da resina pura, pois o reforço particulado, inserido na matriz polimérica, pode atuar como pontos concentradores de tensão, nucleando trincas, reduzindo assim a resistência.

Nas Figuras 43, 44 e 45, apresentam as propriedades de flexão obtidas no ensaio mecânico, como tensão máxima, módulo de elasticidade e deformação para todos os compósitos.



**Figura 43 – Valores da propriedade mecânica, tensão de flexão para todos os compósitos**

**Fonte: Autoria própria.**

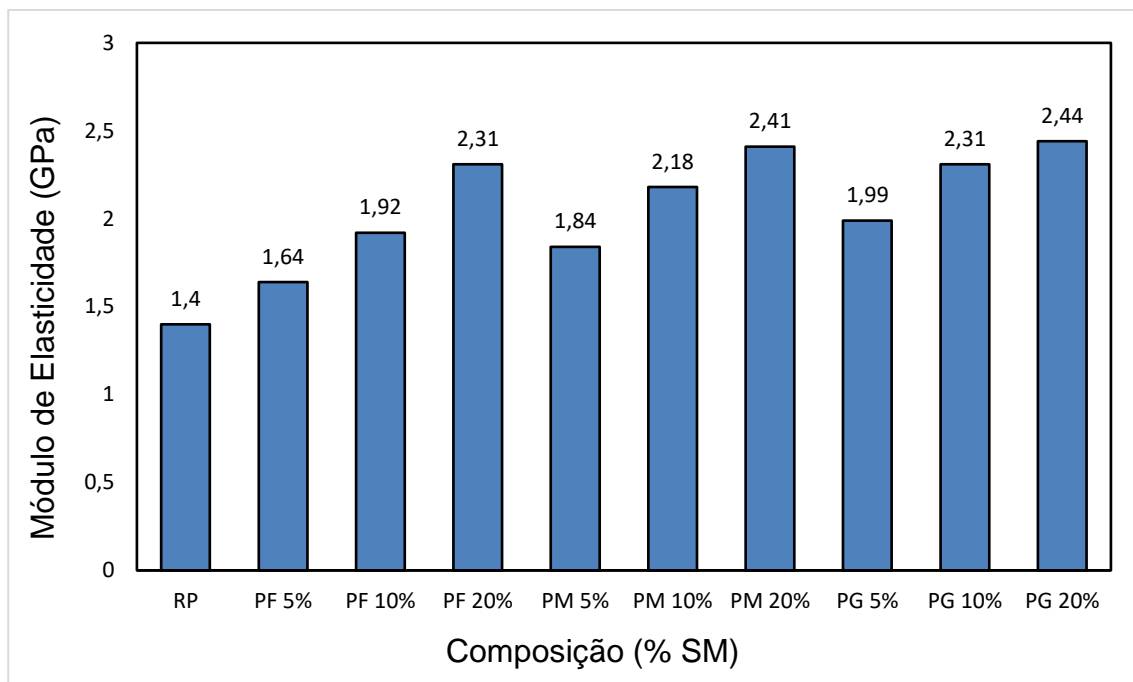


Figura 44 – Valores da propriedade mecânica, módulo de elasticidade para todos os compósitos

Fonte: Autoria própria.

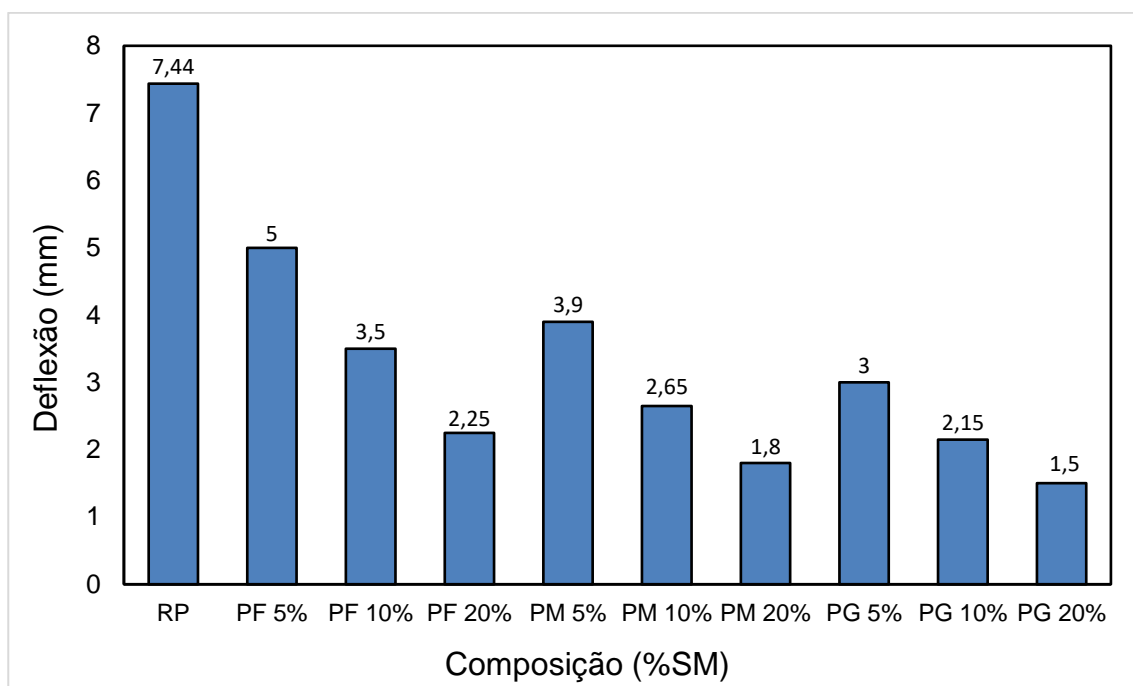


Figura 45 – Valores da propriedade mecânica, deflexão para todos os compósitos

Fonte: Autoria própria.

Os dados da Tabela 12 apresentam os resultados da tensão de flexão, do módulo de elasticidade e da deflexão de todos os compósitos estudados neste trabalho.

**Tabela 12 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaios de flexão em função do percentual dos particulados nos compósitos**

Volume de fibra de sabugo de milho (%)	Tensão de flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deflexão (mm)
RP 0%	75,25±5,74	1,40±0,19	7,44±0,74
PF5%	59±1,75	1,64±0,07	5±0,50
PF 10%	48,6±2,84	1,92±0,26	3,5±0,17
PF 20%	37,5±4,74	2,31±0,33	2,25±0,11
PM 5%	51,75±2,66	1,84±0,21	3,9±0,34
PM 10%	41,66±2,93	2,18±0,50	2,65±0,37
PM 20%	31,25±4,32	2,41±0,37	1,8±0,53
PG 5%	43,05±2,11	1,99±0,35	3±0,25
PG 10%	35,76±2,58	2,31±0,50	2,15±0,50
PG 20%	26,40±3,84	2,44±0,38	1,5±0,38

**Fonte: Autoria própria.**

Observa-se que a tensão de flexão (resistência à flexão) de todos os compósitos é inferior ao da resina pura (RP), constatando-se que nesse caso as partículas não apresentaram comportamento de reforço, mas sim como enchimento, não proporcionando melhorias nas propriedades mecânicas dos compósitos.

No entanto, o compósito com 5% de PF, comparado à resina pura (RP) foi o que apresentou melhores resultados: obteve uma redução de 21,6% na tensão de flexão, e uma redução de 32,8% na deflexão do compósito. Foi observado que, para as mesmas partículas e com o aumento das frações mássicas, também ocorre a redução das propriedades mecânicas de flexão. Por exemplo, para os compósitos com partículas finas (PF), o compósito com 10% de PF, comparado ao de 5% de PF, obteve uma redução de 17,63% na tensão flexão, e um decréscimo de 30% na

deflexão. Comparando ao compósito com 20% de PF, esses valores são maiores, pois foram ampliadas as frações mássicas na matriz. Isto confirma o que já foi citado neste trabalho, que aumentando a porcentagem de partículas na matriz, o compósito tem um comportamento desfavorável em suas propriedades mecânicas.

Os compósitos com 20% do volume de todas as fibras (PF, PM, PG), apresentaram resultados negativos de tensão de flexão. Conforme o resultado observou-se que aumentando o volume das fibras nas composições e o aumento da granulometria das partículas, a tensão de flexão (resistência à flexão) reduz, contribuindo negativamente para o desempenho do compósito.

Gomes, Godoi, Souza e Souza (2016), analisaram a viabilidade da utilização de resíduos originados da manufatura dos painéis de MDF (Médium Density Fiber board), avaliando seu potencial como alternativa em substituição a cargas minerais para aplicação industrial. Os mesmos utilizaram a resina de poliéster ortoftálica em diferentes frações mássicas de adição do resíduo 0%, 10%, 15% e 20%.

Segundo Gomes, Godoi, Souza e Souza (2016), nos compósitos houve diminuição gradual na resistência mecânica à flexão com o aumento do teor de resíduo. Os valores de resistência mecânica à flexão do compósito C20%, comparativamente aos valores obtidos pela resina pura, foram de aproximadamente 65%.

Esse fato demonstra que os resíduos de MDF no compósito não funcionou como reforço, e sim como enchimento. Se a adesão das fibras na matriz tivesse sido mais eficiente, e não fosse observada a presença de *pull-out*, conforme mostrado nas análises do MEV, as propriedades mecânicas seriam provavelmente superiores.

Os compósitos obtêm a redução na resistência à flexão e na deformação, com o aumento do percentual de partículas de sabugo de milho, isso atribui ao compósito maior rigidez e menor flexibilidade, como mostram os resultados do módulo de elasticidade do compósito. Por exemplo, a deflexão do compósito com 20% de PM comparando à deflexão do compósito com 5% de PM foi de 53,85%. Isto mostra que a introdução das partículas provocou, não só neste compósito, mas em cada amostra do compósito, uma menor deflexão e conseqüentemente um maior módulo de elasticidade quando submetido ao ensaio de flexão.

Os compósitos que apresentam o menor módulo de elasticidade entre todas as composições são os compósitos com 5% do volume de todas as fibras.

Assim pode-se dizer que as partículas que mostram melhores resultados são as (PF) partículas finas, pois as mesmas têm uma melhor homogeneização com a matriz; este fato é comprovado nas análises de MEV.

Já os compósitos com maior módulo de elasticidade entre todas as composições são os compósitos com 20% do volume de todas as fibras. Entre as partículas utilizadas no estudo, a que apresentou maior módulo de elasticidade foi a (PG) partícula grande.

Como mostrado na Tabela 12 observa-se que há uma tendência na redução da tensão de flexão, e na deflexão para as amostras com as mesmas partículas (PF, PM, PG), aumentando a percentagem do volume das partículas, no caso 5%, 10% e 20% no compósito. Na medida em que se aumenta o percentual de reforço (carga) no compósito, eleva-se diretamente a proporção de partículas distribuídas ao longo da área transversal, ou seja, uma maior fração da área transversal é constituída por partículas de sabugo de milho, reduzindo a resistência efetiva do compósito.

Segundo Silva et al. (2010), a resistência e o módulo do compósito reforçados por fibras curtas (particuladas) dependem principalmente da eficiência de transferência de tensões da matriz às fibras. A eficiência desta transferência, por sua vez, depende do comprimento da fibra e da magnitude das interações na interface fibra/matriz.

Se o comprimento das fibras de reforço for inferior ao comprimento crítico, as fibras serão sacadas da matriz (*pull-out*) e o compósito irá falhar em baixas tensões.

Este fato foi confirmado neste trabalho analisando as imagens do MEV dos compósitos com 20% PG.



### 4.1.3 Ensaio de Impacto

Neste tópico, são apresentados e discutidos os resultados do ensaio de impacto Izod para todos os compósitos.

A averiguação da resistência ao impacto em materiais compósitos é importante para caracterizar um comportamento mecânico, pois ajuda a detectar as possíveis falhas durante o seu uso. Uma das desvantagens do uso de compósitos polímero/carga vegetal é a sua baixa resistência ao impacto a temperatura ambiente (BLEDSKI, 1999, apud RODRIGUES, 2011).

Os ensaios de impacto Izod em matriz polimérica foram realizados segundo a norma ASTM D256, reforçados com diferentes frações volumétricas de fibras de sabugo de milho, como foi descrito anteriormente.

Os resultados obtidos nos testes de impacto Izod dos compósitos com as partículas finas são apresentados na Tabela 13.

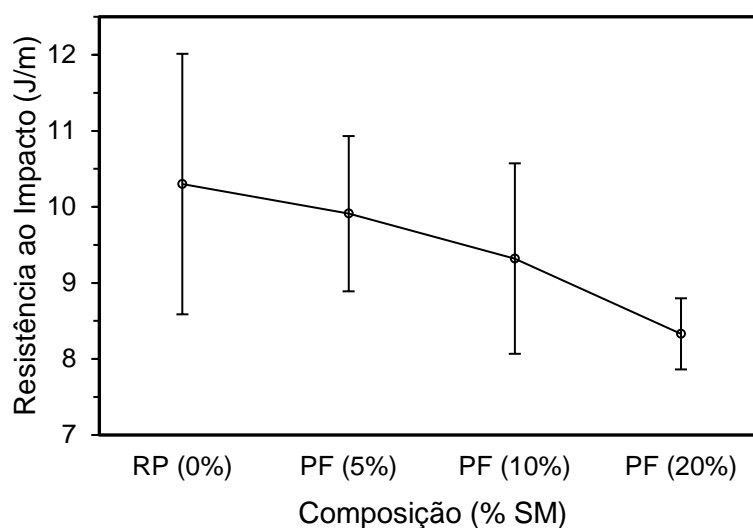
**Tabela 13 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaio de impacto Izod em função do percentual de partículas finas nos compósitos.**

Volume de fibra de sabugo de milho (%)	Resistência ao impacto (J/m)
RP 0%	10,30±1,71
PF 5%	9,91±1,02
PF 10%	9,32±1,25
PF 20%	8,33±0,46

**Fonte: Autoria própria.**

Com base nos resultados encontrados na Tabela 13, a variação da energia específica (J/m) obtida no ensaio de impacto de Izod, para amostra de resina pura e os compósitos com 5%, 10% e 20% de partículas finas, é possível afirmar que a inserção das partículas do sabugo de milho reduz o desempenho dos compósitos comparados com a resina pura.

A Figura 46 apresenta um diagrama da variação da energia absorvida no impacto em função do volume relativo de partículas finas na matriz.



**Figura 46 - Valores de resistência ao impacto Izod para as composições de RP 0% + 5%, 10%, 20% PF do sabugo de milho**

**Fonte: Autoria própria.**

Constata-se na Figura 46, a redução da resistência ao impacto nos compósitos com 5%, 10% e 20% de PF, comparados à amostra de RP.

O compósito cujo valor mais se aproximou da resina pura (RP) foi o compósito com 5% de partícula fina (PF), onde se obteve uma redução de 3,8% na resistência ao impacto Izod. As outras amostras com 10% de PF e 20% de PF apresentaram as respectivas reduções de 9,5% e 19%. Pode-se confirmar que aumentando a porcentagem do material particulado no compósito, ocorre a redução em sua resistência ao impacto.

Segundo (WASCHBURGER, 2006, apud RODRIGUES, 2011), a adição do material particulado superior a 4% nos compósitos diminui a resistência ao impacto.

De acordo com Zang et al. (2004), o material particulado pode agir como concentrador de tensão, permitindo a iniciação e a propagação de falhas, diminuindo, conseqüentemente, a resistência ao impacto Izod.

Como no presente trabalho foi utilizado 5%, 10% e 20% de PF como carga nos compósitos, isso pode ter reduzido a resistência ao impacto Izod, provocando um enrijecimento das cadeias poliméricas pela ligação que ocorre entre as fases.

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos nos testes de impacto Izod dos compósitos com as partículas médias.

**Tabela 14 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaio de impacto Izod em função do percentual de partículas médias nos compósitos**

Volume de fibra de sabugo de milho (%)	Resistência ao Impacto (J/m)
RP 0%	10,30±1,71
PM 5%	9,53±0,94
PM 10%	8,80±1,05
PM 20%	7,83±0,69

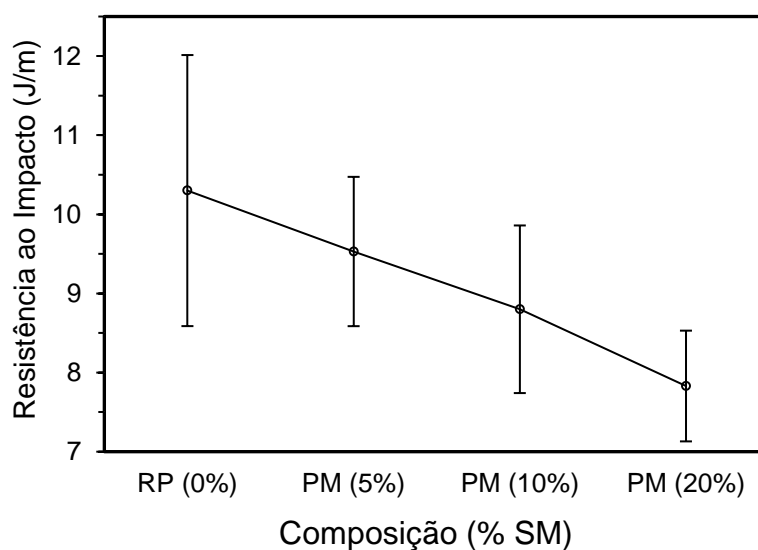
Fonte: Autoria própria.

De acordo com os dados da Tabela 14, os compósitos apresentam valores menores de resistência ao impacto, quando comparados à resina pura.

Assim, verifica-se que a inserção das partículas médias do sabugo de milho reduz o desempenho dos compósitos.

O compósito em que o valor mais se aproximou da resina pura (RP) foi o compósito com 5% de partícula média (PM), onde obteve-se uma redução de 7,5% na resistência ao impacto Izod. As outras amostras com 10% de PM e 20% de PM apresentaram as respectivas reduções de 14,6% e 24%.

A Figura 47 mostra um diagrama da variação da energia absorvida no impacto em função do volume relativo de partículas médias na matriz.



**Figura 47 - Valores de resistência ao impacto Izod para as composições de RP 0% + 5%, 10%, 20% PM do sabugo de milho**

Fonte: Autoria própria.

Através da Figura 47 pode-se afirmar que ocorre a redução de resistência ao impacto dos compósitos com 5%, 10% e 20% de PM se comparados à resina pura (RP), e igualmente com os compósitos com partículas finas (PF).

Contudo, a resistência ao impacto depende da granulometria das fibras ou do material particulado adicionado ao compósito, no presente trabalho, pode-se dizer que a adição das partículas médias na resina pura levou os compósitos a apresentarem resistências menores ao impacto, quando comparados à resina pura.

Segundo Rodrigues (2011), a incorporação do reforço (partículas), aumenta a densidade da amostra, tornando-as mais rígidas e resultando em menor capacidade de absorção de energia ao impacto, ou seja, a resistência dos compósitos diminui com a adição dos materiais particulados.

A Tabela 15 mostra os resultados obtidos nos testes de impacto Izod dos compósitos com as partículas grandes.

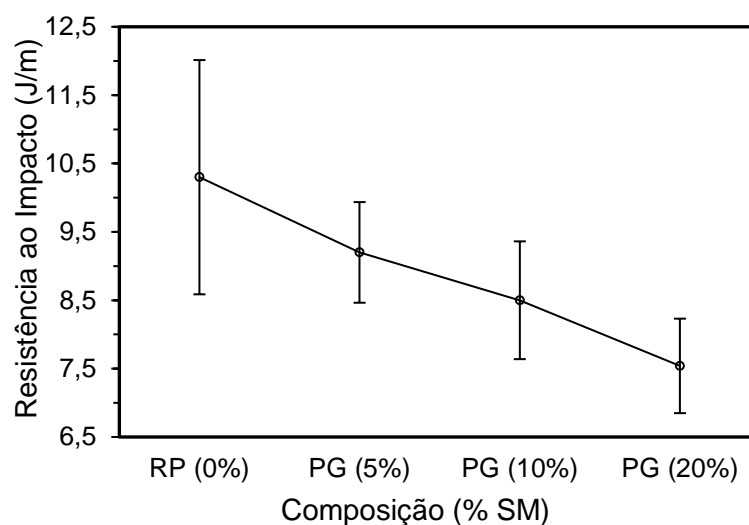
**Tabela 15 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaio de impacto Izod em função do percentual de partículas grandes nos compósitos**

Volume de fibra de sabugo de milho (%)	Resistência ao Impacto (J/m)
RP 0%	10,30±1,71
PG 5%	9,20±0,73
PG 10%	8,50±0,86
PG 20%	7,54±0,69

**Fonte: A autoria própria.**

Com base nos resultados encontrados na Tabela 15, a variação da energia específica (J/m) obtida no ensaio de impacto de Izod, para amostra de resina pura e os compósitos com 5%, 10% e 20% de partículas grandes, observou-se também que a inserção das partículas do sabugo de milho altera negativamente o desempenho do compósito comparado com a resina pura.

A Figura 45 apresenta um diagrama da variação da energia absorvida no impacto em função do volume relativo de partículas grandes na matriz.



**Figura 48 - Valores de resistência ao impacto Izod para as composições de RP 0% + 5%, 10%, 20% PG do sabugo de milho**

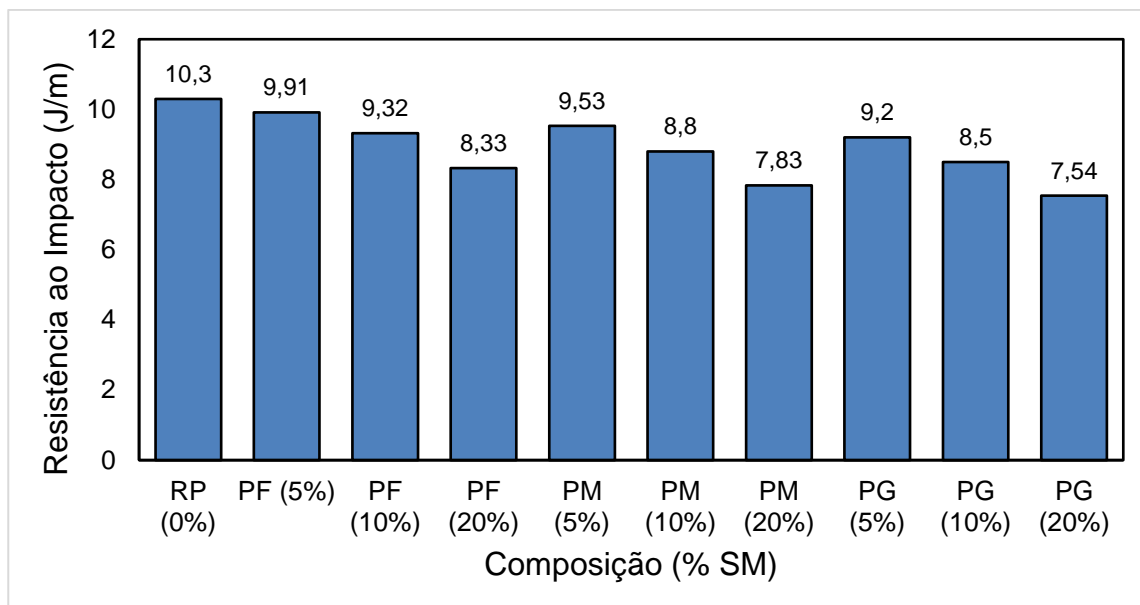
**Fonte: Autoria própria.**

Como mostrado na Figura 48, observa-se que ocorre a redução de resistência ao impacto de todas as composições dos compósitos, comparado à resina pura e igualmente para aos compósitos de partículas finas e partículas médias.

O compósito em que a grandeza mais se aproximou da resina pura (RP) foi o compósito com 5% de partícula grande (PG), onde apresentou-se uma redução de 10,7% na resistência ao impacto Izod. As outras amostras com 10% de PG e 20% de PG apresentaram as respectivas reduções de 17,5% e 26,8%.

De acordo com Hillig et al. (2011), que caracterizaram compósitos produzidos com polietileno de alta densidade (HDPE) e serragem da indústria moveleira, afirma que a incorporação de carga (serragem) causa uma diminuição da resistência ao impacto em relação ao polietileno de alta densidade (HDPE) puro e um aumento da proporção de carga no compósito diminui ainda mais essa resistência ao impacto.

A Figura 49 mostra as propriedades de resistência ao impacto para todos os compósitos.



**Figura 49 – Valores da resistência ao impacto para todos os compósitos**  
**Fonte: Autoria própria.**

A Tabela 16 abaixo mostra os resultados da resistência ao impacto de todos os compósitos estudados neste trabalho.

**Tabela 16 - Propriedades mecânicas obtidas por ensaio de impacto Izod em função do percentual dos particulados nos compósitos**

Volume de fibra de sabugo de milho (%)	Resistência ao Impacto (J/m)
RP 0%	10,30±1,71
PF 5%	9,91±1,02
PF 10%	9,32±1,25
PF 20%	8,33±0,46
PM 5%	9,53±0,94
PM 10%	8,80±1,05
PM 20%	7,83±0,69
PG 5%	9,20±0,73
PG 10%	8,50±0,86
PG 20%	7,54±0,69

**Fonte: Autoria própria.**

Observa-se na Tabela 16 que as resistências ao impacto de todos os compósitos são inferiores à da resina pura (RP), constatando-se que as fibras se apresentam como material de enchimentos compósitos e não como reforço.

Constatou-se que entre as amostras compostas de uma mesma partícula, ocorre uma baixa variação de resistência ao impacto. Essa variação é comprovada entre os compósitos com 5% e 10% de PF. A variação de resistência ao impacto é de 6%, já entre os compósitos com 10% e 20% de PF, a diferença é de 10,6%.

Para os compósitos com 5% de partículas médias comparado ao compósito com 10% de partículas médias a variação de resistência ao impacto é de 7,7%. No entanto, para os compósitos com 10% de PM, comparado ao compósito com 20% de PM, está variação é de 11%.

Para os compósitos com partículas grandes a variação dos resultados entre o compósito com 5% e 10% de partícula grande é de 7,6%; para os compósitos com 10% e 20% de partículas grandes, está variação é de 11,3%.

Entre todos os compósitos, o que apresentou um melhor desempenho de resistência ao impacto foi o compósito com 5% de PF. Isto se dá devido ao fato das partículas terem uma boa ligação carga/matriz polimérica.

Os compósitos com maior porcentagem e maior granulometria das fibras apresentaram um desempenho ineficaz junto à resistência ao impacto.

É importante salientar que a adição das partículas de sabugo de milho, mesmo provocando uma deterioração em algumas propriedades mecânicas, em outras pode ser vista como vantagem. Pode-se dizer também, que a substituição de uma matéria prima não degradável por outra de baixo custo e biodegradável é uma vantagem.

A combinação da matéria prima utilizada e a quantidade poderá resultar em compósitos com propriedades projetadas sob medida para várias aplicações, com a vantagem da redução do impacto ambiental pela adição de uma carga ecologicamente correta, como por exemplo, produzir compósitos com granulometrias específicas contemplando uma ou outra fase específica do sabugo de milho.

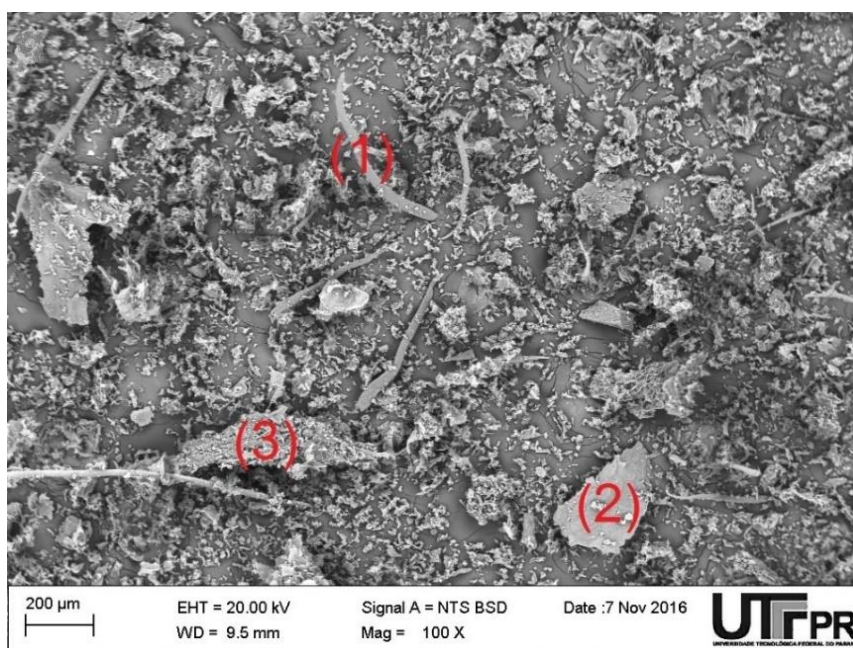
#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO MORFÓLOGICA DAS DIFERENTES GRANULOMETRIAS DO SABUGO DE MILHO POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados referentes às análises de microscopia eletrônica de varredura das diferentes granulometrias do sabugo de milho.

As análises das fibras de sabugo de milho com diferentes granulometrias foram realizadas com o auxílio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), como apresentam as Figuras (50, 51, 52), permitiram identificar todas as partes constituintes da fibra, no caso o sabugo de milho.

Assim, com base nas micrografias eletrônicas apresentadas por Ramos (2016), pode-se avaliar as diferentes partes da fibra do sabugo de milho.

Na figura 50 observa-se a forma da partícula fina (PF), a mesma é constituída de (1) fibras do anel lenhoso, (2) de palha grossa, (3) da medula e de uma grande porcentagem de palha fina.

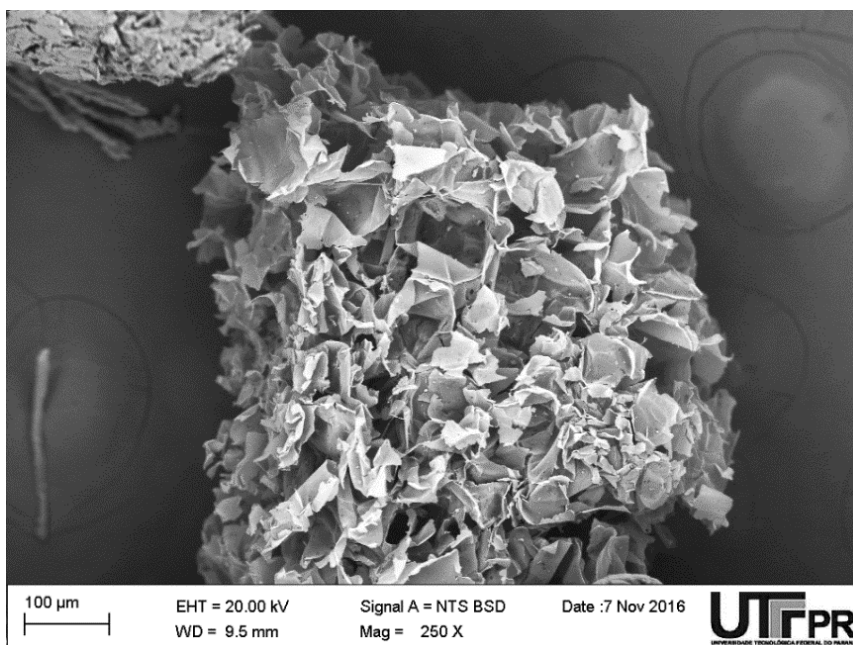


**Figura 50 – Micrografia eletrônica de varredura da fibra do sabugo de milho triturado partícula fina (PF)**

**Fonte: Autoria própria.**



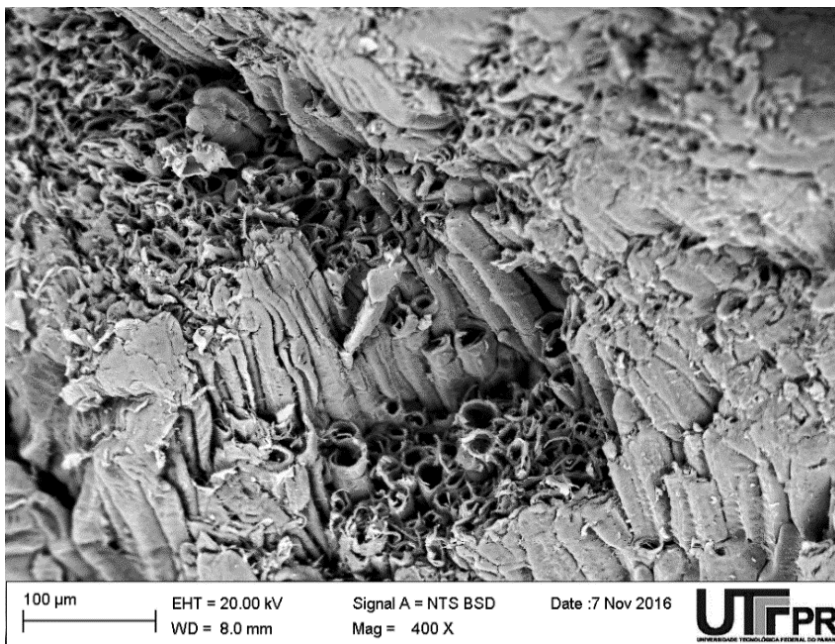
Já a Figura 51 mostra a forma da partícula média (PM) que é constituída, na sua grande maioria, por palha fina.



**Figura 51 – Micrografia eletrônica de varredura da fibra do sabugo de milho triturado partícula média (PM)**

**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 52 mostra a forma da partícula grande (PG), constituída em grande porcentagem pelo núcleo (medula), que são os micros tubos da região central do sabugo de milho.



**Figura 52 – Micrografia eletrônica de varredura da fibra do sabugo de milho triturado partícula grande (PG)**

Fonte: Autoria própria.

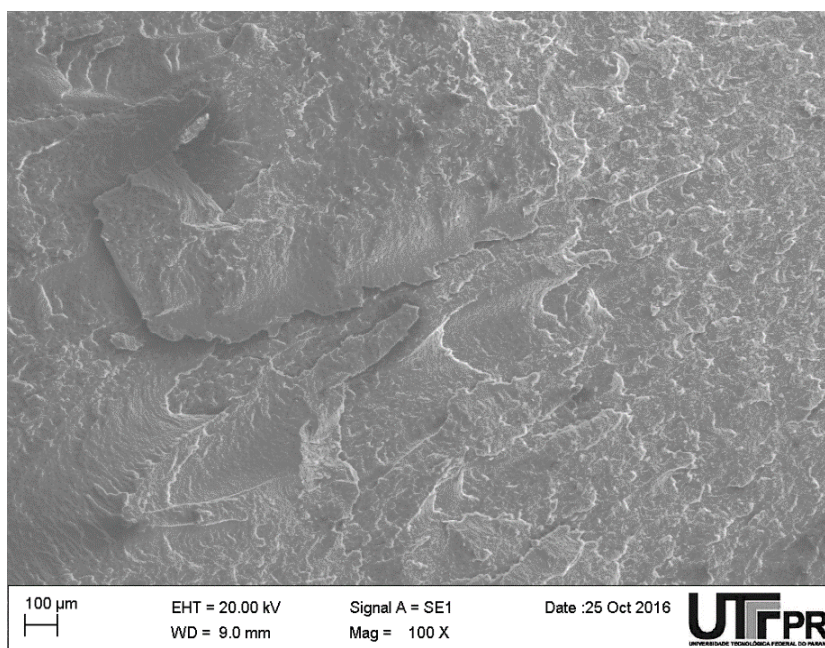
Assim, pode-se concluir que a faixa de granulometria utilizada para a produção dos compósitos contempla praticamente todos os componentes do sabugo de milho triturado.

#### 4.3 AVALIAÇÃO MORFOLÓGICA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DO POLIESTER E O COMPÓSITO COM 5% 10% 20% DE PF

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados referentes às análises de microscopia eletrônica de varredura dos compósitos com partículas finas, onde desejava-se observar a influência da carga na matriz.

As Figuras (53, 54, 55, 56), apresentam micrografias eletrônicas de varredura das amostras dos compósitos após fraturas sofridas pelo ensaio de tração nas suas diversas composições; (53) RP (resina pura), (54) resina mais 5% de partícula fina, (55) resina mais 10% de partícula fina e (56) resina mais 20% de partícula fina.

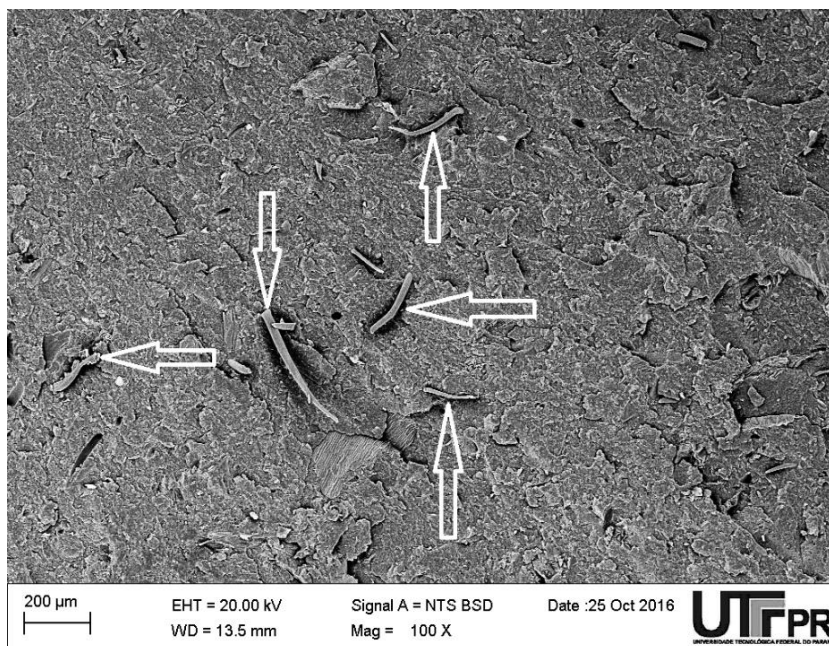
Na Figura 53, observa-se que para o corpo de prova sem adição de fibra ocorre uma fratura frágil sem deformação plástica aparente, o que pode ter levado ao desenvolvimento de uma trinca. A direção do movimento dessa trinca é, aproximadamente, perpendicular à direção da tensão de tração aplicada, o que produz uma superfície de fratura relativamente plana no corpo de prova. Esta observação ocorre em todas as análises fractográficas da resina pura.



**Figura 53 – Análise fractográfica por MEV da amostra de resina pura (PR)**

**Fonte: Autoria própria.**

Entretanto, a Figura 54 apresenta a análise fractográfica da amostra de resina com 5% de partícula fina (PF), verifica-se poucas partículas distribuídas na matriz, porém, nota-se boa interação entre a partícula e matriz, obtendo assim uma boa homogeneidade, uma boa adesão fibra/matriz, como mostram as setas em branco.

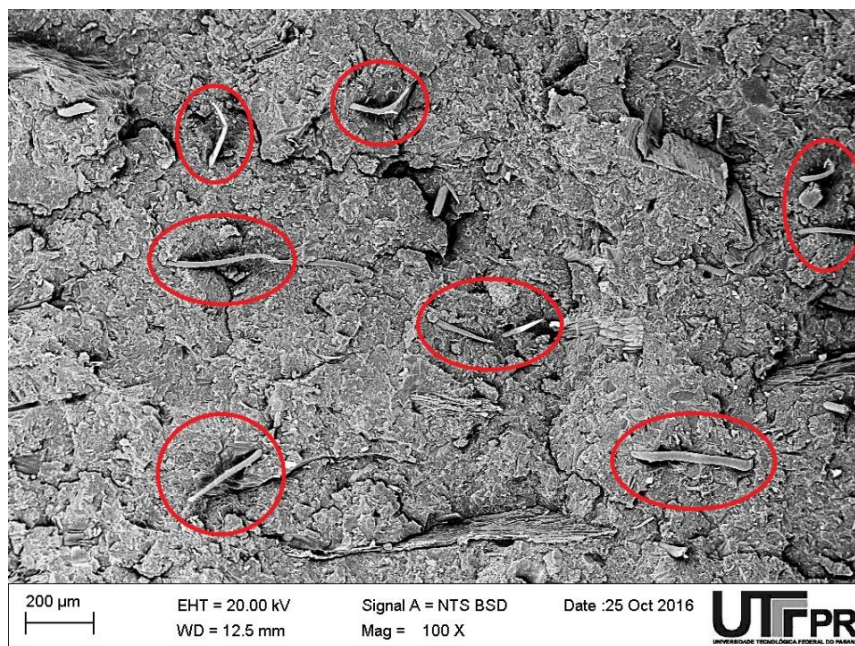


**Figura 54 – Análise fractográfica por MEV da amostra (RP) + 5% (PF)**

**Fonte: Autoria própria.**

Já na Figura 55, resina com 10% da partícula fina (PF), pode-se analisar uma maior quantidade e uma melhor distribuição das partículas, ainda com uma boa interação com a matriz (sinal de boa junção fibra/matriz), como mostram as áreas circuladas em vermelho, porém com baixa resistência mecânica.

Segundo Ramos (2013), a resistência à tração na ruptura decresce com o aumento do percentual de partículas do sabugo de milho no compósito. Esta teoria é verdadeira, pois foi o que vimos nos ensaios de tração apresentados neste trabalho.



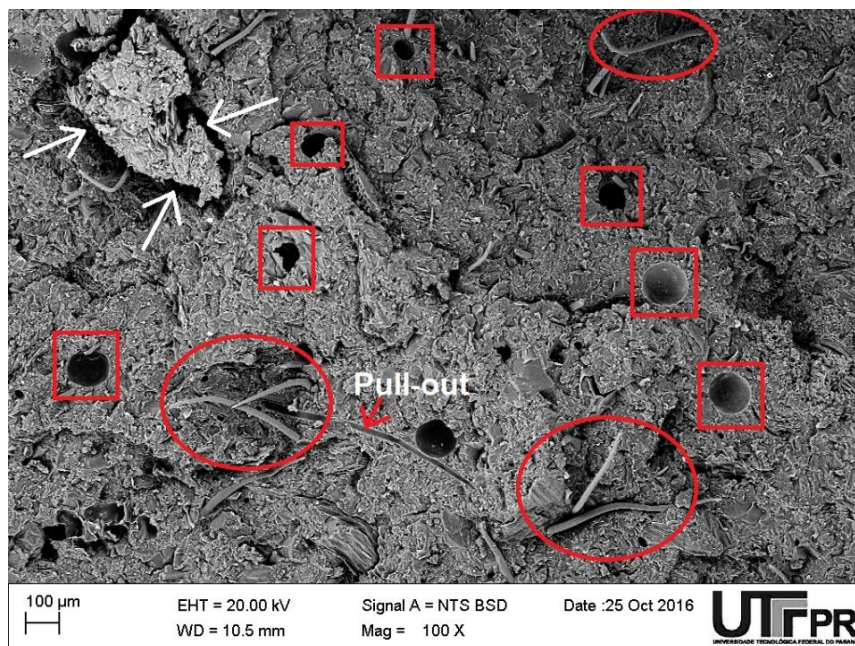
**Figura 55 – Análise fractográfica por MEV da amostra (RP) + 10% (PF)**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 56 observa-se a amostra de resina com 20% da partícula fina (PF). Constata-se uma concentração maior de partículas na matriz, observa-se nas áreas quadriculadas em vermelho, defeitos como vazios e bolhas, defeitos estes que não são encontrados nas amostras com 5% e 10% de (PF). Estes defeitos ocorrem devido a uma falha na mistura da matriz com a carga, já que a mistura é feita manualmente e a porcentagem de 20% de carga é maior, dificultando assim essa mistura.

Nas setas brancas, observar-se a fraca interação entre as partículas maiores (medula), e também um sinal de arrancamento da fibra na matriz (*pull-out*), como indicado na Figura 56.

Estas irregularidades ou imperfeições estruturais têm grande influência nas propriedades dos materiais, principalmente nas propriedades mecânicas, como a resistência à tração, que nesta amostra foi a mais baixa comparada às outras com o mesmo tipo de reforço.





**Figura 56 – Análise fractográfica por MEV da amostra (RP) + 20% (PF)**

**Fonte: Autoria própria.**

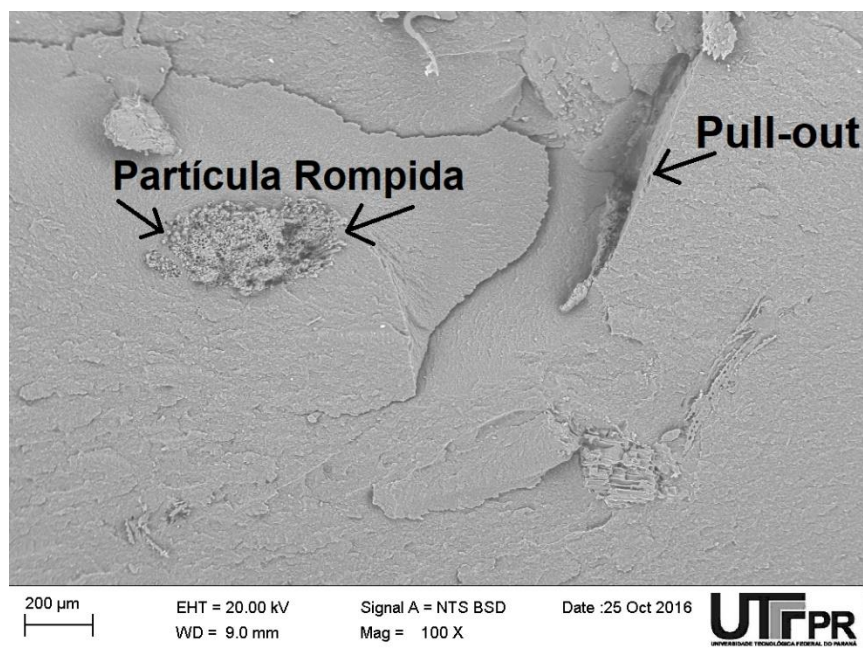
Assim, conclui-se que a partícula fina utilizada para a produção dos compósitos tem uma interação limitada e uma boa distribuição com a matriz polimérica.

No entanto, verifica-se também que, se aumentarmos a porcentagem de reforço na matriz, no caso 20% isso acarretará na formação de defeitos, tendo uma influência negativa no compósito.

#### 4.4 AVALIAÇÃO MORFOLÓGICA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DO COMPÓSITO COM 5%, 10%, 20% DE PM

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados referentes às análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos compósitos com partículas médias, onde verifica-se a influência do material particulado na matriz.

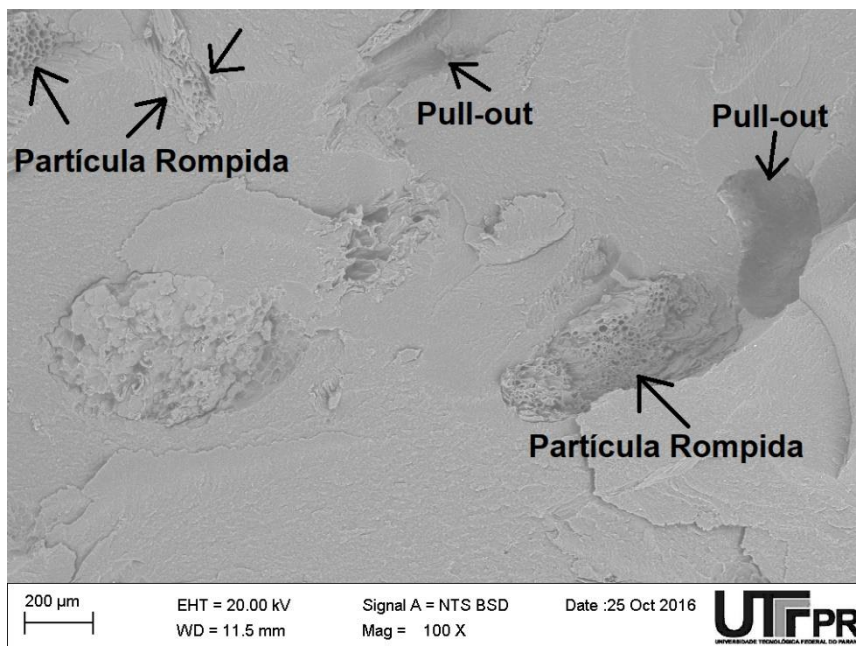
A Figura 57 mostra a micrografia eletrônica de varredura da amostra fraturada pelo ensaio de tração, da resina com 5% de partícula média (PM).



**Figura 57 – Fractografia no MEV da amostra (RP) + 5% (PM)**  
**Fonte: Autoria própria.**

Observa-se nesta imagem sinal de arrancamento (*pull-out*) do extrato (grânulo de milho) da matriz, o que indica pouca adesão fibra/matriz e baixo grau de molhabilidade entre os constituintes dos compósitos. Assim, a transferência de tensão da matriz para o reforço fica prejudicada. Mas também é possível perceber que a partícula de sabugo de milho foi rompida, sobrando apenas uma parte na amostra da matriz analisada. Isso mostra que há um certo grau de molhabilidade superficial entre a partícula média e a matriz e, por conseguinte, um certo ancoramento entre as fases.

A Figura 58 apresenta a microscopia eletrônica de varredura (MEV) da amostra fraturada pelo ensaio de tração da resina com 10% de partícula média (PM).



**Figura 58 – Fractografia no MEV da amostra RP + 10% (PM)**  
**Fonte: Autoria própria.**

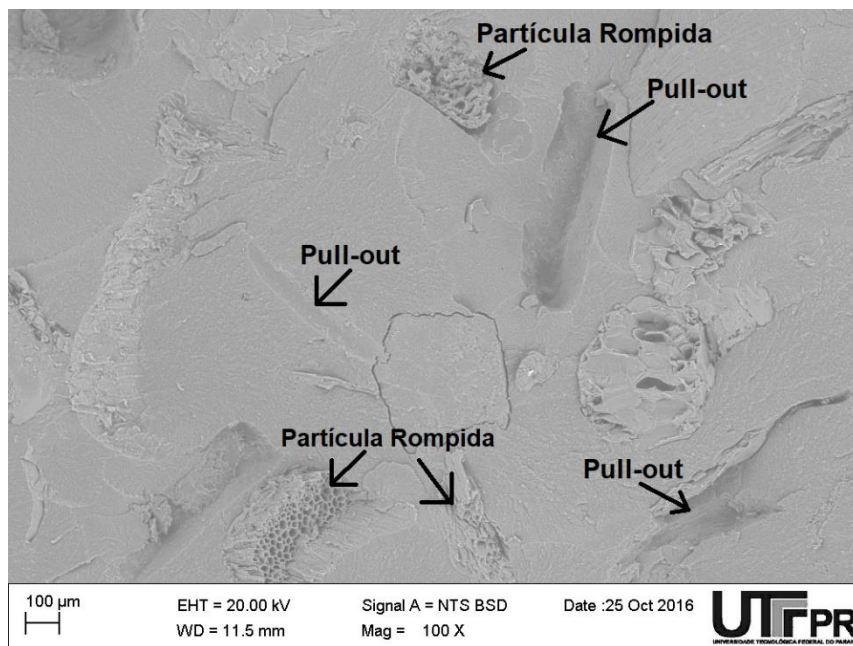
Na Figura 58 pode-se analisar uma maior quantidade e uma melhor distribuição do reforço se comparada com a Figura 57, na qual temos o compósito com 5% de reforço (carga). A Figura 58 também apresenta sinais de arrancamento (*pull-out*) das partículas na matriz, o que indica pouca adesão fibra/matriz e baixo grau de molhabilidade, e tendo assim pouca transmissão de tensão entre matriz e partícula. Como observado por (FERREIRA 2000 apud BARBOSA 2011), a qualidade da interface pode ser determinada por fatores químicos e físicos que, por sua vez, estão relacionados com a área da superfície, a pureza do reforço, a molhabilidade da matriz e as diferenças nas propriedades térmicas e mecânicas dos materiais constituintes.

Assim, a fraca ligação na interface matriz/reforço, pode ser responsável pelo descolamento da fibra na matriz, causando a ruptura como mostra a Figura 58.

É possível perceber também que a partícula do sabugo de milho foi fragmentada, sobrando apenas uma parte na amostra da matriz analisada. Isso indica que existe um nível de molhabilidade superficial entre a partícula média e a matriz e, portanto, há um certo contato entre as fases.

Já a Figura 59 apresenta a imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da amostra fraturada pelo ensaio de tração da resina com 20% de partícula média (PM).





**Figura 59 – Fractografia no MEV da amostra (a) RP + 20% (PM)**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 59 constata-se uma maior quantidade de sinais de arrancamento (*pull-out*) da partícula na matriz, o que mostra deficiência de adesão entre reforço/matriz, mas também é possível perceber que existem partículas do sabugo de milho rompidas, sobrando apenas uma parte na amostra na matriz analisada. Isso mostra que há uma possibilidade mínima de contato entre a partícula e a matriz.

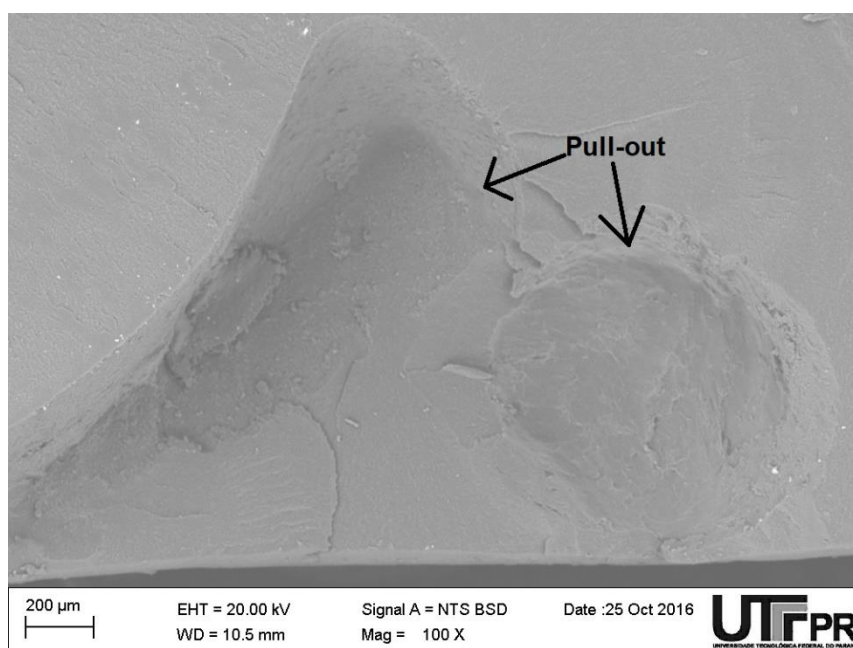
Assim, pode-se observar que a partícula média, é constituída por palha fina, e na produção dos compósitos tem uma baixa interação fibra/matriz, porém possui uma boa distribuição na matriz polimérica. Entretanto, observa-se também que, se aumentarmos a porcentagem do reforço na matriz, isso acarretará na formação de defeitos oriundos da falta de aderência matriz/reforço, influenciando negativamente as propriedades mecânicas do compósito.

#### 4.5 AVALIAÇÃO MORFOLÓGICA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DO COMPÓSITO COM 5%, 10%, 20% DE PG

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados referentes às análises de microscopia eletrônica de varredura dos compósitos com partículas grandes. As imagens obtidas permitiram identificar a influência do reforço na matriz.

As Figuras 60, 61 e 62, apresentam as imagens do MEV das amostras fraturadas pelo ensaio de tração, com 5%, 10%, e 20% de partícula grande.

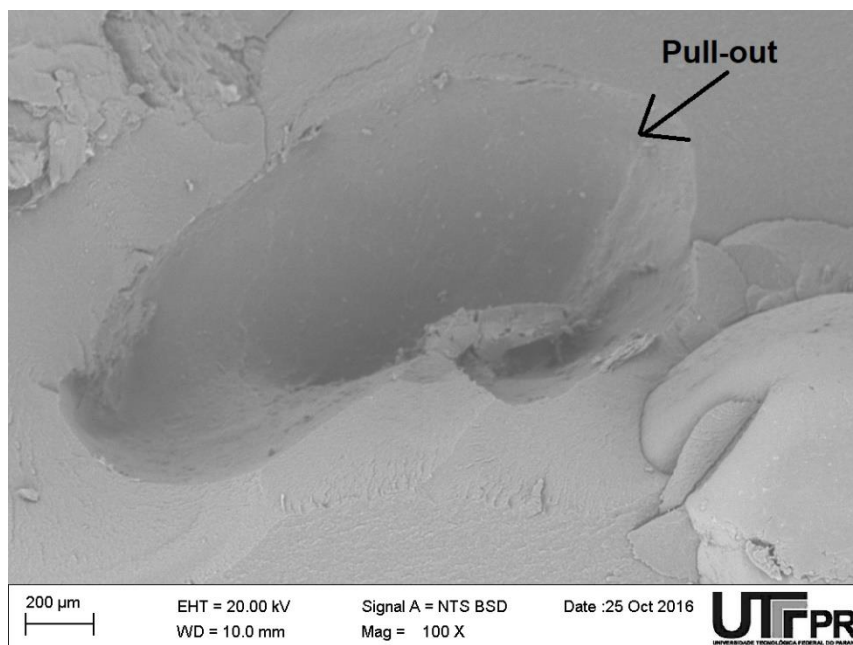
Na Figura 60 a resina com 5% de partícula grande apresenta sinal de total arrancamento (*pull-out*) da partícula na matriz, o que indica pouca interação fibra/matriz e baixo grau de molhabilidade, sugerindo uma má fixação do reforço na matriz e não obtendo uma efetiva transmissão de energia mecânica entre reforço/matriz.



**Figura 60 – Fractografia no MEV da amostra (RP) + 5% (PG)**  
**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 61 nos mostra o compósito com 10% de partícula grande, verifica-se também o sinal de total arrancamento (*pull-out*) da partícula na matriz, o que indica pouca aderência fibra/matriz e baixo grau de molhabilidade. A razão para

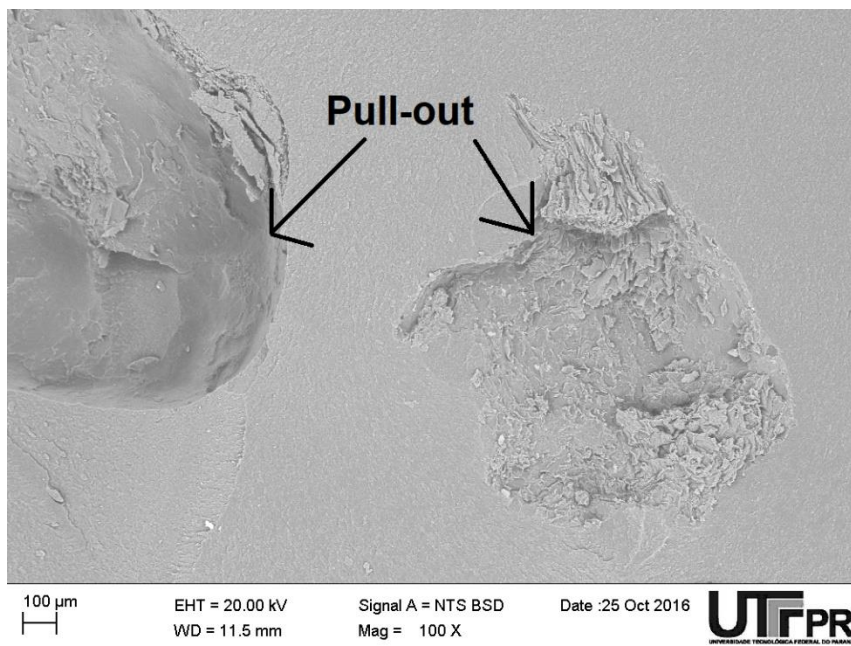
este comportamento é aparentemente uma consequência da fraca resistência na interface fibra/matriz.



**Figura 61 – Fractografia no MEV da amostra RP + 10% (PG)  
Fonte: Autoria própria.**

A Figura 61 apresenta a resina com 20% de partícula grande, observa-se o sinal de total arrancamento (*pull-out*) da partícula na matriz, o que indica também pouca aderência fibra/matriz. A razão para este comportamento é aparentemente uma consequência da fraca resistência na interface fibra/matriz.

Como observado por Barbosa (2011), um dos inconvenientes na utilização de fibras lignocelulósicas em matriz poliéster é sua natureza hidrofílica, devido à água absorvida na superfície da fibra. Assim, as matrizes de poliéster apresentam caráter hidrofóbico, formando uma fraca interação fibra/matriz.



**Figura 62 – Fractografia no MEV da amostra RP + 20% (PG)**  
**Fonte: Aatoria própria.**

Desse modo, pode-se concluir que não existe interação fibra/matriz, na produção dos compósitos com partícula grande, e que está partícula em todas as suas composições no compósito não aumenta as propriedades mecânicas do compósito.

#### 4.6 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DO FARELO DO SABUGO DE MILHO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados referentes às análises termogravimétricas das diferentes granulometrias do sabugo de milho, onde desejava-se observar em que temperatura as fibras do sabugo de milho iniciam a sua degradação.

A Figura 63 mostra a curva de termogravimétrica (TGA) para a amostra de partícula fina.

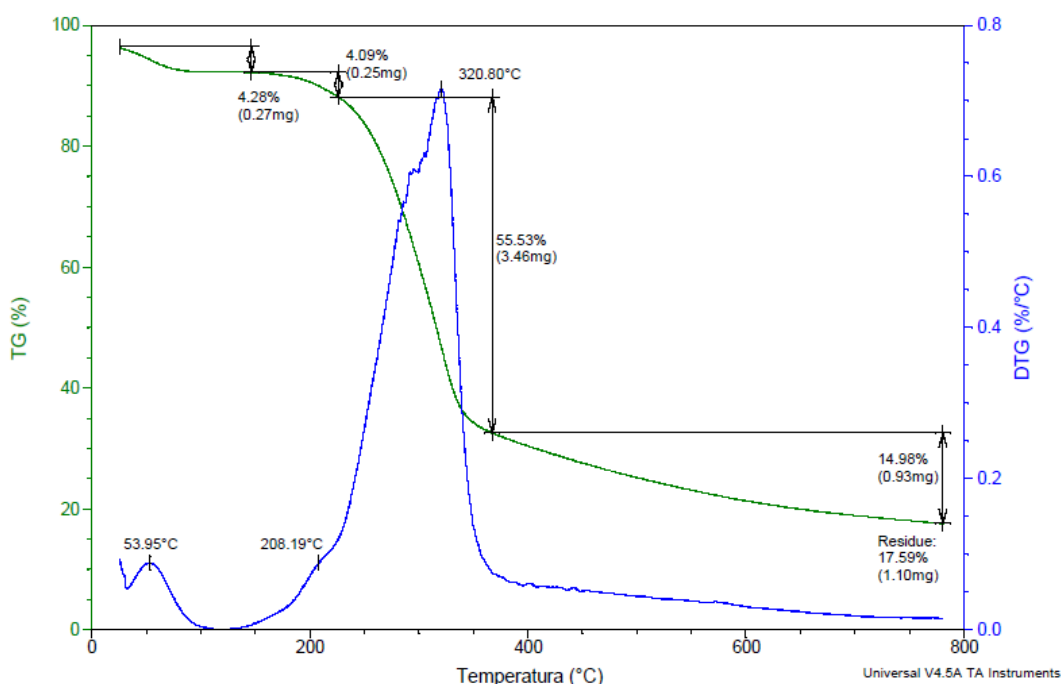
Nesta Figura, foram analisadas as perdas de massa em função da temperatura e a temperatura de pico em que há maior perda de massa.

Observa-se que a partícula fina tem uma perda de massa, na faixa da temperatura ambiente até 53,95°C, de 4,28%, atribuído à desidratação da partícula.

Entre as temperaturas de 53,95°C e 208,19°C, observa-se a perda de massa de 4,09%, início da decomposição da hemicelulose; comportamento também observado por Ramos (2013).

Verifica-se que a perda de maior porcentagem de massa, ocorre na temperatura de 320,80°C, que é de 55,53%, decomposição da celulose, em seguida ocorre a perda de 14,98%, entre as temperaturas de 320,80°C e 800°C, decomposição da lignina, sobrando assim um resíduo (*cinzas*) de 17,59%.

Pode-se então concluir que até 200°C a fibra perde 8,37% em massa, ou seja, ocorre a desidratação da partícula mostrando que a partícula fina possui boa estabilidade térmica até 200°C; depois de atingir esta temperatura a fibra começa a sofrer o processo de degradação térmica, onde já não é mais estável termicamente.



**Figura 63 - Curva termogravimétrica para partícula fina (PF)**

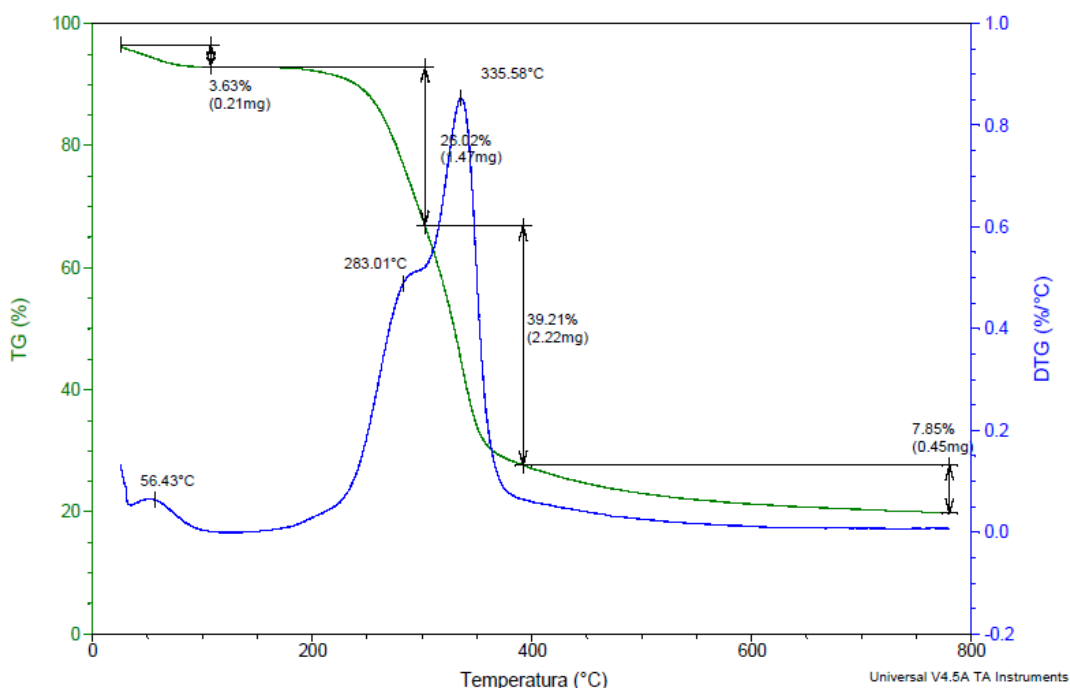
**Fonte: Autoria Própria.**

A Figura 64 mostra a curva termogravimétrica (TGA) para a amostra de partícula média. Nesta Figura, é possível observar que a partícula média tem uma perda de massa de 3,63%, à temperatura ambiente até 56,43°C, referente à desidratação da partícula; em seguida observa-se uma segunda perda de massa à

283,01°C, que é de 26,02%, esta perda de massa é referente a decomposição da hemicelulose.

Constata-se que a perda de maior porcentagem de massa ocorre, na faixa de temperatura de 335,58°C, que é de 39,21%, esta perda se relaciona à decomposição da celulose em seguida ocorre uma perda de 7,85% acima de 335,58°C, decomposição da lignina.

Observo se que até 200°C a fibra perde aproximadamente 3,63% em massa, mostrando que a partícula média possui boa estabilidade térmica até 200°C. Depois desta temperatura a fibra começa a sofrer o processo de degradação térmica, onde já não é mais estável termicamente.



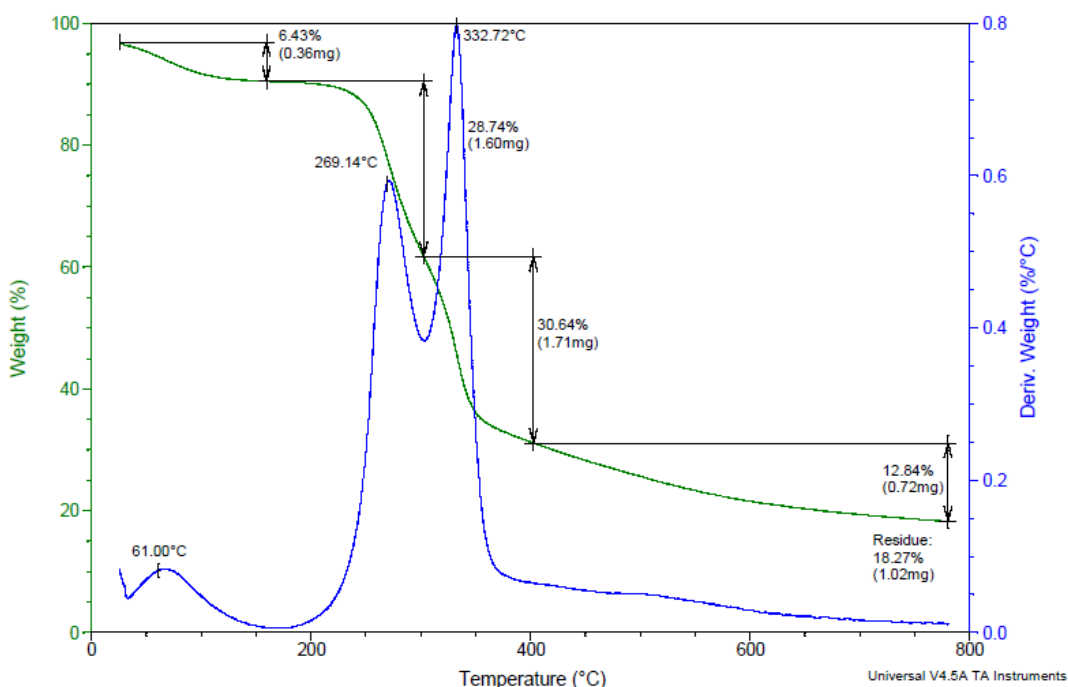
**Figura 64 - Curva termogravimétrica para partícula média (PM)**

Fonte: Autoria própria.

A Figura 65 apresenta a curva termogravimétrica (TGA) para a amostra de partícula grande. Nesta Figura pode-se observar, que a partícula grande tem uma perda de massa de 6,43%, entre a temperatura ambiente e 61°C, a qual é referente à desidratação da partícula. Logo na sequência verifica-se uma segunda perda de massa, na temperatura de 269,14°C, que é de 28,74%, esta perda de massa é referente a decomposição da hemicelulose.

Nota-se que a perda de maior porcentagem de massa ocorre à temperatura de 332,72°C, que é de 30,67%, esta perda de massa é referente a decomposição da celulose, em seguida ocorre a perda de 12,84%, na temperatura acima de 332,72°C, perda relacionada com a decomposição da lignina, restando assim um resíduo (*cinzas*), de 18,27%.

Pode ser também concluído que até 200°C a fibra perde aproximadamente 6,43% em massa, ou seja a desidratação, mostrando que a partícula grande possui boa estabilidade térmica até 200°C. Depois desta temperatura a fibra começa a sofrer o processo de degradação térmica, onde já não é mais estável termicamente.



**Figura 65 - Curva termogravimétrica para partícula grande (PG)**  
**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 66 apresenta as curvas termogravimétricas, respectivamente para todas as amostras das partículas do sabugo de milho.



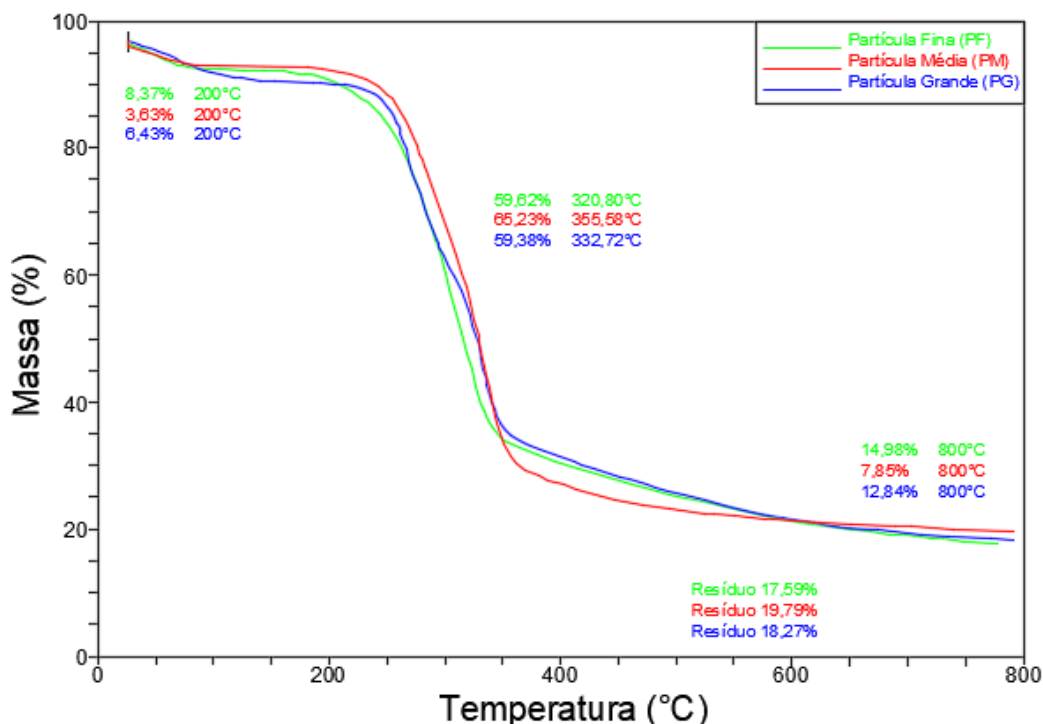


Figura 66 - Curvas termogravimétricas das partículas (PF, PM, PG) do sabugo de milho

Fonte: Autoria própria.

Conforme apresenta a Figura 66, pode-se concluir que o processo de degradação ocorreu entre 200°C a 355°C para todas as partículas. A perda de massa que corresponde à umidade ocorre na faixa da temperatura ambiente até 200°C, cerca de 8,37%.

As temperaturas de decomposição entre as partículas analisadas demonstraram que não há variações significativas, embora haja uma série de eventos térmicos que variam levemente de acordo com a granulometria das fibras do sabugo de milho, devido às suas diferentes estruturas e proporções de hemicelulose, celulose e lignina.

Segundo Ramos (2013), o sabugo de milho é composto por aproximadamente 34% de hemicelulose, 28% de lignina e 32% de celulose. De acordo com o autor, a decomposição da hemicelulose ocorre entre 240°C e 310°C, enquanto que a celulose se decompõe entre 310°C e 360°C.

Já a lignina é o componente mais estável dos compostos lignocelulósicos se decompondo entre 360°C e 550°C, (SATYANARAYANA *et al.*, 2013; BROWNING, 2003).



Segundo Neto (2014), que caracterizou compósitos de resina epóxi e fibras de taquara-lixo para aplicações estruturais, a alta estabilidade térmica das fibras pode ser relacionada ao alto índice de cristalinidade (59%) e ao alto teor de lignina da fibra (22,3% a 27,5%).

Sendo assim, pode-se concluir que o sabugo de milho tem um certo teor de cristalinidade, pois, como referenciado por Ramos (2013), o sabugo de milho é composto de 28% de lignina.

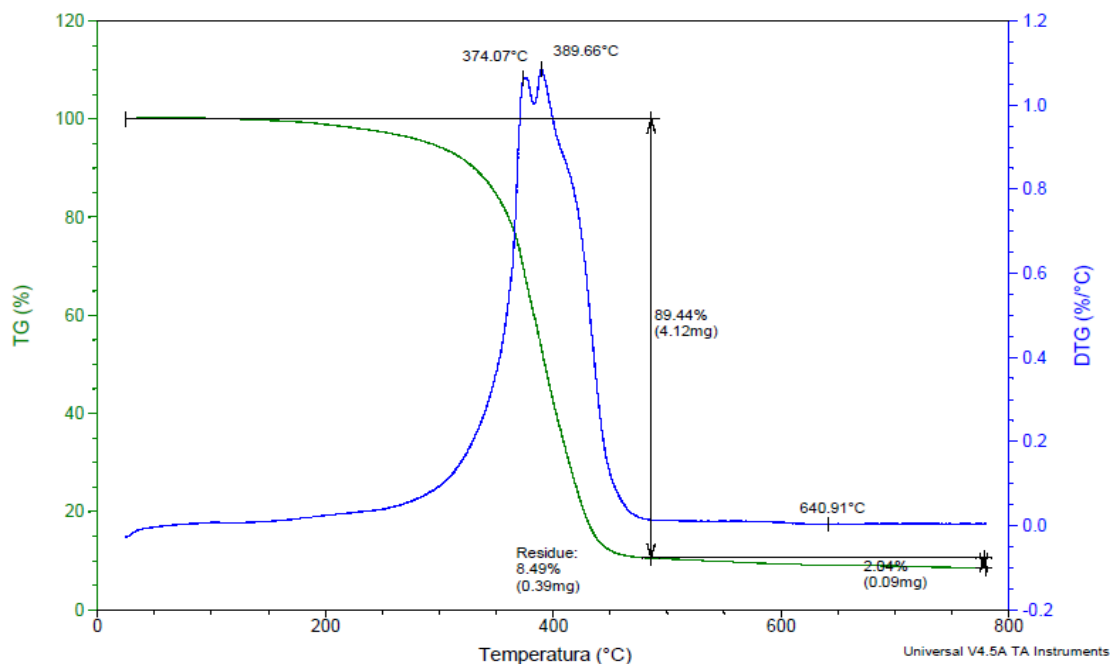
#### 4.7 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DOS COMPÓSITOS COM FARELO DO SABUGO DE MILHO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados referentes às análises termogravimétricas dos compósitos, onde desejava-se observar a influência das partículas do sabugo de milho e em que temperatura se inicia a sua degradação.

A Figura 67 apresenta o resultado termogravimétrico da resina de poliéster.

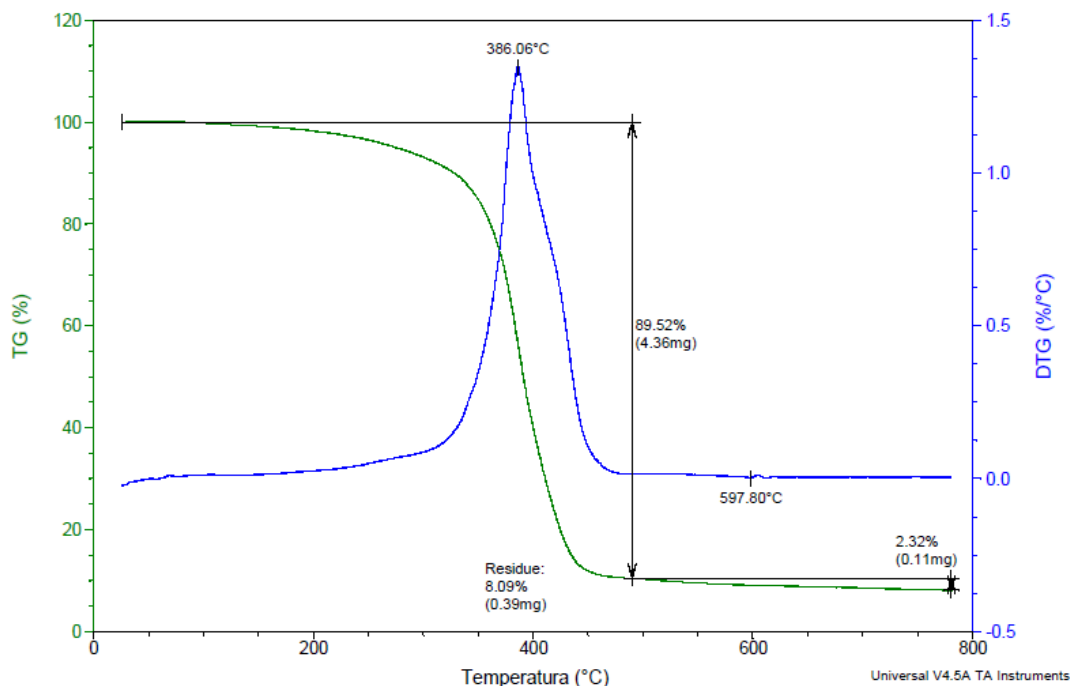
Nesta Figura, pode ser observado que não houve o primeiro estágio de degradação referente à perda de umidade, justificando o caráter hidrofóbico da resina (SANCHEZ *et al.*, 2010). A resina de poliéster é estável termicamente até 230°C, onde então se iniciou o seu processo de degradação térmica, chegando a perder até 90% de sua massa a 389,66°C. Na temperatura ainda mais elevada de 450°C a 800°C, ocorre uma outra perda de massa de 2,04%, sobrando um resíduo de 8,49%.

Segundo Barbosa (2011), este comportamento é esperado para polímero termofixos em que a degradação térmica inicia-se com a evolução de compostos voláteis seguido de quebra e despolimerização das cadeias moleculares.



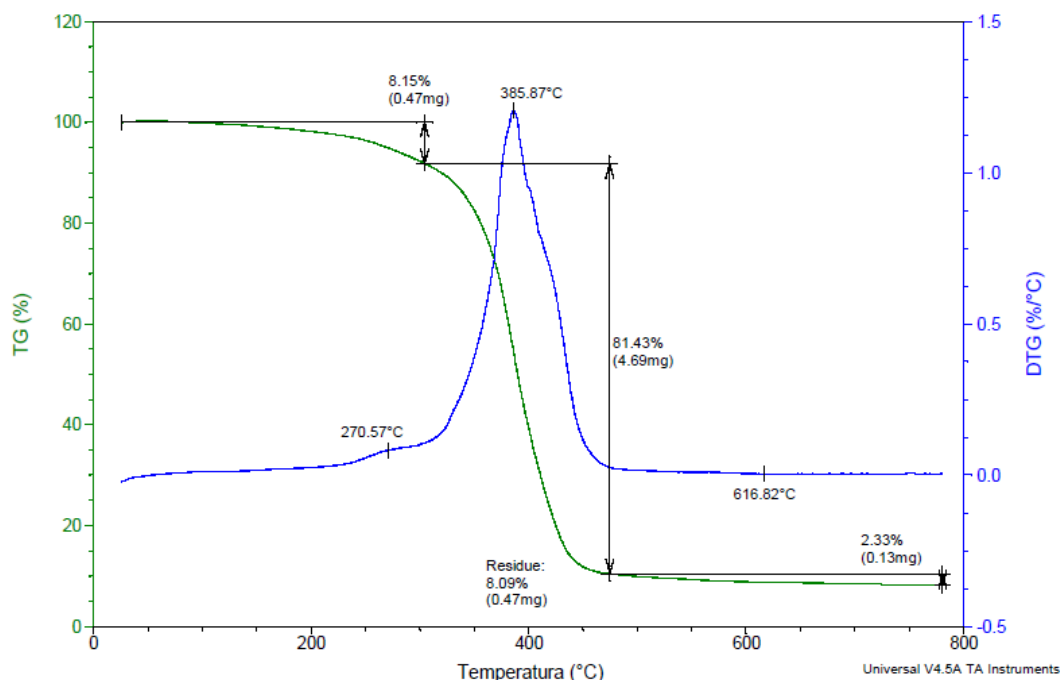
**Figura 67 - Curva termogravimétrica para resina poliéster pura**  
**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 68 mostra o resultado termogravimétrico para a o compósito com 5% de partícula fina. Pode-se observar que não houve o primeiro estágio de degradação referente à perda de umidade, o compósito em questão tem o seu comportamento térmico estável até 230°C. O processo de perda de massa, ocorre nas temperaturas de 230°C a 425°C, sendo que a maior perda de massa é de 89,52% em temperatura de 386,06°C, onde ocorre a decomposição da hemicelulose e da celulose da partícula fina. Em outro momento, na temperatura de 425°C a 800°C, constata-se perdas de massa em um lento declínio que corresponde a 2,32%, ou seja, a decomposição da lignina da partícula fina, sobrando assim um resíduo (*cinzas*) de 8,09%.



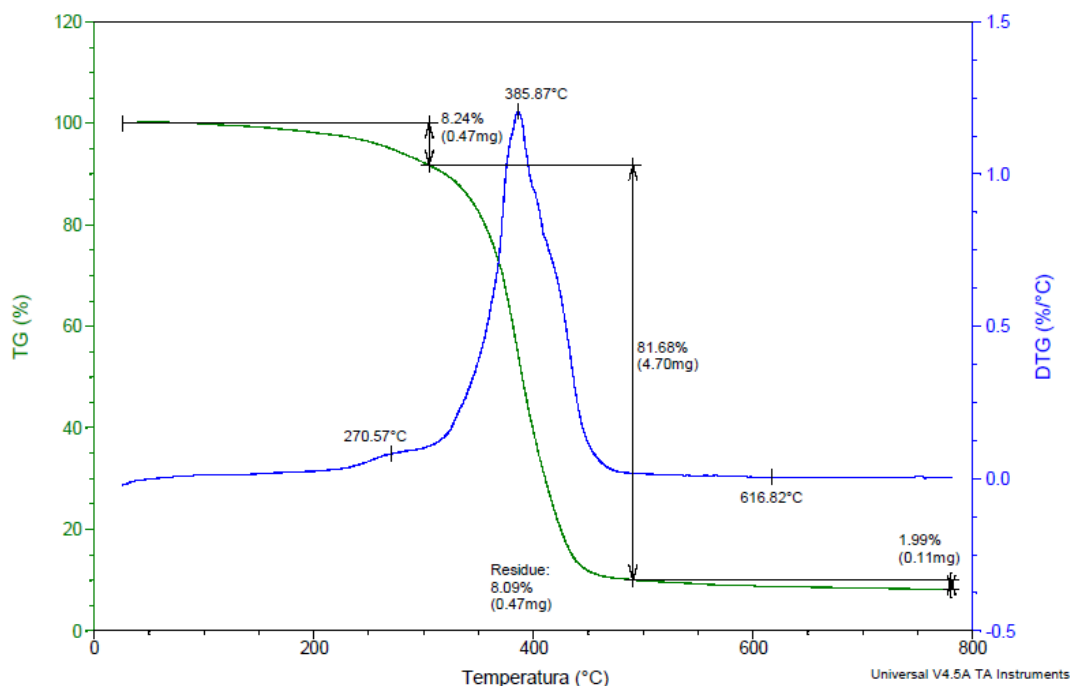
**Figura 68 - Curva termogravimétrica para o compósito com 5% PF**  
**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 69 apresenta o resultado termogravimétrico para a o compósito com 10% de partícula fina. Verifica-se que o compósito tem o seu comportamento térmico estável até 230°C, mas na temperatura de 270,57°C, ocorre uma perda de massa de 8,15%, esta perda está vinculada à desidratação da partícula. Após este processo, ocorre a perda de massa, nas temperaturas de 270,57°C a 425°C, sendo que é a maior perda de massa 81,43%, ocorre na temperatura de 385,87°C. Em outro momento, na temperatura de 425°C a 800°C, observa-se perda de massa em um lento declínio que corresponde a 2,33%, sobrando assim um resíduo (*cinzas*) de 8,09%.



**Figura 69 - Curva termogravimétrica para o compósito com 10% PF**  
**Fonte: Autoria própria.**

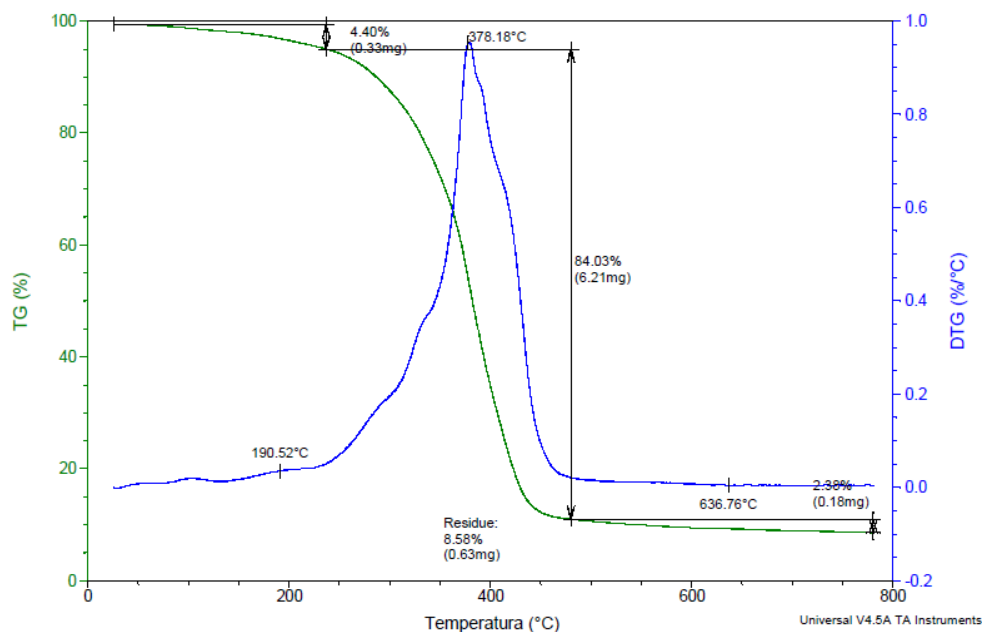
A Figura 70 mostra o resultado termogravimétrico para a o compósito com 5% de partícula média. Nota-se que o compósito tem o seu comportamento térmico estável até 230°C, mas na temperatura de 270,57°C, onde ocorre uma perda de massa de 8,24%, esta perda está vinculada à desidratação da partícula. Logo em seguida começa o processo de perda de massa, que ocorre nas temperaturas de 270,57°C a 425°C, sendo que a maior perda de massa é de 81,68% à temperatura de 385,87°C. Em outro momento, à temperatura de 425°C a 800°C, é percebida uma perda de massa em um lento declínio que corresponde a 1,99%, sobrando assim um resíduo (*cinzas*) de 8,09%.



**Figura 70 - Curva termogravimétrica para o compósito com 5% PM**  
**Fonte: Autoria própria.**

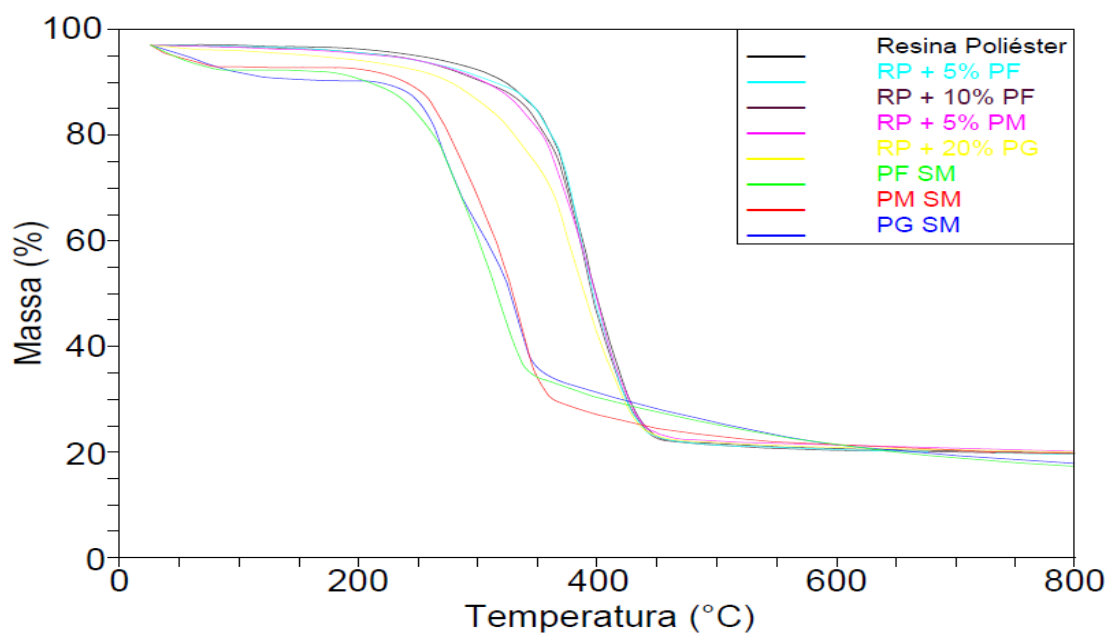
A Figura 71 apresenta o comportamento termogravimétrico para a o compósito com 20% de partícula grande. Por meio da análise pode ser visto que o compósito tem o seu comportamento térmico estável até 190,52°C, onde ocorre uma perda de massa de 4,40%. Esta perda é atribuída à eliminação de água da partícula, como citado anteriormente. Entre as temperaturas de 190,57°C a 425°C, percebe-se a perda de massa de 84,03%, sendo que está ocorre na temperatura de 378,18°C.

Em outro momento, na temperatura de 425°C a 800°C, é verificada a perda de massa em um lento declínio que corresponde a 2,38%, sobrando assim um resíduo (*cinzas*) de 8,58%.



**Figura 71 - Curva termogravimétrica para o compósito com 20% PG**  
**Fonte: Autoria própria.**

Visando determinar as temperaturas de início, fim e máximas de decomposição térmica a Figura 72, mostra as curvas termogravimétricas dos compósitos, nas composições com 5%, 10% de PF, 5% PM e 20% PG, onde foram comparadas com as curvas da resina pura e com as partículas do sabugo de milho.



**Figura 72 - Curvas termogravimétricas para a resina pura para os compósitos com 5%, 10% PF, 5% PM, 20% PG e as partículas do sabugo de milho**  
**Fonte: Autoria própria.**

Observa-se que as partículas do sabugo de milho (PF, PM, PG), se degradam entre 200°C e 355°C. Nesse estágio ocorre a decomposição dos principais constituintes do sabugo de milho (celulose, hemicelulose e lignina).

Em uma segunda análise, a resina pura e os compósitos com 5%, 10% de PF, e o compósito com 5% de PM, apresentam faixas de temperatura muito próximas. Percebe-se que até a temperatura de 230°C não ocorre degradação, ou seja, resina pura e os compósitos mostram a mesma estabilidade térmica. Já para o compósito com 20% de PG, a sua estabilidade térmica encontra-se entre 190°C a 230°C.

Segundo Ramos (2013), esta variação de temperatura de decomposição entre as granulometrias analisadas, é devido às diferentes estruturas e proporções de hemicelulose, celulose e lignina, que compõem a sabugo de milho.

De acordo com Ramos (2013), essa diferença de aproximadamente 40°C, não vai interferir na sua utilização como reforço no compósito.

Dessa forma, pode-se concluir que a presença de todas as partículas do sabugo de milho, não compromete a estabilidade térmica dos compósitos, até a temperatura de 230°C.

#### 4.8 ANÁLISE TÉRMICA

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados referentes às análises térmicas dos compósitos, mais precisamente a avaliação da condutividade térmica dos mesmos.

Segundo Mendes et al. (2012), pode-se encontrar disponível no mercado uma grande variedade de materiais isolantes térmicos, entre os quais pode-se citar: lã de vidro, lã de rocha, asbesto, poliuretano, poliestireno expandido (EPS), isolante refletivo etc. Apesar de tecnicamente eficientes, a maioria destes materiais apresenta a desvantagem de ter um preço de comercialização relativamente alto, além de não se integrar de modo inócuo à natureza quando nela descartados. Dessa forma, surgiram os compósitos à base de fibras vegetais. O uso de materiais vegetais na produção de compósitos poliméricos é uma alternativa interessante por se tratar

de recursos renováveis, leves, recicláveis, biodegradáveis e, principalmente de baixo custo.

Para o levantamento das propriedades térmicas, especificamente a condutividade térmica deste compósito, foi utilizado o método de dispositivo de placa quente compensada, no qual é embasado no procedimento ANSI/ASTM C 177-76.

A Tabela 17 apresenta os resultados do comportamento térmico do material compósito estudado, ou seja, a condutividade térmica.

As análises aqui realizadas foram feitas na resina pura, e nos compósitos cujo os valores de resistência à tração mais se aproximaram da resina pura (RP). Os compósitos contêm 5% de PF, 10% de PF e 5% de PM e também foi realizado no compósito com 20% de PG, pois se trata de uma partícula maior e mais porosa comparada com às demais.

**Tabela 17 - Propriedades térmicas obtidas por método de dispositivo de placa quente compensada em função do percentual dos particulado nos compósitos.**

Volume de fibra de sabugo de milho (%)	Placa direita condutividade térmica (W/m.k)	Placa esquerda condutividade térmica (W/m.k)	Resultado da condutividade térmica (W/m.k)
RP 0%	0,1710	0,1710	0,171
PF 5%	0,1379	0,1380	0,138
PF 10%	0,1359	0,1360	0,136
PM 5%	0,1429	0,1430	0,143
PG 20%	0,1599	0,1600	0,160

Fonte: Autoria própria.

Observa-se a clara contribuição das partículas do sabugo de milho na potencialização do polímero como isolante térmico, pois nota-se uma tendência acentuada na redução dos valores de condutividade térmica no compósito à medida que houve a inserção das partículas e consequente aumento no teor da fibra. Esse comportamento pode ser observado ao compararmos os compósitos com 5% de PF e 10% de PF em relação à resina pura (RP).

Ressalta-se que os valores para condutividade térmica dos compósitos com 5% de PF e 10% de PF são próximos; o compósito com 10% de PF apresenta



um valor menor comparado ao compósito com 5% de PF, apenas 1,5% na sua redução e, portanto, não o faz significativamente mais isolante térmico do que o compósito com 5% de PF.

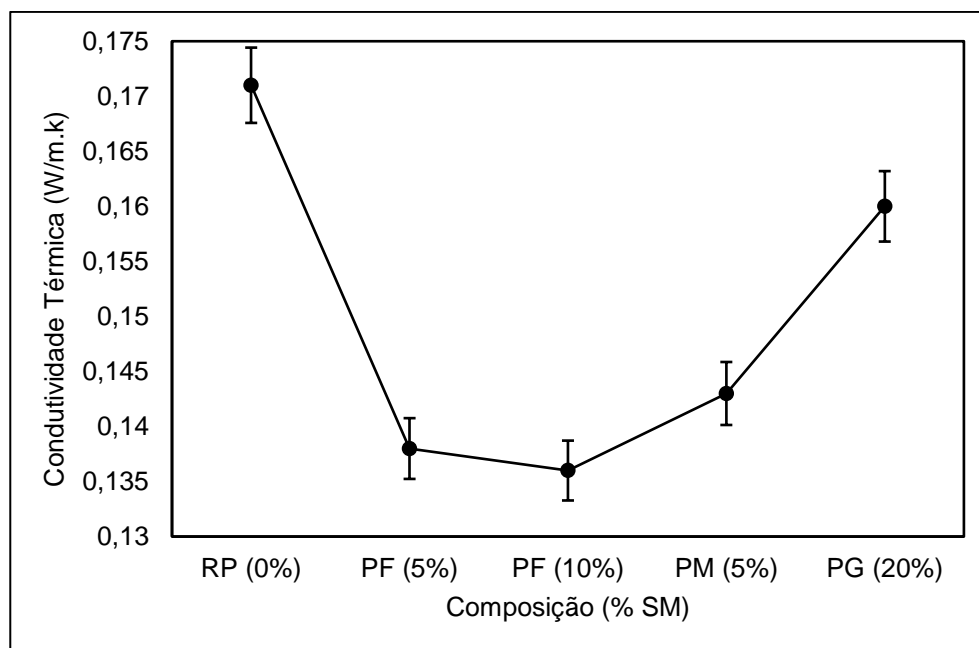
Entretanto, o mesmo comportamento não foi observado nos compósitos com 5% de PM e 20% de PG, pois os mesmos apresentaram valores discrepantes, ou seja, não lineares.

Provavelmente isto pode ter acontecido devido ao fato da granulometria das partículas, ou seja, o tamanho destas partículas, também pode ter influenciado na condutividade térmica.

Segundo Prevedello (2014), que realizou estudos das propriedades térmicas e da cinética de cristalização de compósitos de polipropileno com grafite e negro fumo, conclui-se que o aumento da condutividade térmica dos compósitos se dá com o aumento das partículas da fibra, fato este resultante da facilidade ou não encontrada para a formação de caminhos condutores, da adesão interfacial matriz/reforço e até mesmo da sinergia entre os componentes do sistema.

Da mesma forma, Serkan et al. (2007), que estudaram os efeitos na condutividade térmica de um compósito polimérico reforçados com partículas de cobre, observou-se que quanto maior o tamanho da partícula, maior é a condutividade térmica.

A Figura 73 apresenta um diagrama da variação da condutividade térmica em função do volume das partículas finas, médias e grandes inseridas na matriz.



**Figura 73 - Diagrama da variação da condutividade térmica da RP e dos compósitos com 5%, 10% PF, 5% PM e 20% PG**  
**Autoria própria.**

Analisando a Figura 73, é possível verificar que as partículas de sabugo de milho influenciaram positivamente na condutividade térmica da resina pura. Os compósitos que obtiveram os menores valores de condutividade térmica foram, os com 5% de PF e 10% de PF, os quais apresentaram uma redução na condutividade térmica de 19,3% e 20,5% respectivamente. Este resultado é bastante significativo se comparado ao da resina pura.

Da mesma forma Oliveira (2015), analisou a condutividade térmica do seu compósito com carga de farelo de sabugo de milho com 20% de PF em uma matriz polimérica e chegou à uma conclusão de que a condutividade térmica do seu compósito é 19% menor comparada à sua matriz polimérica, classificando-a como um isolante térmico com 0,186 W/m.k.

Mota (2016), analisou a condutividade térmica de compósitos poliméricos com cargas de bucha vegetal e chegou à uma conclusão de que a capacidade térmica do compósito é menor se comparada à resina em função da influência da fibra.

Santos (2015), estudou o desenvolvimento e a caracterização de biocompósito de látex (borracha natural) e fibra de carnaúba, com diferentes

porcentagens e conclui que a condutividade térmica do seu biocompósito é de 28% se comparada à sua matriz polimérica.

Os dados apresentados neste trabalho estão coerentes para a indicação desse compósito como isolante térmico. Conforme já dito por (WANG, 1988 apud Cravo, 2013), para ser isolante térmico, o material deve apresentar condutividade térmica menor que 0,25 W/m.k.

De acordo com Oliveira (2015), o compósito polimérico pode ser classificado como um isolante térmico, aqueles que apresentam valores abaixo de 0,21 W/m.k.

Segundo Callister (2015), as condutividades térmicas para a maioria dos polímeros são da ordem de 0,3 W/m.k.

Em relação aos compósitos já estudados e apresentados pela literatura de materiais isolantes térmicos, o compósito estudado nesta dissertação apresentou uma condutividade térmica inferior a 0,21 W/m.k, ou seja, na ordem de 0,136 W/m.k.

Como já citado neste trabalho, é importante salientar que a adição das partículas de sabugo de milho, mesmo provocando uma deterioração em algumas propriedades mecânicas, em outras é vista como vantagem. Pode-se dizer também, que a substituição de uma matéria prima não degradável por uma outra de baixo custo e biodegradável é uma vantagem.

A combinação da matéria prima utilizada e a quantidade poderá resultar em compósitos com propriedades projetadas sob medida para várias aplicações como por exemplos isolantes térmicos, com a vantagem da redução do impacto ambiental pela adição de uma carga ecologicamente correta.

## 5 CONCLUSÕES

Conforme os estudos realizados neste trabalho, foram levantados dados suficientes para concluir que:

- Como em todos os compósitos a fase inserida na matriz, na grande maioria das vezes, vem influenciar nas suas propriedades de modo geral. No presente trabalho, tivemos um importante resultado onde a fase inserida contribuiu para que o material compósito possa ser indicado e utilizado como um isolante térmico.

- Perante as três granulometrias utilizadas nos compósitos, as mesmas se apresentaram como material de enchimento, uma vez que todos os compósitos apresentaram resistência mecânica à tração, resistência mecânica à flexão e resistência ao impacto inferiores à da matriz à medida em que se aumenta a granulometria e a porcentagem de carga no compósito há um decréscimo em sua resistência e um aumento no módulo de elasticidade.

- Porém, se compararmos os resultados dos três ensaios mecânicos realizados, o que obteve valores bem mais significativos de resistência à tensão comprada à resina pura (RP) foi o ensaio de impacto Izod com cerca de 11% na redução, em seguida se apresenta o ensaio de flexão com 21% na redução e por fim o ensaio de tração com 24,5%.

- Nas amostras onde foram inseridas as partículas finas (PF), os resultados das propriedades mecânicas apresentados foram os que mais se aproximaram da resina pura (RP), que na análise via MEV comprovou boa adesão entre reforço/matriz.

- As análises via MEV mostraram que, mesmo o processo sendo manual na produção dos corpos de prova, os compósitos com 5% e 10% de partículas finas são os que apresentam maior distribuição e adesão reforço/matriz, já na formulação com 20% observou-se a ocorrência de bolhas e poros.

- Para as amostras de resina com partícula média (PM) 5%, 10% e 20%, foram observadas no MEV, sinais de arrancamento (*pull-out*) do extrato (grânulo de milho) da matriz, o que indica pouca adesão fibra/matriz.

- Para as amostras de resina com partícula grande (PG) 5%, 10% e 20% houve sinais de total arrancamento (*pull-out*) da partícula na matriz, o que indica pouca ou nenhuma interação fibra/matriz e baixo grau de molhabilidade, sugerindo uma má fixação da carga na matriz e não obtendo uma efetiva transmissão de energia mecânica entre reforço/matriz.

- Conforme as análises termogravimétricas dos compósitos com 5%, 10% de partícula fina, 5% de partícula média e 20% de partícula grande, comparadas à resina pura, foi possível observar que as mesmas iniciaram uma degradação térmica em torno de 230°C, exceto o compósito com 20% de partícula grande que apresentou um comportamento térmico estável até 190,57°C.

- Portanto, as partículas finas e as partículas médias podem ser adicionadas como carga de enchimento na matriz polimérica, levando os compósitos a suportarem temperaturas até 230°C, o que leva a uma possibilidade da aplicabilidade deste material em elementos como juntas para motores, rotores e bombas, que atingem no máximo temperaturas de 200°C.

- No entanto, pode-se concluir que a presença das partículas não compromete a estabilidade térmica dos compósitos, o que mostra que os compósitos aqui analisados, comparados à matriz polimérica, são eficientes como isolantes térmicos, pois os compósitos que apresentaram os menores valores de condutividade térmica foram os compósitos com partículas finas (PF), com valores de 0,138 W/m.k.

## 6 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos posteriores nesta mesma linha de pesquisa pode-se mencionar:

- Analisar o compósito obtido através dos ensaios de compressão e dureza;
- Avaliar o efeito da adição de agentes compatibilizantes nas propriedades dos compósitos como forma de melhorar a adesão carga/matriz;
- Caracterização térmica do compósito por calorimetria exploratória diferencial (DSC);
- Avaliar as propriedades de isolamento acústico de compósitos de resina de poliéster com sabugo de milho variando as fases granulométricas;
- Ensaiai a absorção do compósito em contato com a água, ou óleo;
- Realizar análise de envelhecimento do compósito;
- Caracterização química do sabugo de milho;
- Avaliar a possibilidade da aplicabilidade deste material em elementos como juntas para motores, rotores e bombas.

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, C. M. **Hidrólise enzimática de resíduos lignocelulósicos utilizando celulases produzidas pelo fungo *Aspergillus niger***. Dissertação de Engenharia Química. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. D 256 – **Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics**. Pennsylvania: ASTM, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. D 256 – **Standard Test Method for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**. Pennsylvania: ASTM, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, D 790 – **Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating**. ASTM, Pennsylvania: 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. D 638 – **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. Pennsylvania: ASTM, 2016.

ASTM E1131 - **Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry**. ASTM, 2014

ANSI/ASTM C 177-76 – **“Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot Plate”**. ASTM, 1976.

ASOKAN, P.; FIDOOUS, M.; SONAL, W. **Properties and potential of bio fibers, bio binders, and bio composites**. Rev. Adv. Mater. Sci. 30 (2012) 254-261

BARBOSA, A. P., **Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de buriti**. Tese de Engenharia e Ciências de Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense. 2011.

BRAMBILLA, V., C., **Avaliação das propriedades mecânicas, térmicas, morfológicas e degradação de compósitos de poli (ácido láctico) /buriti**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologias. Universidade de Caxias do Sul. 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e abastecimento. **Ralação das unidades produtoras cadastradas no departamento de cana de açúcar e agroenergia**, 2015, Disponível em [http://www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/file/Desenvolvimento\\_Sustentavel/Agroenergia/Orientações\\_Tecnicas/Usinas%20e%20Destilarias%20Cadastradas/DADOS\\_PRODUTORES\\_23-08-2013.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/Orientações_Tecnicas/Usinas%20e%20Destilarias%20Cadastradas/DADOS_PRODUTORES_23-08-2013.pdf). Acesso em: 15 dez. 2016.

BROWNING, B. L. **The Chemistry of Wood**. New York, Interscience, 689 p. 2003.  
BEVITORI, A.B., **Avaliação das propriedades e estrutura de fibras de rami e seus compósitos poliméricos**. Tese de doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense. 2014.

CANDIDO, V. S. **Caracterização e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar**. Tese apresentada para obtenção do título de Doutorado em Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia. 2014.

CALLISTER, W. D. Jr. Livro: **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8 eds. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. Editora LTC. 2015.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de Grãos**. Ano base 2014, 2015. Disponível em [http://www.vonab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15\\_06\\_11\\_09\\_00\\_38boletim\\_graos\\_junho\\_2015.pdf](http://www.vonab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_06_11_09_00_38boletim_graos_junho_2015.pdf) . Acessado em: out. 2016.

COSTA, D. S. da.; LOURINHO, R. G.; EL BANNA, W. R.; FUJIYAMA, R. T. **Resistência à Tração de Compósitos Poliméricos Reforçados com Híbrido de Fibras de Sisal e Carga de Açaí**. In: Anais do 20º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Joinville, 2012.

CRAVO, J. C. M. **Compósito particulado de baixa densidade com casca de amendoim, fibra de coco verde e resina poliuretana á base de óleo de mamona para aplicação como forro de galpões avícola**. Dissertação Mestrado. Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos. Universidade de São Paulo. Pirassununga. 2013.

DALIBOR, I.H., **A influência de cargas particuladas nas propriedades mecânicas de compósitos poliméricos**. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas – CCT. 2013.



FALUDI, G. et. al, **Biocomposite from polylactic acid and lignocellulosic fibers: structure-property correlations**. Carbohydrate polymers. 2012.

FERRAREZI, R. B., **Determinação da condutividade térmica de materiais sólidos usando um dispositivo de placa quente compensada**. Relatório Técnico projeto de pesquisa de iniciação científica na área de ciências térmicas. Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia mecânica. Ilha Solteira. 2005.

FIGUEIREDO, L. F., **Compósitos de polietileno de ultra – alto peso molecular (PEUAPM) e quasicristal (Al Cu Fe): comportamento térmico e mecânico**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2013.

FILHO, C. A. P. Q. L., **Desenvolvimento e caracterização de um compósito a partir da borra da piaçava para construção da parábola de um fogão solar a concentração**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2013.

FOLEY, K. M. VANDER-HOOVEN, D. I. B. **Properties and industrial uses of corncobs**, In: POMERANZ, Y. MUNCK, L. Cereals - renewable resource. The American Association of Cereal Chemists, St. Paul. 1981

FORD, E. L. C. P. **Desenvolvimento de material compósito a bases de raspa de pneu e látex para isolamento térmico**. Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2011.

FORD, E. T. L. C. et al. **Material compósito com raspa de pneu e látex para isolamento térmico**. Engenharia Civil. V. 37, P. 27 – 35. 2010.

GALVÃO, A. C. P. **Obtenção e Caracterização de um Compósito de Poliuretano de Mamona e Pó de Vidro para Aplicações em Isolantes Térmicos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2012.

GARCIA, A. SPIM, J. A. SANTOS, C. A. **Ensaio de Materiais**. 1 edição. Rio de Janeiro, Ed: LTC. 2000.

GEHLEN, L. R. **Efeito da utilização de fibras lignocelulósicas (açáí e curauá) em compósitos com matriz de resina poliéster insaturado**. Dissertação de Mestrado, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2014.

GOMES, J. W., GODOI, G. S., SOUZA, L. M e SOUZA, L. V. **Absorção de água e propriedades mecânicas de compósitos poliméricos utilizando resíduos de MDF.** Polímeros vol.27 no.spe São Carlos 2016 Epub 16-Mar-2016.  
<http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1915.2016>

GOMES, M. A. **Propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de folhas de abacaxizeiro (PALF).** Tese apresentado para obtenção de Título de Doutor em Engenharia dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. 2015.

HILLIG, É. et al. **Caracterização de compósitos produzidos com polietileno de alta densidade (HDPE) e serragem da indústria moveleira.** Ciência Florestal, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 335-347, abr.-jun., 2011

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVIANE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa.** 6ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

JESUS, L. C. C. **Obtenção e caracterização de compósitos de poliestireno expandido pós-consumo reforçados com celulose de bagaço de cana-de-açúcar.** Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia. Universidade de Brasília Faculdade UnB Gama / Faculdade de Tecnologia. 2014.

KLEINGESINDS, E. K. **Avaliação da hidrólise enzimática do sabugo de milho pré-tratado com ácido diluído e surfactante para a obtenção de bioetanol.** Dissertação de (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial na Área de Microbiologia Aplicada). Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. 2017.

LEVY, N. F. E. PARDINE, L. C. **Compósitos Estruturais, Ciências e tecnologia.** São Paulo, Edgard Blucher. 2006.

LOPES, M. M. **Avaliação do hidrolisado hemicelulósico de sabugo de milho suplementado com proteína de farelo de soja solubilizada para obtenção de bioetanol.** Dissertação de (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial na Área de Microbiologia Aplicada). Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. 2015.

MOTA, M. K. F. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de bucha vegetal (luffa cylindrica).** Tese de Doutorado em Engenharia de Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2016.

MENDES, J. U. L. et al. **Determinação da difusividade térmica de um compósito natural visando classifica-lo como isolante térmico.** 20º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 04 a 08 de novembro de 2012, Joinville, SC, Brasil. 2012.

NETO, M. C. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de palha de aço.** Tese apresentada para obtenção de título de Doutor pelo Centro de Tecnologia, programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2016.

OBASI, H. C. **Studies on biodegradability and mechanical properties of high density polyethylene/corn cob flour based composites.** International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 3 (8). 2012.

OLADELE I. O., AGBABIAKA O. G., **Effect of Alkalization of sponge fiber on the mechanical and water absorption properties of reinforced polypropylene composites,** The Journal of the Association of Professional Engineers of Trinidad and Tobago. 2015.

OLIVEIRA, M. L., **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de resíduos vegetal proveniente do sabugo de milho.** Dissertação em Engenharia de Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2015.

PREVEDELLO, A. L. A. **Estudo das propriedades térmicas e da cinética de cristalização de compósitos de polipropileno com grafite e negro de fumo.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014.

RAMOS, R. R. F. **Desenvolvimento de Compósitos de Polipropileno (PP) com Sabugo de Milho (SM) Proveniente de Resíduos Agrícolas.** Dissertação em Ciência e Engenharia dos materiais. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

Ribeiro M. M, R. T. Fujiyama. **Comportamento Mecânico de Material Compósito de matriz poliéster reforçado por resíduos de madeira.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica / Mestrado em Engenharia Mecânica – UFFPA. 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cuiabá. MT. 2014.

REDIGHIERI. K. I. E COSTA, D.A. **Propriedades mecânicas e absorção de água dos compósitos de pebdrec e partículas de madeira de reflorestamento,**

Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra, Seropédica, RJ, EDUR, v. 25, n. 1, p.28-35. 2006.

RODRIGUES, A. **Estudo da compatibilização de compósitos de polipropileno e farinha madeira com polipropileno enxertado com ácido acrílico e anidrido maleico.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Ponta Grossa, PR. 2011.

ROSA, S. L. **Estudo das propriedades de compósitos de polipropileno com casca de arroz.** Dissertação Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007

ROWELL, R. M. et al. **Utilization of Natural Fibers in Plastic Composites: Problems and Opportunities.** University of Wisconsin, 1997.

SANTOS, L. M. P. **Desenvolvimento e caracterização de biocompósitos de látex (borracha natural) e fibra de carnaúba.** Dissertação de Mestrado pelo Centro de Tecnologia., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2015.

SATYANARAYANA, K.G.; FLORES-SAHAGUN, T.H.S.; SANTOS, L.P.D.; SANTOS, J.D.; MAZZARO, I.; MIKOWSKI, A. Characterization of blue agave bagasse fibers of México. **Composites: Part A**, V. 45, p. 153-161. 2013.

SERKAN, H. TEKCE, D. K. AND ISMAIL H. T. **Effect of Particle Shape on Thermal Conductivity of Copper Reinforced Polymer Composites.** Journal of REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES, Vol. 26, No. 1/2007

SILVA, C. C., **Influência da umidade nas propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos híbridos (sisal / vidro).** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2012.

SILVA, H. S. P., **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de carauá e híbridos com fibras de vidro.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2010.

SILVA, I. L. A., **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta.** Tese apresentado para obtenção do

título de Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais ao Centro de Ciência e Tecnologia. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. 2014.

SOUZA, C. R. N. **Estudo da condutividade térmica do gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) em função de sua porosidade**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais). Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro. 2015

THOMAZONI, A. L. R.; TORRES, R. G.; SANTOS R. **Medição da Condutividade em uma amostra de alumínio**. Trabalho Final de Medições Térmicas, Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre. 2010

VERMA, D.; GOPE, P.C.; MAHESHWARI, M.K.; SHARMA, R.K. **Bagasse Fiber Composites - A Review**. J. Mater. Environ. Sci. 3 (6), 1079-1092. 2012.

ZHANG, Y. LEE. J, RHEE. J, M. **Polypropylene-clay nanocomposites prepared by in situ grafting-intercalating in melt**. Composites Science and Technology, v. 64. P. 1383-1389. 2004

ZIGLIO, B. R. B. et. al.,. **Elaboração de pães com adição de farinha de sabugo de milho**, RECEN-Revista Ciências Exatas e Naturais, 9 (1). 2009.