

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

FERNANDA GUERRA LIMA MEDEIROS BORSAGLI

**CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA, ESPECTROSCÓPICA E MECÂNICA DE UM
COMPÓSITO A BASE DE POLI (TEREFTALATO DE ETILENO) COM ADIÇÃO
DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA POTENCIAL APLICAÇÃO COMO
ISOLANTE**

BELO HORIZONTE

2013

FERNANDA GUERRA LIMA MEDEIROS BORSAGLI

**CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA, ESPECTROSCÓPICA E MECÂNICA DE UM
COMPÓSITO A BASE DE POLI (TEREFTALATO DE ETILENO) COM ADIÇÃO
DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA POTENCIAL APLICAÇÃO COMO
ISOLANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso do curso de graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador : Prof. Dr. André Guimarães Ferreira

BELO HORIZONTE

2013

FERNANDA GUERRA LIMA MEDEIROS BORSAGLI

**CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA, ESPECTROSCÓPICA E MECÂNICA DE UM
COMPÓSITO A BASE DE POLI (TEREFTALATO DE ETILENO) COM ADIÇÃO
DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA POTENCIAL APLICAÇÃO COMO
ISOLANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso no curso de graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 22/08/2013

BANCA EXAMINADORA

Professor Dr. André Guimarães Ferreira – Orientador

Professor Dr. Ezequiel de Souza Costa Júnior

Professor Dr. Claudinei Rezende Calado

Professor Msc. Wanderlei Ferreira de Freitas

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Dr. André Guimarães Ferreira, por acreditar no meu potencial, confiar na ideia e investir nesse trabalho.

A empresa ELEKEIROZ, por fornecer materiais necessários ao trabalho e se mostrar cordial a qualquer apoio necessário em relação aos ensaios que foram realizados.

Ao aluno do mestrado em Energia, do Departamento de Engenharia Mecânica do CEFET-MG, Rômulo Xavier, por dar suporte nas referências necessárias com relação ao trabalho.

A Professora Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa, por suporte junto ao Departamento de Engenharia de Materiais, com relação a uso de equipamentos e intermediações necessárias.

Ao Professor Msc. Joel Romano, pelo suporte necessário a utilização do equipamento necessário à fabricação dos corpos de prova desse trabalho.

Ao Departamento de Materiais, assim como ao chefe do Departamento Professor Dr. Ezequiel Souza Costa Junior, pela disponibilidade dos laboratórios para a realização dessa empreitada.

Ao Professor Dr. Rodrigo Oréfica por disponibilizar o uso dos equipamentos do laboratório de polímeros da Faculdade de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais.

Ao Departamento de Química do CEFET-MG, em especial ao técnico do laboratório Alisson Silva, por realizar ensaios necessários nas amostras auxiliando no prosseguimento desse trabalho.

Aos meus pais, Sonia Guerra Lima Medeiros e Ubiratan Pereira de Medeiros, por me apoiarem nessa etapa da vida, acreditando na minha capacidade e dando todo o apoio necessário.

E, por último, ao meu querido esposo, Alessandro Borsagli, pela paciência nas horas dedicadas a esse trabalho, pelo amor e pelo suporte necessário a toda minha carreira acadêmica.

RESUMO

Mudanças econômicas tem ocorrido no mundo todo e isso tem demandado modificações na forma de manipulações de grande parte dos materiais. Dentro desse foco, é cada vez mais crescente a preocupação com o destino de resíduos da agroindústria, visto que esse representa um grande impacto ambiental. Dessa forma, a tentativa de buscar novas alternativas que possibilitem o uso desses materiais é uma área promissora da engenharia de materiais. Nessa direção, o presente trabalho propõe uma análise das propriedades térmicas e mecânica do poli (tereftalato de etileno) – PET, com a adição do bagaço de cana-de-açúcar para a criação de um material isolante térmico. Para isso, primeiramente, caracterizou-se as matérias primas (PET e bagaço de cana) em seu estado natural, depois da trituração do PET e do bagaço, esse último tendo lavagem em água destilada e secagem pelo tempo de 48 horas e assim, obter a mistura de ambos nas proporções de 10%, 15% e 20% de bagaço na matriz de PET, utilizando glicerina como plastificante, fabricando os corpos de prova por compressão térmica. Depois, a caracterização microestrutural por meio de MEV e FTIR, análise das propriedades térmicas, TGA e DSC, além da análise da propriedade mecânica de resistência à tração e alongamento. Os resultados indicam que a proporção de 15% de bagaço apresentou as melhores propriedades, assim como o plastificante usado não proporcionou a adesão/interação adequada aos materiais envolvidos. Além disso, o material apresentou características indicativas de sua boa aplicação como isolante estrutural. Por fim, a produção do compósito por compressão térmica foi viável, com indícios que o levam a ser um bom isolante, ainda que melhorias no processo tenham que ser realizadas.

Palavras-chaves : Bagaço de cana-de-açúcar. PET. Análises térmicas. Análise mecânica.

ABSTRACT

Economic changes have occurred in the world and this has required changes in the form of manipulations of most materials. Within this focus, is increasingly growing concern about the fate of agro-industrial residues, since this represents a major environmental impact. Thus, the attempt to seek new alternatives that enable the use of these materials is a promising area of materials engineering. In this direction, this paper proposes an analysis of the thermal and mechanical properties of poly (ethylene terephthalate) - PET, with the addition of crushed cane sugar to create an insulating material. To do this, first, characterized raw materials (PET and bagasse) in its natural state, after crushing the PET and bagasse, washing in distilled water and drying the bagasse of sugar by the time 48 hours, thereby obtaining a mixture of both in the proportions 10%, 15% and 20% of the bagasse PET using glycerin as a plasticizer, making the specimens by thermal compression. Then microstructural characterization by MEV and FTIR analysis of the thermal properties, DSC and TGA, as well as analysis of the mechanical properties of tensile strength. The results indicate that the ratio of 15% bagasse showed the best properties, as well as the plasticizer used did not allow the adhesion / interaction appropriate to the materials involved. In addition, the material presented characteristics indicative of its good application as insulating structural. Finally, the production of the composite by thermal compression was feasible, with evidence that lead to a good insulator, although improvements in the process have to be carried out.

Keywords : Cane bagasse sugar. PET. Analysis thermal. Analysi mechanical.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa brasileiro das áreas aptas à produção de cana-de-açúcar.....	16
Figura 2 – Foto ilustrativa do volume de garrafas PET num aterro sanitário no Brasil.....	16
Figura 3 – Foto ilustrativa do modelo da Lotus em 1978.....	18
Figura 4 – Foto ilustrativa das mantas usadas como subcoberturas.....	20
Figura 5 – Ilustração do volume de controle diferencial segundo a metodologia descrita acima.....	25
Figura 6 – Foto ilustrativa da resistência de contato	26
Figura 7 – a) Foto ilustrativa de um compósito com fibras; b) Foto ilustrativa de um esquema de um laminado; c) Foto de uma microscopia eletrônica de um compósito particulado.....	29
Figura 8 – a) Foto ilustrativa de fibras paralelas em relação ao um eixo (1); b) Foto ilustrativa de fibras dispersas em relação ao eixo.....	32
Figura 9 - Foto ilustrativa das estruturas que compõe a cana-de-açúcar.....	33
Figura 10 – Foto ilustrativa das fibras presentes nos colmos.....	34
Figura 11 – Curvas de TGA para bagaço de cana em atmosfera inerte.....	35
Figura 12 – Esquema ilustrativo das classificações dos polímeros.....	38
Figura 13 – A segmentação do mercado de plásticos no Brasil em 2003.....	39
Figura 14 – Estrutura Química dos Principais Plásticos Comercializados no Brasil.....	40
Figura 15 – Composição química do dimetil tereftalato (DMT).....	42
Figura 16 – Cadeia produtiva do PET na Região Metropolitana de Salvador.....	44
Figura 17 – Mapa ilustrativo da área de abrangência da maior parte das lanchonetes que comercializam caldo de cana-de-açúcar próximo à Praça Sete em Belo Horizonte.....	48
Figura 18 – Foto do Tratamento do bagaço de cana-de-açúcar com água destilada.....	49
Figura 19 – a) Foto ilustrativa da extrusora; b) Foto ilustrativa do triturador; c) Foto ilustrativa do liquidificador industrial; d) Foto ilustrativa do produto final (PET moído).....	50
Figura 20 – Foto da estufa.....	51
Figura 21 – Foto ilustrativa da glicerina bi-destilada utilizada como plastificante.....	52
Figura 22 – Foto da prensa utilizada para fabricação dos corpos de prova.....	53

Figura 23 – Ciclos de temperatura utilizados 1 (PET, bagaço e glicerina) e 2 (PET).....	54
Figura 24 - Equipamento de DSC.....	55
Figura 25 - Equipamento de DTA e TGA.....	56
Figura 26 – Foto do Espectrômetro óptico.....	57
Figura 27 – Foto do MEV.....	58
Figura 28 – Foto do equipamento de tração.....	59
Figura 29 – Representação gráfica da análise termogravimétrica (TGA).....	60
Figura 30 – Representação gráfica do DSC do PET reciclado.....	61
Figura 31 – Representação gráfica do dsc do bagaço de cana-de-açúcar.....	62
Figura 32 – Representação gráfica da curva de DSC do corpo de prova Tipo 1.....	63
Figura 33 – Representação gráfica da curva de DSC do corpo de prova Tipo 2.....	64
Figura 34 – Representação gráfica da curva de DSC do corpo de prova Tipo 1 em contraposição ao corpo de prova Tipo 2.....	65
Figura 35 – Representação gráfica da curva de DSC do corpo de prova Tipo 3.....	66
Figura 36 – Representação gráfica da curva de DSC dos corpos de prova Tipo 1 e 3.....	67
Figura 37 – Representação gráfica da curva de DSC do corpo de prova Tipo 4.....	68
Figura 38 – Representação gráfica da curva de DSC dos corpos de prova Tipo 1 e 4.....	69
Figura 39 – Representação gráfica do espectro do PET reciclado.....	70
Figura 40 – Representação gráfica do espectro do bagaço de cana-de-açúcar.....	72
Figura 41 – Composição Química da Celulose.....	73
Figura 42 – Composição Química dos compostos presentes da lignina.....	73
Figura 43 – Representação gráfica do espectro do corpo de prova Tipo 1.....	74
Figura 44 – Representação gráfica do espectro do corpo de prova Tipo 2.....	76
Figura 45 – Composição Molecular da Glicerina.....	78
Figura 46 – Representação gráfica do espectro do corpo de prova Tipo 3.....	78
Figura 47 – Representação gráfica do espectro do corpo de prova Tipo 4.....	80
Figura 48 – a) Micrografia do PET com aumento de 20x; b) Micrografia do PET com aumentode 100x; c) Micrografia do PET com aumento de 100x com presença de partículas menores; d) Micrografia com aumento de 100x identificando variações nos tamanhos de partículas.....	82
Figura 49 – a) Micrografia da fibra de bagaço de cana-de-açúcar com aumento de 20x identificando um tipo de estrutura; b) Micrografia do bagaço com aumento de 100x	

identificando outra estrutura; c) Micrografia do bagaço com aumento de 100x identificando uma terceira estrutura.....	83
Figura 50 – a) Micrografia do bagaço com aumento de 200x identificando as diferentes camadas presentes; b) Micrografia do bagaço com aumento de 100x mostrando as finas camadas extensas; c) Micrografia do bagaço com aumento de 100x identificando a presença de porosidades; d) Micrografia do bagaço com aumento de 100x identificando porosidades e camadas; e) Micrografia com aumento de 100x identificando os feixes de fibrilas identificados pelas setas.....	85
Figura 51 – a) Micrografia do corpo de prova Tipo 1 no aumento de 100x; b) Micrografia do corpo de prova Tipo 2, com aumento de 100x; c) Micrografia do corpo de prova Tipo 3 no aumento de 100x; d) Micrografia do corpo de prova Tipo 4 no aumento de 100x.....	87
Figura 52 – Micrografia comparativa a) PET reciclado com aumento de 100x; b) Corpo de prova Tipo 1 (PET com compressão térmica) com aumento de 100x.....	88
Figura 53 – a) Micrografia do corpo de prova Tipo 1 com aumento de 50x mostrando a formação de lamelas; b) Micrografia do corpo de prova Tipo 3 com aumento de 100x.....	88
Figura 54 – Micrografia do corpo de prova Tipo 2 com aumento de 450x identificando as microporosidades no material com setas indicativas.....	89
Figura 55 – Representação gráfica do ensaio de tração dos quatro tipos de corpos de prova..	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condutividade térmica de alguns materiais à 27°C.....	23
Tabela 2 – Produção e consumo de PET.....	41
Tabela 3 – Propriedades do Poli (tereftalato de etileno), PET.....	43
Tabela 4 – Viscosidade intrínseca e massa molar viscosimétrica de 6 processamentos de PET.....	43
Tabela 5 – Composição dos corpos de prova.....	52
Tabela 6 – Possíveis atribuições para os picos identificados no espectro do PET reciclado....	70
Tabela 7 – Possíveis atribuições aos comprimentos de onda presentes no espectro do bagaço de cana-de-açúcar.....	72
Tabela 8 – Possíveis atribuições nas bandas presentes no espectro do corpo de prova Tipo 1.....	75
Tabela 9 – Possíveis atribuições aos comprimentos de onda presentes no espectro do corpo de prova Tipo 2.....	77
Tabela 10 – Possíveis atribuições aos comprimentos de onda presentes no espectro do corpo de prova tipo 3.....	79
Tabela 11 – Possíveis atribuições aos comprimentos de onda presentes no espectro do corpo de prova Tipo 4.....	81
Tabela 12 – Resultados da densidade aparente encontrada para os quatro corpos de prova....	90
Tabela 13 – Valores de Resistência à Tração (RT), Módulo de Elasticidade (E) e Tensão de Ruptura.....	91

LISTA DE SIGLAS

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

PET – Poli (tereftalato de etileno)

FIESP – Federação das indústrias do Estado de São Paulo

DIEESE – Departamento Intersindical de Estatísticas e Estudos Socioeconômicos

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva

TG ou TGA – Termogravimetria

PCS – Poder calorífico superior

ABIPLAST – Associação Brasileira de Plásticos

PP – Polipropileno

PE – Polietileno

PS – Poliestireno

PVC – Poli(cloreto de vinila)

DMT – Dimetil Tereftalato

HET – Het(aril)-carboxílico

UV – Ultravioleta

HDT – Termo-disposição

BMC – Bulk molding compounds

DTG – Termogravimetria Derivativa ou Análise Termogravimétrica Derivativa

DSC – Calometria Diferencial Exploratória

CEFET – MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

DEMAT – Departamento de Materiais

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Área

ΔT – Variação de Temperatura

Δx – Calor

k – Condutividade térmica

q'' – Fluxo de Calor

R – Raio

Q – Taxa de calor

L – Comprimento

T – Temperatura

ρ – Densidade

c_p – Calor Específico

α – Difusividade Térmica

l_c – Comprimento Crítico

d – Diâmetro da Fibra

σ_f – Resistência Final

τ_c – Tensão de Cisalhamento

l – Comprimento Total

n – número de meros

M_{pol} – Massa molar média do polímero

M_u – Massa Molar do mero

M_w – Massa Molar Viscosimétrica

T_g – Temperatura de Transição Vitrea

T_m – Temperatura de Fusão

T_d – Temperatura de Degradação

RT – Resistência à Tração

E – Módulo de Elasticidade

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Justificativa e Relevância.....	16
1.2 Objeto de Estudo.....	20
1.3 Objetivos.....	21
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1 Princípios térmicos de Condução.....	22
2.2 Propriedades Térmicas de Isolantes Térmicos.....	27
2.3 Materiais Compósitos.....	28
2.3.1 Compósitos reforçados com Fibras.....	30
2.3.1.1 Fibras naturais – O bagaço de cana-de-açúcar.....	32
2.3.2 Materiais Poliméricos.....	36
2.3.2.1 Os termoplásticos – O caso do Poli (tereftalato de etileno), PET.....	39
2.4 O Estado da Arte	45
3 METODOLOGIA.....	47
3.1 Materiais e Métodos.....	47
3.2 Confeção dos corpos de provas.....	51
3.3 Ensaio e Caracterizações.....	55
3.3.1 Ensaio de determinações de propriedades térmicas.....	55
3.3.2 Caracterização dos materiais.....	57
3.3.3 Ensaio de determinação de propriedade mecânica.....	58
4 RESULTADOS.....	60
4.1 Resultados referentes as análise das Propriedades Térmicas.....	60
4.1.1 Resultado da análise termogravimétrica (TGA).....	60
4.1.1 Resultado das análises de calorimetria diferencial exploratória (DSC).....	61
4.1.1.1 Calorimetria diferencial exoratória (DSC) do PET reciclado.....	61
4.1.1.2 Calorimetria diferencial exoratória (DSC) do bagaço de cana-de açúcar.....	62
4.1.1.3 Calorimetria diferencial exoratória (DSC) do corpo de prova Tipo 1.....	63
4.1.1.4 Calorimetria diferencial exoratória (DSC) do corpo de prova Tipo 2.....	64
4.1.1.5 Calorimetria diferencial exoratória (DSC) do corpo de prova Tipo 3.....	66
4.1.1.6 Calorimetria diferencial exoratória (DSC) do corpo de prova Tipo 4.....	67
4.1 Resultados referentes à caracterização dos materiais.....	69
4.1.1 Resultado das análises de espectrometria no infravermelho (FTIR).....	69

4.2.1.1 <i>Espectrometria no infravermelho (FTIR) do PETreciclado</i>	69
4.2.1.2 <i>Espectrometria no infravermelho (FTIR) do bagaço</i>	71
4.2.1.3 <i>Espectrometria no infravermelho (FTIR) do corpo de prova Tipo 1</i>	74
4.2.1.4 <i>Espectrometria no infravermelho (FTIR) do corpo de prova Tipo 2</i>	76
4.2.1.5 <i>Espectrometria no infravermelho (FTIR) do corpo de prova Tipo 3</i>	78
4.2.1.6 <i>Espectrometria no infravermelho (FTIR) do corpo de prova Tipo 4</i>	80
4.1.2 <i>Resultados das análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	82
4.2.2.1 <i>Análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das matérias-primas</i>	82
4.2.2.1.1 <i>Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do PET</i>	82
4.2.2.1.2 <i>Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do bagaço de cana-de-açúcar</i>	83
4.2.2.2 <i>Análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos corpos de prova</i>	86
4.2.3 <i>Resultados da densidade aparente dos corpos de prova</i>	89
4.3 <i>Resultado referente à análise de propriedade mecânica</i>	90
4.3.1 <i>Resultado do Ensaio de Tração nos corpos de prova</i>	90
5 DISCUSSÕES FINAIS	94
6 CONCLUSÃO	96
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A produção de cana-de-açúcar no Brasil, principalmente no Estado de Minas Gerais, segundo Estado do Brasil no ranking de produção de cana-de-açúcar (Figura 1), conforme dados da CONAB (2011), torna esse Estado um dos grandes produtores de resíduos desse material, o bagaço da cana-de-açúcar, com 8,67% (742,65 mil hectares) na área produtiva, com 117.540 hectares de aumento da área de produção. Este bagaço é causador de impactos ambientais significativos no solo e no ar atmosférico, pois a maior parte desse resíduo é descartada por meio de queima. Em razão disso, as tentativas de reaproveitar esse produto por meio da produção de novos materiais são de grande relevância com a atual postura mundial de preocupação com o meio ambiente.

Figura 1 – Mapa brasileiro das áreas aptas à produção de cana-de-açúcar



Fonte: Blog do Planalto (2009)

Além disso, a grande utilização significativa de produtos poliméricos (plásticos), através de embalagens, roupas, utensílios domésticos, entre outros, e a dificuldade de descarte desses materiais devido ao seu tempo de degradação demorada e tóxica, contaminação do solo

e ocupação volumétrica do espaço destinado aos descartes (Figura 2), torna a reutilização dos resíduos poliméricos uma alternativa e uma área promissora na produção de novos materiais. Esses materiais, que hoje compõem a maior parte dos resíduos domésticos domiciliares, segundo dados coletados por MATOS e SCHALCH (2007), apresentam, em sua grande maioria, polímeros termoplásticos, em especial, o Poli (tereftalato de etileno), conhecido como PET. Somente a cidade de Araraquara no ano de 2001, representou 63,6% dos polímeros descartados nos aterros sanitários da cidade (MATOS e SCHALCH, 2007).

Figura 2 – Foto ilustrativa do volume de garrafas PET num aterro sanitário no Brasil.



Fonte : Blog Mundo Possível (2010)

Também deve ser considerado que o aumento da competitividade global força as indústrias de produtos de exportação a implantar sistemas de qualidade, com exigências em relação a obedecerem às regulamentações ambientais vigentes nos países de destinos dos produtos. Parte dessas multinacionais tem usado os mesmos fornecedores para suprir as tecnologias de gestão de excedentes sólidos para suas operações mundiais (FIESP, 2003).

Em razão da dificuldade de descarte desses materiais e da grande importância de produção de materiais isolantes térmicos em diversas áreas (Fórmula 1, Frigoríficos, Estações de Pesquisas nas regiões polares, construção civil, entre outros), a fabricação de um novo tipo de isolante térmicos torna-se promissora, ainda mais considerando a reutilização de materiais de difícil descarte e impactantes ao meio ambiente.

Houve um aumento significativo da construção civil, com um crescimento de 11,6% em 2010 quando comparado a 2009, segundo dados da DIEESE no ano de 2011 (DIEESE,

2011). Nessa área, a adequação das condições térmicas de interiores é um fator relevante, isso é conseguido é através da redução das trocas de calor com o exterior. A importância de se produzir novos materiais adequados a essa aplicação propicia nova via de aplicação garantida dos materiais isolantes, caso os requisitos necessários do setor sejam atingidos.

Outro aspecto relevante está relacionado ao baixo custo dos materiais envolvidos, pois no estudo em questão seriam utilizados materiais de descarte e resíduos, o que minimiza custos de fabricação de matéria-prima, custos de descartes e custos relativos aos aspectos legais relacionados com o impacto ambiental.

Outro aspecto a se considerar é a utilização de materiais isolantes nos carros de Fórmula 1. Uma inovação adquirida a partir de meados de 1981, principalmente devido a preocupação causada em razão dos acidentes, em especial em 1978, no acidente com o carro da Lotus (Figura 3), que levou à morte do piloto Ronnie Peterson, no qual se percebe a falta de materiais mais maleáveis e mais seguros como as fibras de carbono e o combustível na lateral próximo ao piloto (REVISTA QUATRO RODAS, 1978).

Figura 3 – Foto ilustrativa do modelo da Lotus em 1978



Fonte : GP Expert (2012)

Com a aplicação desses novos materiais, materiais baseados em fibras de carbono no chassi e *cock pit*, houve um maior desempenho dos carros e maior segurança aos pilotos, além do uso de fibras de aramida nas roupas minimizando impactos causados por explosão e fogo.

Hoje, os pilotos estão muito mais seguros, graças à utilização desses novos materiais, além de apresentarem maior leveza, o que possibilita maior desempenho do carro.

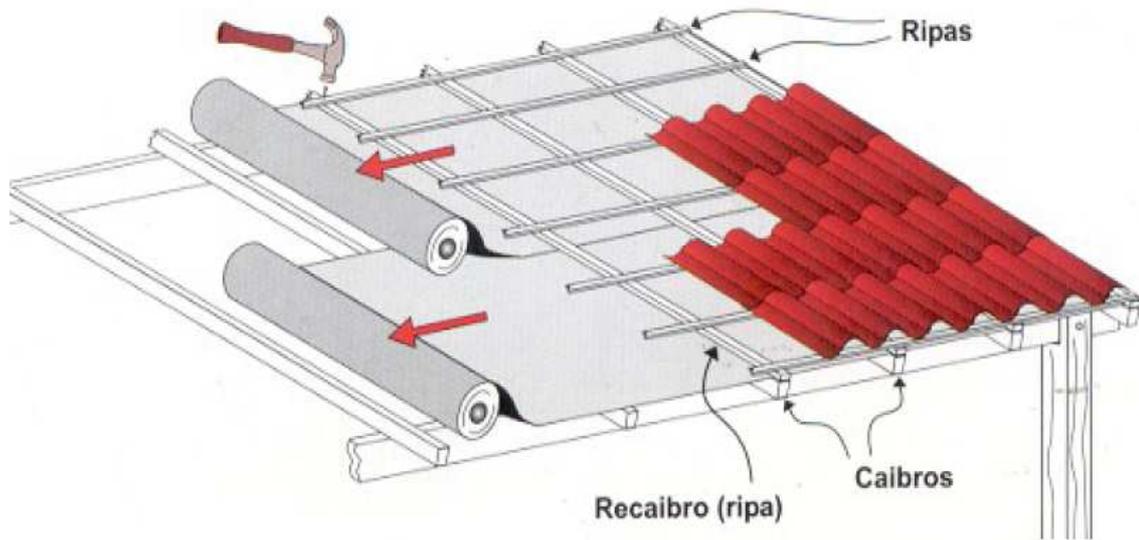
Outro aspecto relevante é a utilização de materiais que formam um revestimento de barreira térmica aplicados no rotor de um motor de turbina a gás. Essa aplicação garantiu uma camada extra de isolamento nesse produto (INCROPERA et al., 2008).

Há de se considerar também aspectos relativos à legislação brasileira em termos aos aspectos ambientais. No Brasil, a legislação restringe financeiramente qualquer indústria ou projeto quando há elevado impacto negativo ao meio ambiente (REVISTA MEIO AMBIENTE INDUSTRIAL, 2003). Nesse sentido, o Ministério do Meio Ambiente possui um banco de dados de passivo ambiental, com todas as empresas que causam ou causaram algum impacto ambiental ao meio ambiente e, esse banco de dados, embora ainda em intensa implantação, pode ser usado pelas instituições financeiras nas avaliações de crédito financeiro (FIESP, 2003). Também deve ser considerada a legislação ambiental em relação ao descarte de resíduos sólidos e os impactos ambientais causados pelas atividades industriais (DECRETO-LEI N° 1413, 1975).

O campo da reciclagem de resíduos sólidos no Brasil, principalmente no que diz respeito às resinas termofixas reforçadas com fibras, é muito pequeno e novo (REVISTA DO PLÁSTICO REFORÇADO, 2002). Sendo assim, a consideração de usar materiais que, ao contrário dos termofixos, apresentam boas perspectivas de reciclabilidade torna-se ainda mais promissor e inovador.

Outra importante aplicação são as subcoberturas (Figura 4), uma inovação no mercado brasileiro, segundo Sato (2003). Essas mantas são instaladas entre as telhas e o forro, com a função de melhorar a estanqueidade à cobertura e o isolamento térmico (DARÉ et al., 2005).

Figura 4 – Foto ilustrativa das mantas usadas como subcoberturas.



Fonte: Catálogo técnico da Pentak (2003)

1.2 OBJETO DE ESTUDO

Mudanças econômicas tem ocorrido no mundo todo e isso tem demandado modificações na forma de manipulações de grande parte dos materiais. Dentro desse foco, é cada vez mais crescente a preocupação com o destino de resíduos da agroindústria, visto que esse representa um grande impacto ambiental no solo e no ar atmosférico. Sendo assim, a tentativa de buscar novas alternativas que possibilitem o uso de resíduos em geral é uma área promissora da engenharia de materiais, reduzindo o depósito desses materiais e minimizando o impacto ambiental causado por eles.

No enfoque da agroindústria, tem-se em destaque a produção de cana-de-açúcar, na qual o Brasil continua sendo o maior produtor mundial, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2011). O destaque da produção nacional é do Estado de Minas Gerais, com um aumento significativo de 83.100 ha e o aumento no número de usinas em funcionamento, com mais três usinas entrando em funcionamento no ano de 2011 (CONAB, 2011). Esse aumento na produção de cana fez com que se aumentasse significativamente a carga de detritos desse material no Estado, gerando um grande passivo ambiental, tornando-se necessária a busca por alternativas de reaproveitamento dos resíduos gerados.

O presente trabalho propõe uma análise das propriedades térmicas e mecânicas do poli(tereftalato de etileno) com a adição do bagaço de cana-de-açúcar para a criação de um material isolante. Para isso, primeiramente, propõe-se a caracterização de ambas as matérias

primas (PET e bagaço de cana) em seu estado natural. Depois, a trituração, lavagem em água destilada, secagem e moagem do bagaço para sua utilização, além da moagem do PET e assim, obter a mistura ótima de ambos para trabalhar a caracterização microestrutural por meio de Microscopia eletrônica de varredura (MEV), FTIR e análise das propriedades térmicas, como Termogravimetria (TGA), Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), Análise Térmica Diferencial (DTG) e condutividade térmica, além das propriedades mecânicas de Resistência a Tração (RT) e Resistência ao Impacto e, com os resultados verificar a possibilidade de utilização desse material como isolante térmico.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é verificar a produção de um novo material isolante à base de poli (tereftalato de etileno), PET, com adição de bagaço de cana-de-açúcar, analisando suas propriedades térmicas e mecânica e as possibilidades do uso adequado do mesmo.

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Reutilizar o PET no estado final, ou seja, oriundo de garrafas de refrigerantes;
- Utilizar bagaço de cana-de-açúcar utilizado na produção de caldo de cana em lanchonetes do centro de Belo Horizonte;
- Caracterizar os materiais envolvidos na produção do isolante em seu estado *in natura*;
- Triturar os materiais envolvidos para uni-los por meio de compressão térmica;
- Caracterizar a mistura produzida em diferentes proporções dos materiais envolvidos;
- Analisar as propriedades térmicas dos corpos de prova;
- Analisar a propriedade mecânica do novo material, como resistência à tração.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PRINCÍPIOS TÉRMICOS DE CONDUÇÃO

A condução térmica refere-se ao transporte de energia em um meio devido a um gradiente de temperatura e, o mecanismo físico é a atividade atômica ou molecular aleatória (INCROPERA *et al.*, 2008). Segundo esses autores, a transferência de calor dessa forma é governada pela Lei de Fourier (Equação 1) e depende de um conhecimento prévio de como a temperatura varia no meio.

$$q = \frac{Q}{A} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

A Lei de Fourier é o fundamento da transferência de calor por condução. No entanto, ela não é baseada em princípios fundamentais, mas sim em evidências experimentais. Por meio dela, pode-se definir uma importante propriedade dos materiais, a condutividade térmica. É também uma expressão vetorial que mostra que o fluxo térmico é normal a uma isoterma e no sentido da diminuição de temperatura. Ela também se aplica a qualquer matéria, independente do estado físico no qual se encontra (INCROPERA *et al.*, 2008).

Essa propriedade depende da área (A), variação de temperatura (ΔT), espaço percorrido pelo calor (Δx), condutividade térmica (k), mas também é influenciada pelo material no qual ocorre a condução de calor. Por exemplo, mantendo os mesmos valores de A, ΔT e Δx , mas mudando o material do plástico para o metal, seriam observados menores valores de q'' para o plástico. Isso ocorre devido ao valor de k, que é dependente do material, ele é a medida do comportamento do material (INCROPERA *et al.*, 2008).

A condutividade térmica é uma propriedade de transporte, segundo Incropera *et al.* (2008), fornece a taxa na qual a energia é transferida pelo processo de difusão. Esse valor é dependente da estrutura atômica, física da matéria e molecular, e para objetos cilíndricos seu valor é apresentado pela Equação 2 (ITO *et al.*, 2003).

$$k = \frac{Q \ln \left(\frac{R1}{R2} \right)}{2\pi L(T_1 - T_2)} \quad (2)$$

Essa equação pode ser aplicada nas diferentes direções no material, contudo, em material isotrópico, a condutividade térmica é independente da direção de transferência (INCROPERA *et al.*, 2008).

Logo, de acordo com equação 2, percebe-se que para um dado gradiente de temperatura, o fluxo de calor aumenta com o valor da condutividade térmica. Normalmente, o que se percebe é um aumento do valor de condutividade térmica no sentido de um gás, passando por líquido e chegando a um sólido, isso se deve a diferença no espaço intermolecular nesse estados (INCROPERA *et al.*, 2008). Além disso, as propriedades térmicas variam segundo a natureza, variedade, teor de umidade e temperatura do produto (ITO *et al.*, 2003). A Tabela 1 mostra a condutividade térmica de alguns materiais.

Tabela 1 – Condutividade térmica de alguns materiais à 27°C

Material	Condutividade térmica [J/s/(m·K)] ou [W/(m.K)]
Prata	426
Cobre	398
Alumínio	237
Tungstênio	178
Ferro	80,3
Vidro	0,72 - 0,86
Água	0,61
Tijolo	0,4 - 0,8
Madeira (pinho)	0,11 - 0,14
Fibra de vidro	0,046
Espuma de poliestireno	0,033
Ar	0,026
Espuma de poliuretano	0,02
Polipropileno	0,25
Epóxi (cargueada com sílica)	0,3
Epóxi (não cargueada)	0,12 - 0,177

Fonte : ITO *et al.*, 2003.

Na Tabela 1, nota-se valores maiores de condutividade térmica para materiais metálicos, seguidos de vidro, água, madeira, até materiais poliméricos (espumas, polipropileno e epóxi). Essa correlação se deve ao fato de que em metais puros a condução térmica é predominada pelos elétrons, enquanto em materiais não condutores (epóxi), a contribuição dos fônons é predominante (INCROPERA *et al.*, 2008).

Em sistemas isolantes, os materiais envolvidos devem apresentar baixa condutividade térmica. Incropera *et al.* (2008), em isolantes tradicionais, composto por fibras, pós e flocos, os sistemas são caracterizados por uma condutividade térmica efetiva, a qual depende da condutividade térmica e das propriedades radiantes da superfície do material sólido, assim como da natureza e da fração volumétrica de ar ou espaços vazios. Sendo que, um importante parâmetro desse tipo de sistema é a densidade aparente¹, a qual depende muito da forma na qual o material está empacotado.

Dentro desse aspecto, segundo Incropera *et al.* (2008), há dois tipos de isolantes, o celular e os reflexivos. O primeiro ocorre quando não há ligação entre os pequenos espaços formados pela ligação ou junção das porções de material sólido, como exemplo, as espumas. O segundo tipo é conhecido como subcoberturas, segundo Daré *et al.* (2005), são compostos por múltiplas e paralelas camadas de folhas finas ou lâminas de alta refletividade, espaçadas entre si com o propósito de refletir a energia radiante de volta a sua origem (INCROPERA *et al.*, 2008).

Outras variáveis importantes a se considerar com relação a condução são as propriedades termodinâmicas, as quais dizem respeito ao estado de equilíbrio de um sistema, tais como densidade (ρ) e calor específico (c_p) e determinam uma importante propriedade que é a difusividade térmica (α), determinada pela Equação 3.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (3)$$

Essa propriedade mede a capacidade do material de conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la. Sendo que materiais que possuem elevado α , respondem de maneira rápida a mudanças nas condições térmicas impostas a eles, já aqueles que possuem baixos valores de α , respondem lentamente, logo levam mais tempo para atingirem uma nova condição de equilíbrio (INCROPERA *et al.*, 2008).

Levando-se em consideração que para a aplicação da Lei de Fourier é necessário conhecer a distribuição de temperatura. Um método de determinação desses valores é

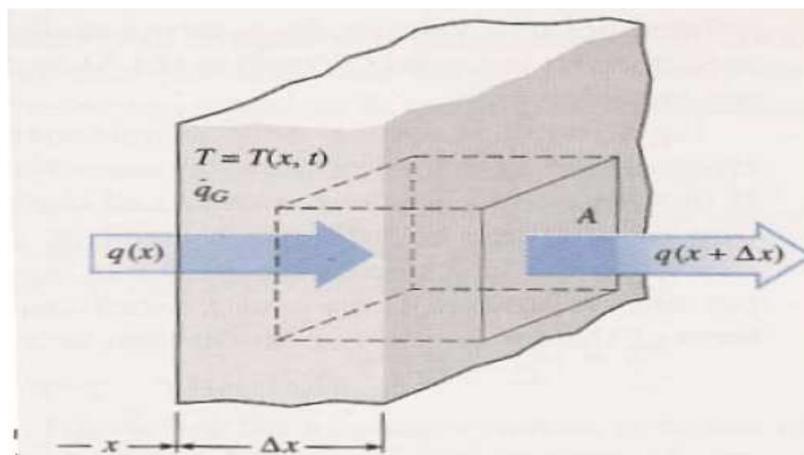
¹Densidade Aparente é a razão entre massa do sólido e volume total. (INCROPERA *et al.*, 2008).

empregando as Leis de Conservação de Energia, por meio de quatro regras básicas, segundo Incropera *et al.* (2008):

1. O volume de controle apropriado deve ser definido, com a superfície de controle representada por uma linha ou linhas tracejadas;
2. A base de tempo apropriada deve ser identificada;
3. Os processos relevantes envolvendo energia devem ser identificados e cada processo deve ser mostrado no volume de controle por meio de uma seta apropriadamente identificada;
4. A equação de conservação deve, então, ser escrita e as expressões apropriadas para as taxas devem ser substituídas nos termos relevantes da equação.

Baseando-se nessas regras básicas, segundo esses autores, deve ser definido um volume de controle diferencial (Figura 5), identificados os processos de transferência de calor relevantes e substituir adequadamente as equações de taxas de transferência de calor. Nesse caso o resultado é uma equação diferencial que fornece a distribuição de temperatura no meio, em condições de contorno específicas.

Figura 5 – Ilustração do volume de controle diferencial segundo a metodologia descrita acima.



Fonte : Gouvea e Casella (2004)

Como um dos objetivos principais da condução de calor é determinar o campo de temperaturas em um meio resultante das condições impostas em suas fronteiras. Conhecendo a distribuição de temperaturas no meio, há como se estabelecer o valor do fluxo de calor por

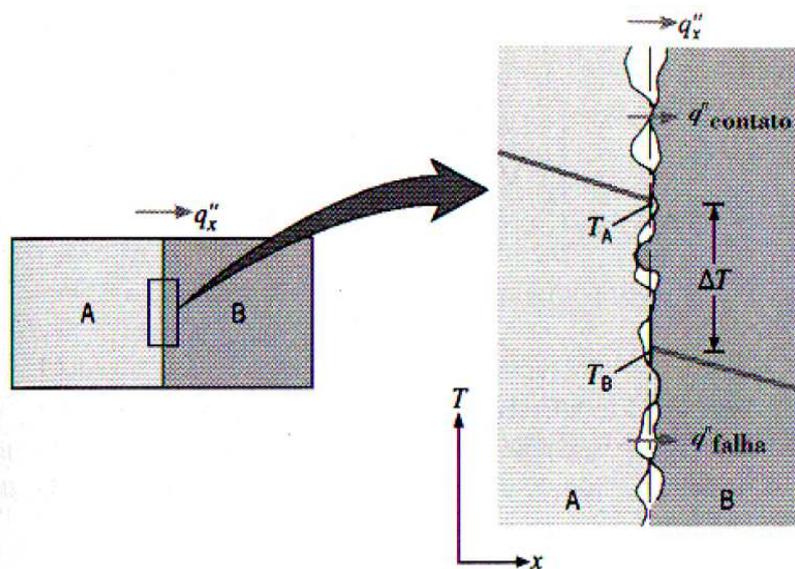
meio da Lei de Fourier. Além disso, em um sólido, conhecendo-se a distribuição de temperatura, pode-se determinar pontos de tensões, expansões e deflexões térmicas relevantes em um estudo (INCROPERA *et al.*, 2008).

Outra variável importante é que em sistemas compostos deve ser considerado que há queda de temperatura entre as interfaces dos vários materiais envolvidos, sendo isso atribuído a conhecida resistência de contato, determinada pela Equação 4 (INCROPERA *et al.*, 2008).

$$R = \frac{T_A - T_B}{q} \quad (4)$$

Essa propriedade é influenciada pela rugosidade presente entre as interfaces (Figura 6), onde os pontos de contatos se entremeiam com interstícios que são, em grande parte preenchidos com ar, sendo que a transferência de calor é devido à condução através da área de contato real e a que ocorre através dos interstícios (INCROPERA *et al.*, 2008).

Figura 6 – Foto ilustrativa da resistência de contato



Fonte : Incropera *et al.* (2008)

2.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS DE ISOLANTES TÉRMICOS

Isolamentos/Isolantes térmicos são materiais de baixa condutividade térmica, projetados de modo que uma vez aplicados sobre uma superfície obtém-se uma resistência térmica global do sistema menor que a obtida na ausência do emprego dos isolantes térmicos (REIS, 2008).

Segundo Incropera *et al.* (2008), a transferência de calor nos isolantes pode incluir os três modos de transmissão de calor: condução através dos materiais sólidos, convecção através do ar nos espaços vazios e troca de calor por radiação entre as superfícies da matriz sólida (se a temperatura for suficientemente alta).

Em materiais isolantes são desejadas como características, a presença de porosidade (pequenos poros) que possibilitam a baixa condutividade térmica, paredes finas, baixo poder higroscópico e baixa densidade. Além disso, deve-se considerar a possibilidade de geração de vácuo nos espaços vazios, pois isso implica em baixa condutividade (menor que nos poros com ar).

Segundo Incropera *et al.* (2008), há dois tipos de isolantes, o celular (as espumas) e os reflexivos (também conhecidos comercialmente como subcoberturas). De acordo com Sato (2003), os isolantes reflexivos, são relativamente novos no Brasil, sendo que os primeiros eram importados da Europa e depois de reformulações e adequações climáticas, também passaram a ser produzidas no país.

As subcoberturas são mantas instaladas entre as telhas e o forro, e têm dupla função: proporcionar estanqueidade à cobertura e melhorar o isolamento térmico. Para isolar o calor, deve possuir características próprias para redução da troca de calor por radiação. Assim, são fabricados com materiais com alta capacidade de reflexão e baixa capacidade de emissão de radiação térmica, comportamento característico dos metais polidos (DARÉ *et al.*, 2005).

Segundo Daré *et al.* (2005), a maneira como são instalados esses materiais influencia em seu desempenho. Além disso, Sato (2003) afirma que enquanto uma cobertura com telha de cerâmica atinge entre 60°C e 70°C, as subcoberturas dependem da necessidade do empreendimento. Além disso, elas não só melhoram a condição térmica, mas dependendo do reforço utilizado elas garantem resistência a esforços de tração.

Segundo Alucci (1988), a variação de temperatura, temperatura elevada ou temperatura baixa levam a um desconforto. Associado às más condições de iluminação que levam o indivíduo a utilizar métodos de iluminação artificial e de condicionamento do ar, elevam consideravelmente o consumo de energia elétrica. Sendo assim, a afirmação de Vecchia (2001) de que a “utilização de isolantes térmicos por reflexão apresenta um

significado conjunto no campo da economia de energia” é válida, visto que a utilização de subcoberturas reduz em torno de 5,1°C a temperatura ambiente, segundo esse mesmo autor.

Os isolantes celulares são os mais comuns, também conhecidos como espumas, englobam materiais com estruturas básicas com fibras, pós e flocos, material disperso no ar (REIS, 2008).

Além dos isolantes convencionais, vários estudos têm sido feitos com a introdução de novas estruturas para isolamento, destacando-se a inclusão de materiais biológicos. Por ser essencial o estudo das propriedades térmicas dos materiais biológicos para as ciências agrícolas e de alimentos, com o objetivo de emprego destes elementos em uma variedades de áreas, como aquecimento e resfriamento de produtos. Muito têm-se determinado em relação a suas propriedades térmicas e, diante disso, abre-se um leque de tentativas de utilização desses materiais na produção de isolantes.

Ito *et al.* (2003), fizeram um estudo sobre a determinação da condutividade térmica de grãos de soja. Em seu estudo foi concluída a construção de um equipamento com o objetivo de determinar as propriedades de condutividade térmica de materiais biológicos, com o erro relativo de 21%, o que é admissível na literatura.

2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS

De uma maneira geral, pode-se considerar um compósito como sendo qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades. De acordo com esse **princípio da ação combinada**, melhores combinações de propriedades são criadas através de uma combinação judiciosa de dois ou mais materiais distintos. (CALLISTER, 2002).

Diante da preocupação cada vez maior em buscar materiais com melhor desempenho, com boa relação custo-benefício e de fácil implantação, a engenharia vem desenvolvendo misturas de diversos materiais na tentativa de angariar as melhores propriedades de cada um. Nesse sentido, o desenvolvimento de materiais compósitos têm-se tornado um ramo cada vez mais promissor e, em cada instante, novos materiais são desenvolvidos.

Conhecendo os vários tipos de compósitos e também compreendendo a dependência dos seus comportamentos em relação as características, às quantidades relativas, à geometria/distribuição e às propriedades das fases constituintes é possível projetar materiais que possuam combinações de propriedades melhores do que aquelas encontradas em ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos (CALLISTER, 2002).

Além disso, muitos resíduos agroindustriais têm sido usados como implementos nesses novos materiais. Silva *et al.* (2011) afirmam que os resíduos apresentam-se como uma alternativa aos materiais sintéticos utilizados na produção de compósitos poliméricos para isolamento térmica, por agregarem altos custos na sua produção e devido a sua difícil degradação pode causar danos irreparáveis ao meio ambiente.

Esses materiais, em geral, são compostos de duas fases, a matriz contínua que envolve segunda fase, chamada frequentemente de dispersa (CALLISTER, 2002). No caso da fase dispersa, as propriedades do compósito será modificada de acordo com a geometria que se apresenta essa fase, em geral se apresenta de três formas distintas, as quais se subdividem em outras.

São os compósitos reforçados com fibras, os reforçados com partículas e os estruturais, também denominados laminados (Figura 7 a, b e c). Nos primeiros, a razão entre o comprimento e o diâmetro é que determina o tipo e as propriedades. Nos reforçados com partículas, as dimensões das partículas são as mesmas em todas as direções, ou seja, têm eixos iguais. E, por fim, os laminados, ou estruturais, são combinações de compósitos e materiais homogêneos (CALLISTER, 2002).

Figura 7 – Fotografias ilustrativas de compósitos



(a) Foto ilustrativa de um compósito com fibras

(b) Foto ilustrativa de um esquema de um laminado

(c) Foto de uma microscopia eletrônica de um compósito particulado.

Fonte : Bombarco, acontecimentos e negócios (2010)

Segundo Schackelford (1992) e Carvalho *et al.* (1998), a crescente utilização de compósitos no ramo da engenharia e na produção de bens de consumo oferece uma combinação sem igual de propriedades além de inúmeras vantagens econômicas em relação aos demais materiais competidores.

Araújo *et al.* (2002), afirmam que em alguns processos de fabricação de compósitos com matriz termofixa, é gerada grande quantidade de rejeitos prejudicando o meio ambiente. Portanto, na tentativa de minimizar o volume destas sobras que vão parar nos lixões, alguns trabalhos têm sido desenvolvidos com o uso de resíduos.

Além disso, o crescente desenvolvimento do setor da construção civil, com implementação do desenvolvimento sustentável por parte do Governo, apresenta grande viabilidade na produção desses materiais, em razão de que segundo Cianotto (1988), esse setor está apto a empregar grande diversidade de materiais descartados durante as diferentes etapas de construção, podendo incorporar vários resíduos (viáveis tecnologicamente) e oferecer alternativa para minimizar os danos ambientais.

2.3.1 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Compósitos reforçados com fibras são considerados os compósitos mais importantes tecnologicamente. Apresentam alta resistência e rigidez em relação ao peso, ou seja, em geral são materiais relativamente leves com propriedades mecânicas excepcionais. Entre elas, destaca-se a alta resistência a tração. Além disso, muitos apresentam baixa condutividade térmica dependendo do tipo de fibra utilizado.

Segundo Callister (2002), as características são expressas em função de resistência mecânica específica e módulo específico, que correspondem, respectivamente, às razões do limite de resistência à tração em relação à densidade relativa e ao módulo de elasticidade em relação à densidade relativa.

Além disso, as características mecânicas desses compósitos dependem também do grau segundo a carga é aplicada e transmitida para as fibras através da matriz. Sendo assim, a interface entre a fibra e a matriz determinará a transmissão dessa carga. E, nesse caso, a razão entre o comprimento da fibra e o seu diâmetro é significativo, além de um certo comprimento crítico (l_c), para que seja alcançado um efetivo aumento da resistência a tração e enrijecimento do material compósito (CALLISTER, 2002). O comprimento crítico depende do diâmetro da fibra (d), da resistência a tração (σ_f) e tensão de cisalhamento (τ_c), segundo a Equação 5.

$$l_c = \frac{\sigma_f * d}{2 * \pi} \quad (5)$$

Em relação a esse comprimento crítico, o ideal é que o comprimento total da fibra seja maior que o valor dele, pois assim se consegue maior área a aplicação da carga máxima. Sendo assim, em geral, o comprimento total (l) é maior que 15 vezes o comprimento crítico (lc) (CALLISTER, 2002).

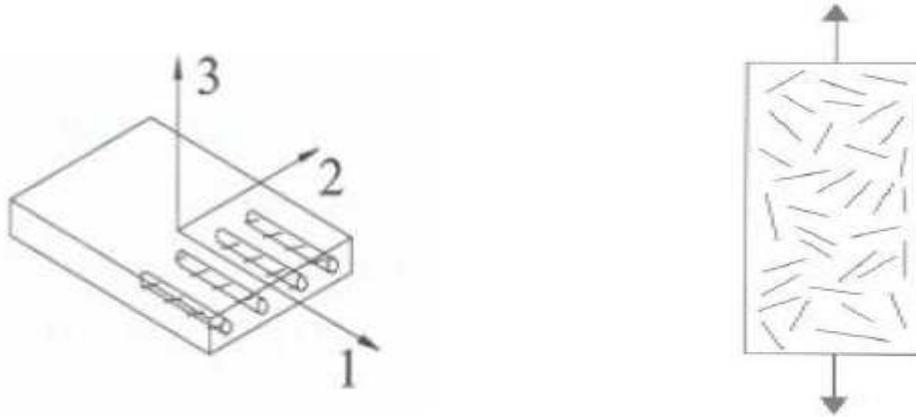
Diante disso, as fibras podem ser de dois tipos, longas ou contínuas, onde o comprimento é maior que 15 vezes o comprimento crítico, ou curtas, com comprimento menor que 15 vezes, contudo maior que o comprimento crítico. Além disso, podem ser paralelas, unidirecionais, bidirecionais, com mantas contínuas ou dispersas em relação a sua disposição (FELIPE, 2008).

O modo de disposição dessas fibras no material determina o ganho de resistência e rigidez do mesmo. Sendo assim, os materiais com fibras de comprimento maior que 15 vezes o comprimento crítico, com disposição paralela, apresentam ganho de resistência na direção da fibra, contudo baixa resistência perpendicular da mesma. Já aqueles com comprimento menor que 15 vezes o comprimento crítico, em geral, apresentam disposição dispersa, ou seja, mantas dispersas, podendo ser bidirecionais ou multidirecionais, irão apresentar resistência menor que os primeiros, contudo o ganho de resistência se apresentará em todas as direções (FELIPE, 2008).

Nesses casos a aplicação da carga sobre o material que está sendo produzido é que determinará de que forma as fibras devem estar dispersa no material, visando o melhor rendimento do mesmo.

No entanto, segundo Callister (2002), a melhor combinação geral das propriedades dos compósitos é obtida quando a distribuição das fibras é uniforme. A Figura 8 a e b apresenta representação ilustrativa da disposição das fibras.

Figura 8 – a) Foto ilustrativa de fibras paralelas em relação ao um eixo (1); b) Foto ilustrativa de fibras dispersas em relação ao eixo.



Fonte: Felipe (2008)

2.3.1.1 FIBRAS NATURAIS – O BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

O bagaço de cana-de-açúcar é uma fibra natural resultado da extração do caldo de cana-de-açúcar para produção de álcool e açúcar, sobrando como resíduo agroindustrial que, segundo Lenço (2010). É tradicionalmente empregado como combustível na geração de vapor utilizado nas plantas de concentração de açúcar e destilação de álcool.

Na década de 70, com a implementação do projeto Proálcool, essa fibra era considerada como um resíduo no setor, sendo incinerada e com a energia liberada na queima aproveitava-se a mesma para fornecimento na própria planta (LENÇO, 2010). Nesse processo se utilizava o Ciclo Rankine², o qual ainda é utilizado hoje.

Contudo, com a demanda cada vez maior de energia elétrica e o consumo maior, houve a necessidade de maior aproveitamento desse resíduo como combustível, deixando de ser um resíduo a ser descartado, tornando-se um material inovador a ser utilizado ainda mais com esse propósito nesse sentido, diversas pesquisas nessa área foram realizadas aumentando sua aplicação.

Além disso, segundo Lenço (2010), o bagaço de cana também apresenta grande potencial como matéria-prima para produção de combustíveis derivados a partir de processos como a gaseificação, a pirólise rápida ou a hidrólise seguida de fermentação.

² Ciclo Rankine – ciclo termodinâmico que possui eficiência máxima quando alcançado os valores do ciclo de Carnot (INCROPERA *et al.*, 2008).

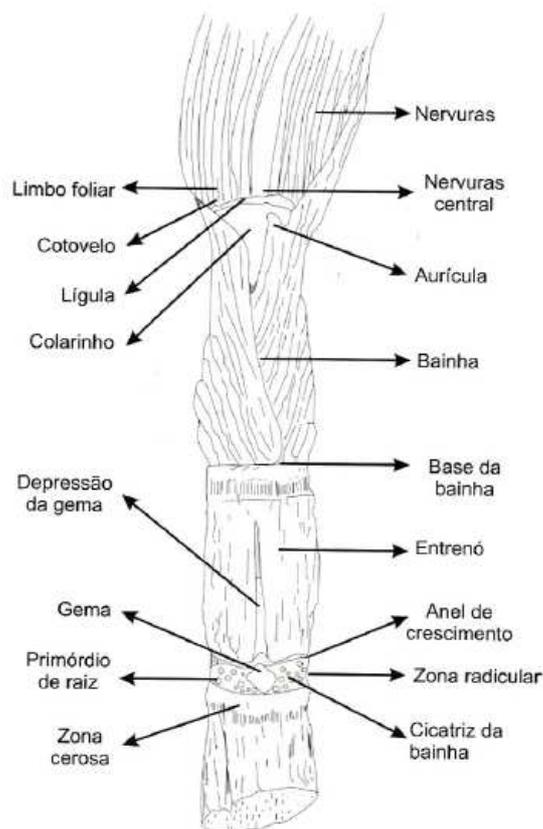
A produção de cana-de-açúcar no Brasil teve início no século XVI, por meio de Martin Afonso de Sousa, na Capitania de São Vicente, atual São Paulo, apresentou nos anos 500 a 600 seu apogeu com a implantação em toda a América, tendo o Brasil como seu principal representante para fins comerciais para a metrópole portuguesa (CASTRO e KLUGE, 2001).

A previsão da safra para 2012/2013, segundo dados da CONAB (2011) é de 602.2 milhões de toneladas, um aumento de 5,4% em relação a safra 2011/2012. Esse aumento na produção significa um aumento no acúmulo do resíduo gerado, bagaço de cana-de-açúcar, aumentando o impacto ambiental gerado.

A cana-de-açúcar de nome científico *Saccharum officinarum*, que é conhecida desde 8000 a.C, segundo Fernandes (1984), é uma das seis espécies de gramíneas existentes, presente nas regiões tropicais e subtropicais.

Ela é composta de várias estruturas (Figura 9), sendo algumas de grande interesse na produção de biocombustíveis (LENÇO, 2010).

Figura 9 - Foto ilustrativa das estruturas que compõe a cana-de-açúcar



Fonte : Lenço (2010)

As fibras estão presentes no interior após a casca dura, fazendo parte do córtex, proporcionando resistência mecânica e proteção aos colmos (Figura 10).

Figura 10 – Foto ilustrativa das fibras presentes nos colmos.



Fonte : Lenço (2010)

Segundo Castro e Kluge (2001), a cana-de-açúcar é composta de 86 a 92% de caldo, sendo o restante 8 a 14% material fibroso. A cada 100g de como, 13g é material fibroso (REIN, 2007). No Brasil, adota-se para efeito de balanço de massa um teor de 12 a 13% de fibras no período de colheita (LENÇO, 2010).

Payne (1989) afirma que “que o bagaço pode absorver até 650% de líquido em relação à sua massa, mas que a extração máxima se estabiliza a uma taxa de 250% em relação à fibra.” E, para melhorar a extração do caldo, a água deve ser aplicada quente, com temperaturas em torno de 70°C a 80°C, acima dessa faixa de temperaturas, as fibras tornam-se plásticas ficando, portanto, escorregadias.

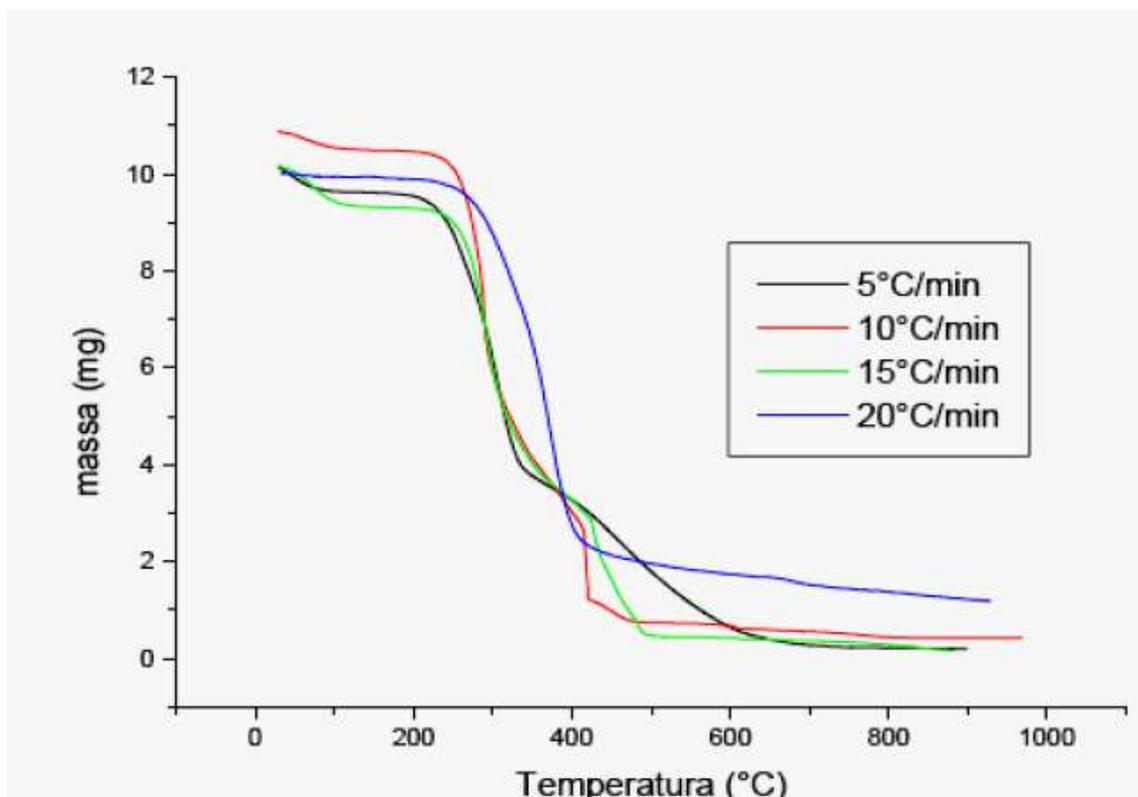
O bagaço de cana, como muitas biomassas, é higroscópico, retém a umidade nos interstícios das fibras. A umidade se mantém em torno 48 a 52% no final do processo de moagem mesmo se utilizando a embebição, uma vez que os ternos têm a capacidade de eliminar o líquido independentemente do acréscimo de água ao processo (LENÇO, 2010).

Segundo Lenço (2010), a caracterização do bagaço depende de alguns fatores, tais como a espécie da planta, o método e a época da colheita e o processo de extração do caldo que determina obviamente, o processo de produção do bagaço.

Segundo Rein (2007) coloca que o bagaço de cana é composto de uma mistura complexa de lignina, celulose e hemicelulose, compondo as células das paredes celulares dos feixes celulares da cana. O número e a quantidade de nós presentes nos colmos influenciam na quantidade de fibras obtidas na extração. Esses compostos variam sua quantidade a depender do tipo de cana e idade da mesma. Além desses compostos, há uma pequena quantidade de cinzas, composto basicamente de material inorgânico (sílica, cálcio, entre outros) conforme Lenço (2010).

A temperatura de transição vítrea do bagaço de cana-de-açúcar fica em torno de 210°C, segundo Resende (2003). Isso pode ser observado na Figura 11, na qual se apresenta a curva Termogravimétrica (TGA) de diversos tipos de bagaço de cana-de-açúcar.

Figura 11 – Curvas de TGA para bagaço de cana em atmosfera inerte



Fonte : Resende (2003)

Já o seu poder calorífico superior (PCS), segundo diversos autores, fica entre 16 e 17 MJ/kg de bagaço de cana-de-açúcar, podendo chegar até 19 MJ/kg, dependendo da forma de cálculo utilizada para se alcançar seus valores.

O bagaço é formado basicamente por fibras com forma de bastonetes, porosas, apresentando diversas granulometrias (LENÇO, 2010). Em sua composição tem 72,5% de fibras e 27,5% de medula ou pós, independente do processo de extração (SOSA-ARNAO, 2007). Além disso, ele apresenta uma diversidade de formas e tamanhos, o que dificulta a determinação granulométrica.

Já a sua massa específica a granel varia de 52 a 104 kg/m³ a depender do diâmetro médio da partícula, segundo Alarcon *et al.* (2006). A densidade influencia diretamente nas características fluidodinâmicas das partículas do bagaço.

Outro fator que influencia a fluidodinâmica da partícula do bagaço de cana é a densidade ou massa específica, como é nomeada por alguns autores, e nesse texto é denominada como densidade aparente. Essa medida é um fator complicador, pois o bagaço é um material higroscópico, poroso, com grande variedade de tamanhos, com superfícies irregulares e a maioria das partículas possui comprimento muito maior que a largura e a altura (LENÇO, 2010).

Dentro desse aspecto, parece promissor e viável a utilização dessa fibra natural como adição na fabricação de um isolante, pois apresenta boa resistência, baixa densidade e porosidade.

2.3.2 MATERIAIS POLIMÉRICOS

A palavra polímero é utilizada para classificar moléculas orgânicas formadas por um grande número de unidades moleculares repetidas, denominadas meros. Mero significa partes e poli, muitos. Então o significado oriundo da palavra polímeros é muitas partes (SILVA; SILVA, 2003).

Atualmente, pode-se dizer que o mundo é dos plásticos, ou mais tecnicamente, dos polímeros. Em todas as casas existem muitos materiais poliméricos estão sendo utilizados, vasilhames, alguns talheres, parcela dos produtos eletrônicos como televisões, geladeiras, fogões e outros são feitos de plásticos, cd's, sofá, entre outros materiais que compõem a vida diária são feitos de polímeros. Além disso, várias indústrias também utilizam uma grande quantidade desses materiais, como a indústria automobilística (os carros apresentam em média de 80% a 90% dos seus componentes feitos de plásticos), indústria farmacêutica (embalagens de remédios, cápsulas, entre outros), indústria de cosméticos e várias outras indústrias.

Segundo Silva e Silva (2003), os primeiros polímeros sintéticos foram descobertos na tentativa de se obter substâncias que reproduzissem os polímeros naturais, pois além dos polímeros sintéticos que também existem os polímeros naturais, dos quais os seres humanos são compostos organicamente, como as proteínas, as enzimas, o próprio DNA, entre outros. Diante dessa procura, com a falta da borracha natural durante a Segunda Guerra Mundial, houve motivação para pesquisas na tentativa de se produzir uma borracha sintética, com as mesmas propriedades da natural. Outro exemplo é o nylon, na busca da substituição da seda ele foi descoberto, sendo um polímero sintético muito utilizado hoje em dia.

Esses materiais tiveram forte implementação nos dias atuais graças a indústria petroquímica, pois a base desses compostos vêm do craqueamento do petróleo, originando a NAFTA, que por sua vez pode ser destilada em diversas moléculas menores, originando os polímeros (SILVA e SILVA, 2003).

Polímeros são materiais que apresentam em sua estrutura molecular unidades relativamente simples que se repetem, ligadas entre si por ligações covalentes do tipo sp^3 (13C-12C; 13C-13C; 14C-12C;...). Este tipo de ligação favorece uma grande estabilidade físico - química, formando longas cadeias e, portanto, resultando em compostos de alta massa molecular. Essas unidades que se repetem são conhecidas como *meros* ou *unidades monoméricas*. No entanto, existem polímeros que não possuem massa molecular muito elevada. Esses polímeros são chamados *oligômeros*. Para os polímeros que realmente possuem alta massa molecular (da ordem de 10^3 a 10^6 g/mol), usa-se a expressão *alto polímero* (high polymer).

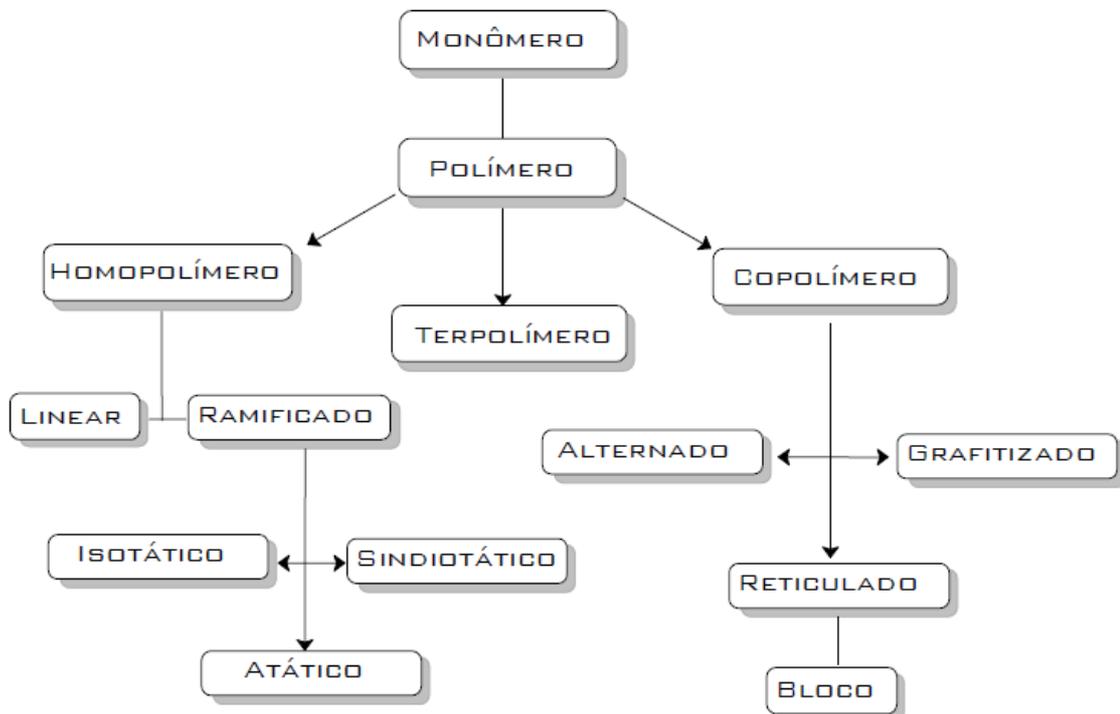
O número de meros que compõem a cadeia polimérica forma o que se denomina de grau de polimerização, designado pela letra n . Esse valor multiplicado pela massa molecular da unidade do monômero, dá o valor da massa molar média do polímero, de acordo com a Equação 6 (onde M_{pol} é a massa do polímero, n é o número de cadeias presentes do monômero que a compõe e M_u é a massa de um monômero). As propriedades físicas dos polímeros são afetadas pela massa molar e, como nos polímeros são esperados largas faixas de massa molar, existem grandes variações nas propriedades deles, contudo essa variação é assintótica, ou seja, tende para um valor que normalmente é usado como referência (CANEVAROLO, 2010).

$$M_{pol} = n M_u \quad (6)$$

Quanto a cristalinidade, os polímeros podem ser classificados como amorfos, onde na cadeia não ocorre nenhuma cristalização, ou seja, não há organização da cadeia polimérica, tais como os metais e cerâmicos. E os semicristalinos, aqueles cuja cadeia é parte amorfa e

parte cristalina, com organização em planos cristalinos. No caso dos polímeros, onde a cadeia molecular é muito grande não há formação de cadeia totalmente cristalina, mas sim semicristalina. Além disso, há outras classificações de acordo com a taticidade³, quanto a quantidade de meros (copolímeros, homopolímeros e terpolímeros), quanto a presença ou não de ramificação, entre outras (Figura 12).

Figura 12 – Esquema ilustrativo das classificações dos polímeros



Fonte : Silva e Silva (2003)

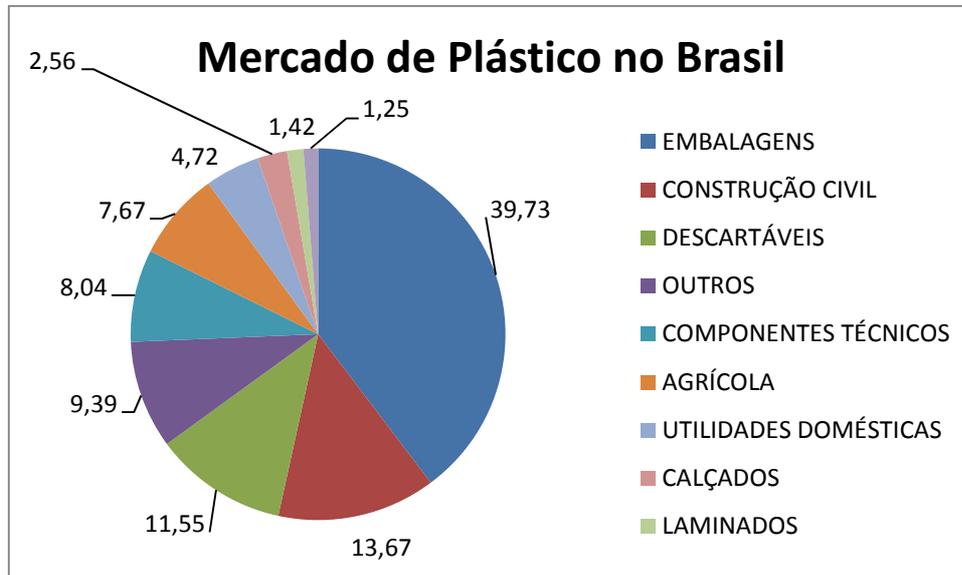
Os polímeros também podem ter sua cadeia sem nenhuma ramificação, com conformação na forma de zigue-zague, ou apresentar ramificações simples ou complexas, formando retículos, redes. “Como consequência imediata, surgem diferentes propriedades no produto, especialmente em relação à fusibilidade e solubilidade.” (SILVA e SILVA, 2003).

Dentre todas as classificações de polímeros a mais importante é a que define os plásticos⁴, em geral, pois são os que mais dominam o mercado de um modo geral, como pode se perceber na Figura 13 a seguir.

³ Taticidade – “orientação dos substituintes em relação ao plano formado pela cadeia principal (emzigue-zague, devido a ligação sp³) de um polímero supostamente linear”. (SILVA e SILVA, 2003)

⁴ Plásticos – Material polimérico de alta massa molar, sólido como produto acabado, podendo ser subdividido em Termoplásticos e Termofixos” (CANEVAROLO, 2010).

Figura 13 – A segmentação do mercado de plásticos no Brasil em 2003.



Fonte : Adaptado de ABIPLAST (2003)

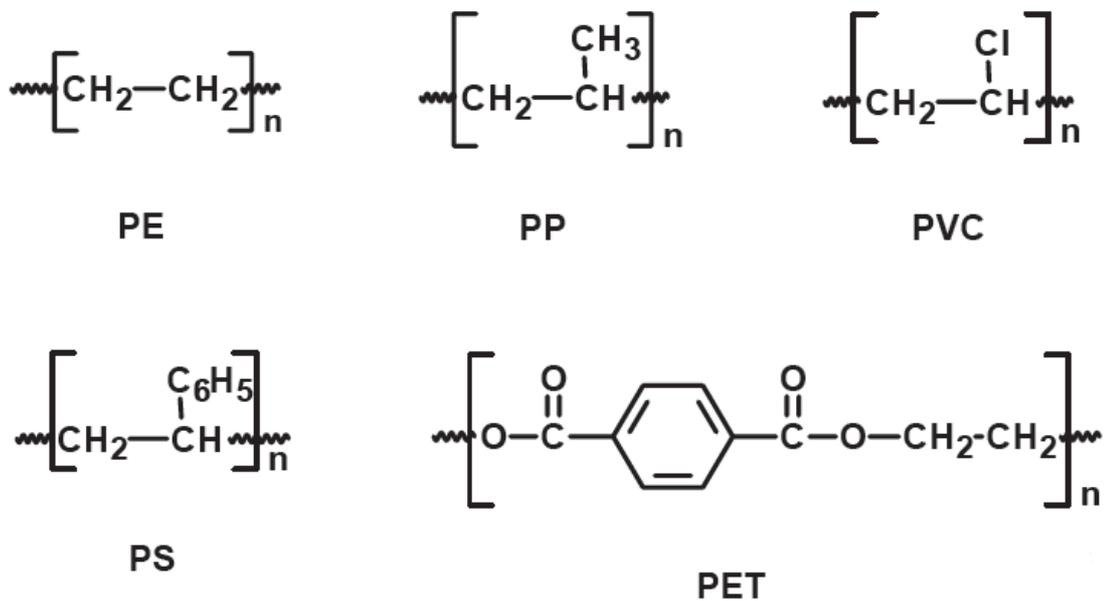
Isso mostra a grande utilização dos plásticos no Brasil, em especial na fabricação de embalagens, seguido dos materiais descartáveis. O que leva a uma grande preocupação ambiental, já que a maior parte dos polímeros não são materiais de fácil degradação e, muitos são tóxicos aos seres vivos, sendo um grande passo para o futuro a reutilização e/ou reciclagem dos mesmos, o que vem a gratificar ainda mais essa proposta de trabalho.

2.3.2.1 OS TERMOPLÁSTICOS – O CASO DO POLI (TEREFTALATO DE ETILENO), PET

[...] fluir quando sujeitos a um aumento de temperatura e pressão. Quando estes são retirados, o polímeros solidifica-se em um produto com formas definidas. Novas aplicações de temperatura e pressão produzem o mesmo efeito de amolecimento e fluxo. Esta alteração é uma transformação física, reversível. Quando o polímero é semicristalino, o amolecimento se dá com a fusão da fase cristalina. São fusíveis, solúveis, recicláveis. Exemplos : polietileno (PE), poliestireno (OS), poliamida (Náilon) (CANEVAROLO, 2010).

Os termoplásticos são os polímeros mais comercializados no Brasil, em especial o polipropileno (PP), o polietileno (PE), poliestireno (PS), o poli(cloreto de vinila) (PVC) e o poli(tereftalato de etileno) (PET), os quais apresentam a estrutura química definida abaixo na Figura 14 (DE PAOLI, 2008).

Figura 14 – Estrutura química dos principais plásticos comercializados no Brasil



Fonte : De Paoli (2008)

Dentre os materiais citados, o que possui uma das maiores quantidades a ser descartada no lixo urbano comum, os aterros sanitários, é o PET, compondo 21% do lixo, atrás somente dos polietilenos (PE), com 37%, segundo dados de Lima (2001).

O PET é um polímero transparente, inquebrável, impermeável e leve. Além disso é 100% reciclado.

O poli(tereftalato de etileno), conhecido com a sigla PET, foi desenvolvido em 1941 pelos ingleses Whinfield e Dicson. Em 1950 os fabricantes ICI e Du Pont começaram a fabricar fibras a partir desse polímero e, na década de 70 deu-se início a fabricação de garrafas plásticas (LIMA, 2001).

O PET surgiu em 1988, no Brasil, seguindo o resto do mundo. Primeiramente foi utilizado na indústria têxtil. Somente em 1993, passou a ser utilizado em larga escala no mercado de embalagens nacional (CEMPRE, 1998; CEMPRE-Informa, 2001).

Ele possui também baixo peso molecular e baixa viscosidade, o que lhe proporciona facilidade de moldagem, alta resistência a impacto, barreira a gás e odores, por isso a sua grande utilização na indústria de garrafas, refrigerantes, entre outros. Além de reduzir a produção e custos de transportes (LIMA, 2001).

A Tabela 2 mostra a produção e reciclagem do PET em 2001.

Tabela 2 – Produção e consumo de PET, segundo fonte do CEMPRE-Informa, 2001

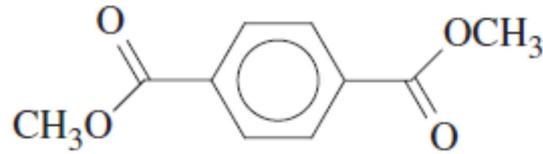
ANO	DEMANDA NACIONAL de resina PET (ton)	DEMANDA PARA REFRIGERANTE	RECICLAGEM PÓS CONSUMO	
			(ton)	% RECICLADO DEMANDA NACIONAL
1994	80 mil	-	3 mil	3,75
1995	120 mil	-	18 mil	15,00
1996	150 mil	-	22 mil	14,70
1997	211 mil	185,7 mil	30 mil	14,22
1998	260 mil	223,6 mil	40 mil	15,38
1999	286 mil	237,4 mil	50 mil	17,48
2000	315 mil	255,1 mil	67 mil	21,27

Fonte : CEMPRE-Informa, 2001

O PET apresenta-se sob duas formas, amorfa e semicristalina, contudo o mais comum é o semicristalino. Segundo Canevarolo (2010), em termos de volume específico, a fase amorfa apresenta $0,749\text{cm}^3/\text{g}$ e a cristalina $0,687\text{cm}^3/\text{g}$, sendo sua densidade de $1,33\text{g}/\text{cm}^3$ da fase amorfa e $1,455\text{g}/\text{cm}^3$ da cristalina. Possui entalpia de fusão $140\text{J}/\text{g}$ e massa molar do mero de $192\text{ g}/\text{mol}$. Seu grau de cristalinidade depois de processado fica de 5 a 60% a depender do uso. No caso do gargalo da garrafa descartável de 2 Litros são 5%, o corpo 30% e grãos para fiação, 60%, segundo o mesmo autor.

Segundo Wiebeck e Harada (2006), a massa molar ponderal média do PET usada para confecção de garrafas pode chegar a $45\ 000\text{ g}/\text{mol}$. Para fabricação de fibras a massa molar varia de 15000 a $20000\text{ g}/\text{mol}$. Em termos de aspectos reológicos deve-se levar em conta a influência da massa sob a viscosidade de maneira significativa, pois o aumento da massa causa um maior emaranhamento das moléculas dificultando sua capacidade de fluir e aumentando assim a sua viscosidade. Também aumenta a resistência ao impacto, pois quanto maior a massa maior a capacidade de absorver a energia

A obtenção do PET, segundo Gnanou e Fontanille (2008), é através da esterificação lenta e direta ou, principalmente pela transesterificação catalisada entre o dimetil tereftalato (Figura 15) e glicol. Logo, é um intermediário importante obtido pela esterificação do ácido tereftálico, o qual é obtido pela oxidação controlada do p-xileno (metil tolueno).

Figura 15 – Composição química do dimetil tereftalato (DMT)

Fonte : Gnanou e Fontanille (2008)

A polimerização é realizada em massa em duas etapas distintas. Na primeira delas realiza-se uma oligomerização (por esterificação ou transesterificação) que elimina a maior parte dos subprodutos de condensação (água ou metanol); esta operação é catalisada por derivados metálicos (Ti, Mn, Ca, Zn, Sn, etc). Na segunda etapa, uma eliminação de água ou metanol residual é feita sob intensa agitação sob vácuo em alta temperatura. É importante ressaltar que todos os processos usados geram dietileno glicol ($HO-CH_2-CH_2-O-CH_2-CH_2-OH$) durante a poliesterificação. Esta molécula pode, por sua vez, ser incorporada nas cadeias por copolimerização. Sua quantidade varia entre 2% e 15% no polímero final (GNANOU; FONTANILLE, 2008).

Segundo Gnanou e Fontanille (2008), o PET apresenta alto valor de energia coesiva ($\delta = 20,5 \text{ J}^{1/2}\text{cm}^{-3/2}$), isso explica o seu alto valor de ponto de fusão (T_m) ser alto, na faixa de 264°C , sendo que sua T_g , fica entre 65°C e 80°C , o que é explicado devido a massa molar, quantidade de água e o grau de cristalinidade do mesmo. No caso do PET amorfo, a T_g é de 70°C .

Além disso, a cristalização do PET no estado fundido é relativamente lenta e, em temperatura ambiente ele pode ser obtido e mantido no estado amorfo, já que sua T_g é acima da ambiente. Vale ressaltar que o grau de cristalinidade pode ser controlado para se alcançar as características finais desejadas. No caso, para obter o material amorfo é necessário resfriamento brusco, já para se ter a condição semicristalina deve ser mantido no molde quente por tempo necessário à cristalização. Desse modo, a história térmica desse polímero é que determinará suas propriedades físicas finais (GNANOU e FONTANILLE, 2008).

Para a utilização do PET como fibra ele deve ser altamente orientado por estiramento e ser “mantido desta forma na temperatura de cristalização máxima antes de ser resfriado” (GNANOU e FONTANILLE, 2008).

Seu grau de cristalinidade depende na quantidade de unidades de dietileno glicol incorporadas assim como do grau de estiramento, enquanto que a orientação da cadeia em relação ao eixo da fibra depende apenas do grau de estiramento que é cerca de 600% (GNANOU; FONTANILLE, 2008).

A Tabela 3, modificada de Montenegro *et al.* (2000), mostra algumas propriedades físicas finais do PET.

Tabela 3 – Propriedades do Poli (tereftalato de etileno), PET

CARACTERÍSTICAS DO POLÍMERO	VALORES
Massa Molecular	15000 - 42000 g/mol
Densidade	1,33 - 1,45 g/cm ³
Índice de Refração	1,65 - 1,66
Temperatura de Fusão TM	250 - 270°C
Temperatura de Transição Vítrea (T _g)	70 - 74°C

Fonte : MONTENEGRO et al, 2000.

Segundo Wiebeck e Harada (2006), a viscosidade intrínseca das resinas comerciais de PET, medida numa mistura de fenol com tetracloroetano na proporção de 60/40 (em volumes), pode variar de 0,45 a 1,2dL/g, a depender da aplicação final.

Além disso, segundo De Paoli (2008), a viscosidade intrínseca do PET diminui à medida que ele vai sendo reprocessado e, conseqüentemente, a massa molar média também decresce, mesmo que haja uma secagem bastante rigorosa durante o processamento. A Tabela 4 modificada de De Paoli (2008), são apresentados os valores de massa molar após 6 processamentos.

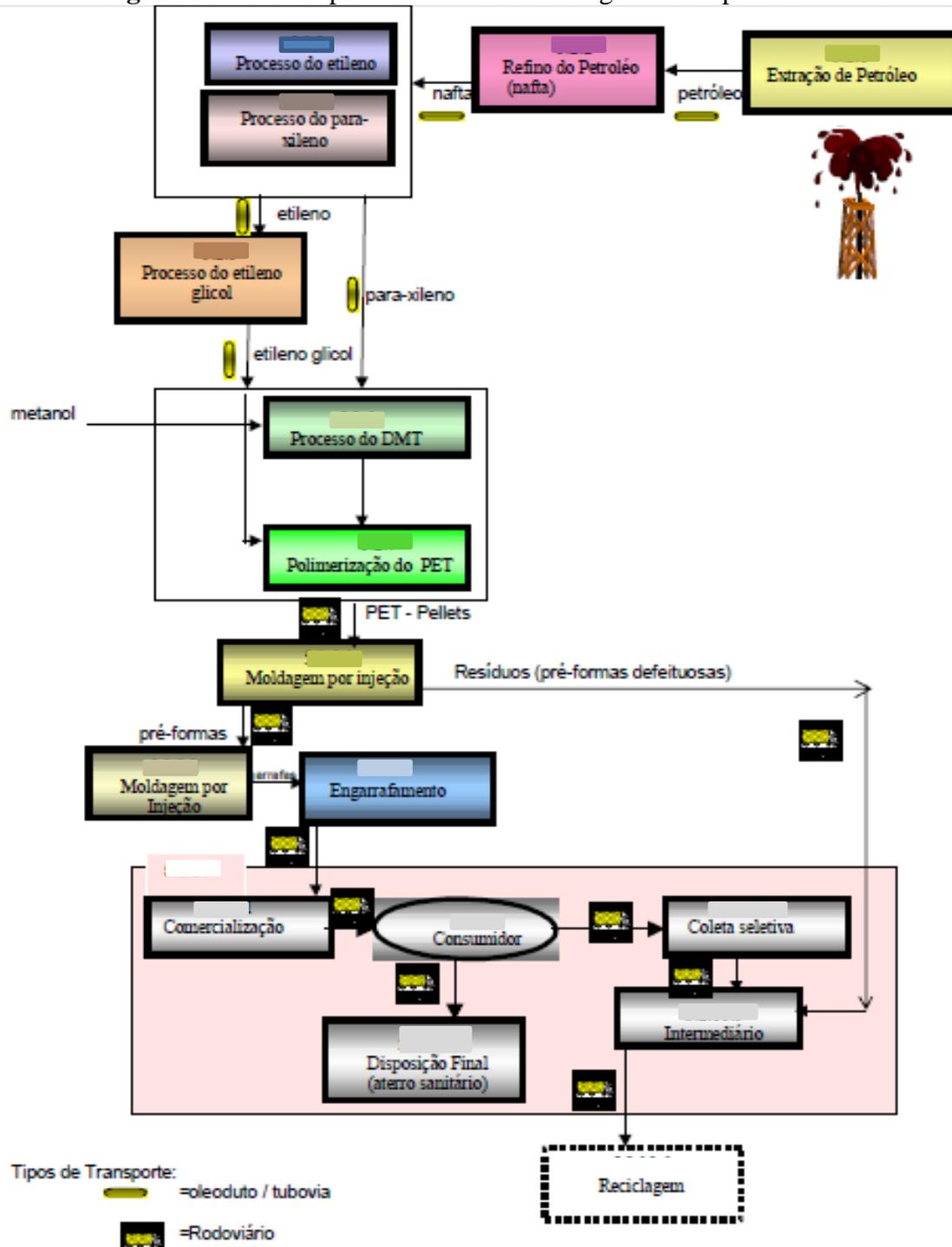
Tabela 4 – Viscosidade intrínseca e Massa molar viscosimétrica de 6 processamentos de PET

CICLOS DE PROCESSAMENTO	VISCOSIDADE INTRÍNSECA (dL/g)	MASSA MOLAR VISCOSIMÉTRICA (M _w) - (g/10 ³ mol)
0	0,7800 (± 0,0021)	45
1	0,6910 (± 0,0019)	37
2	0,6443 (± 0,0044)	33
3	0,6051 (± 0,0011)	30
4	0,5289 (± 0,0047)	25
5	0,4780 (± 0,0006)	21

Fonte : De Paoli, 2008.

Segundo Lima (2001), o processo de produção do PET na região metropolitana de Salvador não é tão diferente de outras regiões brasileiras (Figura 16).

Figura 16 – Cadeia produtiva do PET na Região Metropolitana de Salvador



Fonte : Lima (2001)

2.4 O ESTADO DA ARTE

Silva *et al.* (2011) realizaram um projeto com o objetivo de analisar as propriedades térmicas do PU de Mamona, com adição de bagaço de cana-de-açúcar. Em seu projeto, obtiveram o bagaço de cana-de-açúcar em moendas da Paraíba, trataram o mesmo com água deionizada⁵, depois picotando e triturando o mesmo e adicionando-o a mistura de resina de PU de Mamona em moldes cilindros de altura de 17cm e diâmetro de 7,5cm, nas proporções de 5, 10 e 15% de bagaço no PU, comprovando as aplicações do compósito como isolante térmico comercial. E também, apresentando uma alternativa ao resíduo gerado na indústria sucro-alcooleira, principalmente na região, na qual há grandes quantidades desse resíduo.

Outro trabalho interessante na área é de Vieira (2011), no qual se realizou uma alternativa para gerenciamento de resíduos de madeira, na forma de painéis com a utilização de resina polimérica na proporção de 5, 10, 20 e 30% de madeira, apresentando uma alternativa para os resíduos gerados nas serrarias do Espírito Santo o qual fica em torno de 50,7% do volume geral de toras utilizadas. Nesse projeto, Vieira (2011), analisou as razões de compactação e fez testes de absorção de água, alcançando resultados satisfatórios e lucrativos com essa alternativa.

Matos e Schalch (2007) buscaram analisar a quantidade de resíduos poliméricos, pós-consumo, gerados no município de São Carlos, em São Paulo. Em seu trabalho, concluíram que 10,47% do lixo urbano desse município é de resíduos poliméricos, sendo que desse total a grande maioria é de PET, com 35,96%, mostrando um tendência de crescimento de resíduos de PET e de termoplásticos utilizados em embalagens, enfatizando a grande importância de se encontrar alternativas para esse resíduo.

Damasceno *et al.* (2009) buscaram alternativas na fabricação de habitações ecológicas. Nesse trabalho foi aplicado o PET como fundação tipo sapata corrida solo-cimento, utilizando fibras de formato retangular desse material, proporcionando acréscimo na resistência do solo aumentando a ductilidade e diminuindo a queda no valor da ruptura.

Lenço (2010) caracterizou o bagaço de cana para geração de energia. Em seu trabalho fez uma análise das propriedades térmicas do mesmo chegando a valores de Tg e determinações quantitativas desse material. Assim, chegou a um método de mensuração apropriado, concluindo a importância da utilização desse material como componente energético.

⁵ “Na produção da dita **água deionizada** procede-se passando a água destilada em uma resina de troca iônica.”(WIKIPÉDIA, 2012).

Lima (2001) realizou um estudo da cadeia produtiva do PET na região Metropolitana de Salvador, chegando a conclusões sobre a cadeia produtiva do mesmo e valores obtidos com relação a reciclagem desse material na região. Concluiu que o PET é um dos materiais plásticos mais presente nos lixos urbanos, principalmente, na forma de embalagens de refrigerante, sendo que apenas 12,31% desse material é reciclado por algumas empresas.

Junior (2007) analisou a utilização de fibras de vidro com matrizes poliméricas nas pastas cimentícias na construção civil. Ele mostrou que a utilização desse material vem crescendo continuamente em razão de seu custo menor em relação a fibra de aramida e de carbono.

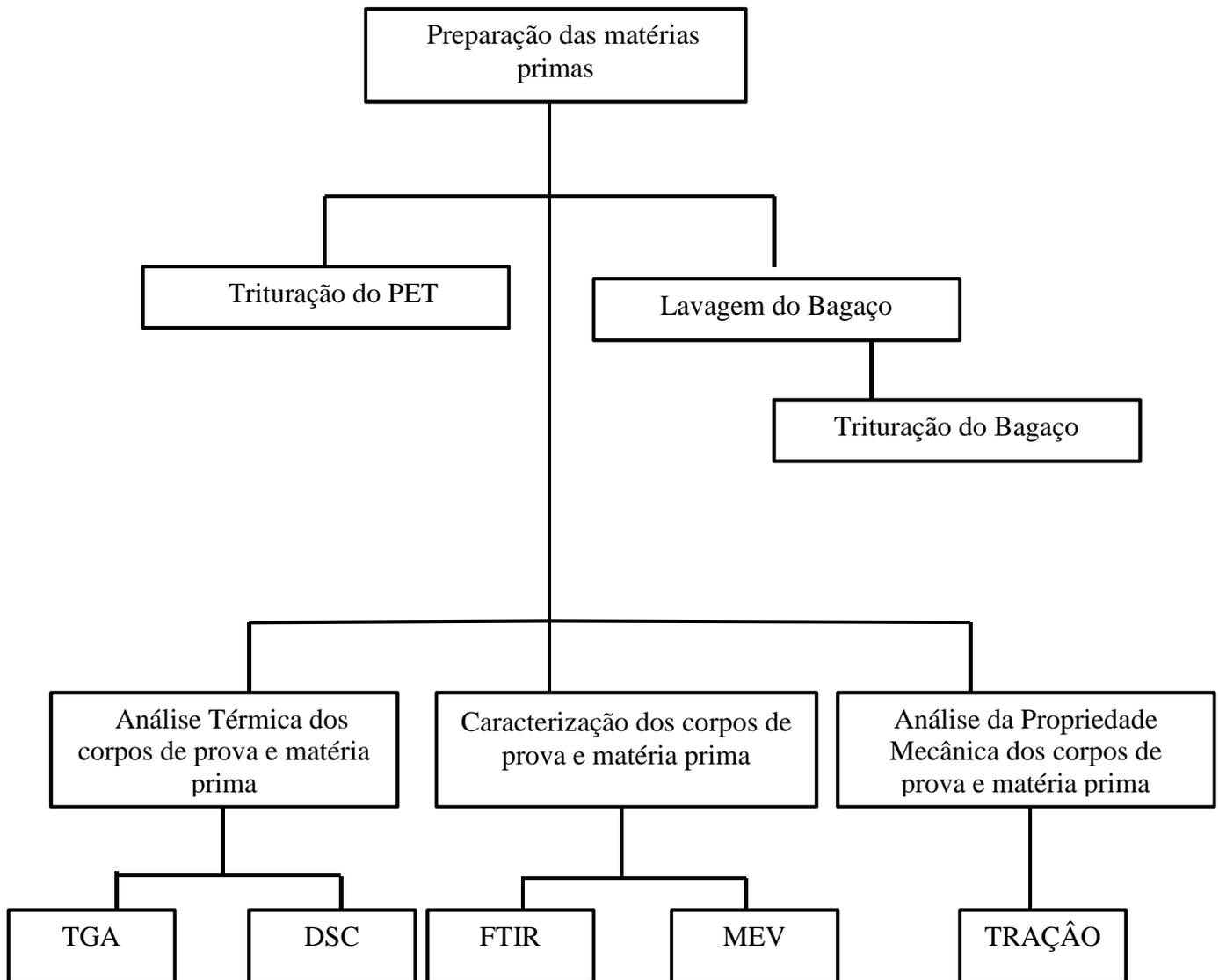
Risson *et al.* (1998) realizaram um trabalho com a reutilização de laminados na fabricação de reforços com resinas poliésteres. O processo utilizado foi o BMC, testando cinco formulações diferentes de resina poliéster, mostrando que em relação a resistência a tração a substituição pelo laminado na resina apresentou um aumento de 23% quando se acrescenta um quantidade de 20% em peso.

Anjos (2009) realizou um projeto no qual se trabalhava a adição de bagaço de cana em pastas cimentícias de poços de petróleo como aditivo mineral. A adição foi realizada nos valores de 10, 20, 30, 40 e 59%, na tentativa de se melhorar a microestrutura da pasta, em dois ciclos de temperatura de cura, duas baixas, 22 e 38°C, e uma alta, a 280°C, a pressões de 7 MPa. Nesse trabalho verificou-se que com essa adição melhorou-se a estabilidade em altas temperaturas da pasta que evita a diminuição da resistência a compressão da pasta com o tempo.

Santos (2012) propôs a produção de um compósito de PET com fibras de sisal e plastificantes oriundos de fontes renováveis, estudando o processamento desses materiais por meio de pressão e temperatura em diferentes proporções de plastificantes e com diversos ciclos de temperatura trabalhados. A melhor composição alcançada foi aquela em que se utilizou o glicerol em 40% de massa de PET, com 15% de sisal, obtendo excelentes resultados, com o ciclo temperatura base para esse trabalho proposto.

3 METODOLOGIA

O Fluxograma a seguir mostra como a metodologia foi desenvolvida.



3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse trabalho será aproveitado o resíduo gerado pela moagem da cana-de-açúcar. O bagaço composto de material fibroso, como aditivo ao material polimérico Poli (tereftalato de etileno), o PET (outro resíduo impactante ao meio ambiente) com maior parte de destino sendo o aterro sanitário e, considerando tratar-se de um material não biodegradável, formando assim um material compósito com características isolantes.

Para o bagaço de cana, foram aproveitados os resíduos gerados em lanchonetes do centro de Belo Horizonte. No centro da capital mineira, considerando-se os arredores da Praça

Sete (Figura 17), existem em média 40 lanchonetes que realizam a venda de caldo cana, ou garapa, como é chamada pelos mineiros. Cada lanchonete analisada, vende em torno de 100 a 150 copos de 350 mL por dia (dados coletados em entrevistas locais de forma informal), isso equivale a uma média de 30,897 kg de caldo de cana consumido, gerando num total por dia de 173,04 kg de bagaço, somente no centro de Belo Horizonte. Essas lanchonetes funcionam em média 12 horas de serviço diário de segunda a sábado, sendo que nos domingos apenas parte delas permanecem abertas durante 5 horas. Isso gera um total 77 horas de serviço semanal, despejando em torno de 1211,28 kg de bagaço por semana que são acondicionados nos aterros sanitários nos arredores da cidade.

Figura 17 – Mapa ilustrativo da área de abrangência da maior parte das lanchonetes que comercializam caldo de cana – de – açúcar próximo à Praça Sete em Belo Horizonte



Fonte : GOOGLE MAPS, 2013

As amostras foram então tratadas com água destilada por um período de 2 semanas (14 dias), sendo feita trocas de água a cada 8 horas, para eliminar qualquer resíduo de glicose que ainda estaria presente (Figura 18). Depois foram secadas em estufas por 48 horas à 120° C e, por fim, trituradas em um liquidificador industrial para a confecção dos corpos de prova.

Figura 18 – Foto do tratamento do bagaço de cana-de-açúcar com água destilada.



Fonte : Foto da própria autora

Para o PET, foi utilizado o resíduo de garrafas plásticas de refrigerante transparentes para evitar a presença de corantes que poderiam modificar as propriedades do compósito. As garrafas foram divididas em três partes: bico, meio e fundo. Foram aproveitadas as partes centrais das garrafas, por apresentarem menor dureza, o que facilitou a sua realização no laboratório de polímeros da Faculdade de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais e, finalmente num liquidificador comercial obtendo o PET moído (Figura 19).

Figura 19 – Fotografias ilustrativas do processo



(a) Foto ilustrativa da extrusora



(b) Foto ilustrativa do triturador



(c) Foto ilustrativa do liquidificador comercial



(d) Foto ilustrativa do produto final (PET moído)

Fonte : Fotos da própria autora

3.2 CONFECCÃO DOS CORPOS DE PROVAS

Para a confecção dos corpos de provas, o bagaço foi colocado em água destilada por 14 dias, com trocas de água em intervalos regulares de 8 horas. O bagaço foi filtrado e depois secado por 48 horas em estufa de secagem e esterilização de 40 L da marca Nova Técnica à 120°C (Figura 20), e finalmente triturado em um liquidificador comercial em uma granulometria mais adequada a mistura com o PET.

Figura 20 – Foto da estufa



Fonte : Foto da própria autora

Para o PET, foram utilizados o meio de garrafas de refrigerante transparentes. As partes então foram trituradas em equipamentos adequados, como ilustrado na Figura 19, adquirindo uma granulometria menor, mais fina (entre 1 e 2 mm), facilitando a aderência e mistura ao bagaço.

Para alcançar compatibilização adequada aos dois compostos na mistura, utilizou-se como plastificante a glicerina bi – destilada (Figura 21). O uso do plastificante tornou-se necessário para a redução da temperatura de fusão do PET, e assim evitar a queima (carbonização) do bagaço no ciclo de temperatura utilizado. Os plastificantes são misturados à resina polimérica durante o processamento, tornam o produto mais macio e flexível e baixam a temperatura de transição vítrea (DE PAOLI, 2008). A mistura foi realizada misturando metade do plastificante com o bagaço de cana e, a outra metade com o PET, após realizada a mistura manualmente, juntou-se os materiais e deixou-os curtindo por um período de 24

horas, para que o material seja curtido no plastificante, facilitando a compatibilização. Depois levou-os ao molde e realizou o processo de compressão térmica.

Figura 21 – Foto ilustrativa da glicerina bi – destilada utilizada como plastificante



Fonte : Foto da própria autora

Por fim, foram confeccionados 4 tipos de corpos de prova retangulares de medidas 60mm x 20mm x 2mm, de massa em torno de 0,20g de PET e bagaço de cana e, os compostos somente de PET, completando um total de 50 corpos de prova fabricados nas proporções da Tabela 5.

Tabela 5 – Composição dos Corpos de Prova

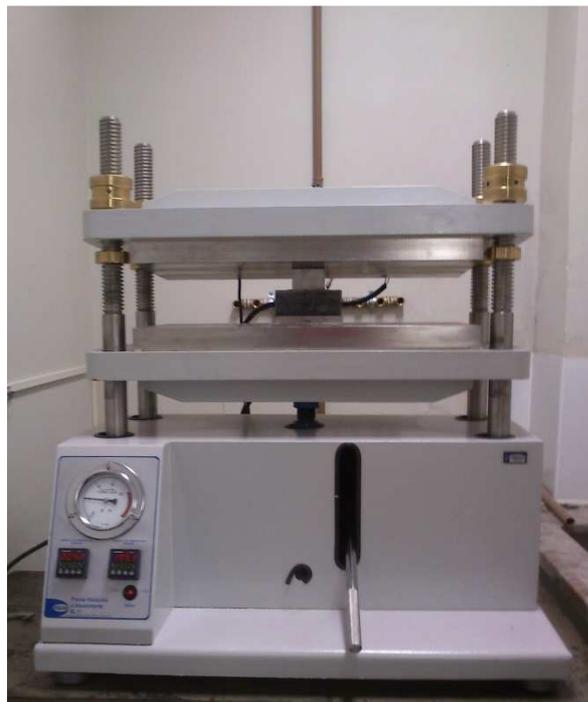
Corpo de Prova	PET (%)	Bagaço de Cana (%)
1	100	0
2	90	10
3	85	15
4	80	20

Fonte : Autoria da própria autora

Para tal, foi utilizado a prensa hidráulica com aquecimento SL 11 da marca SOLAB, do laboratório de Polímeros do Departamento de Materiais do CEFET-MG (Figura 22), de acordo com os ciclos de temperatura 1 e 2, visto que foram os mais adequados encontrados

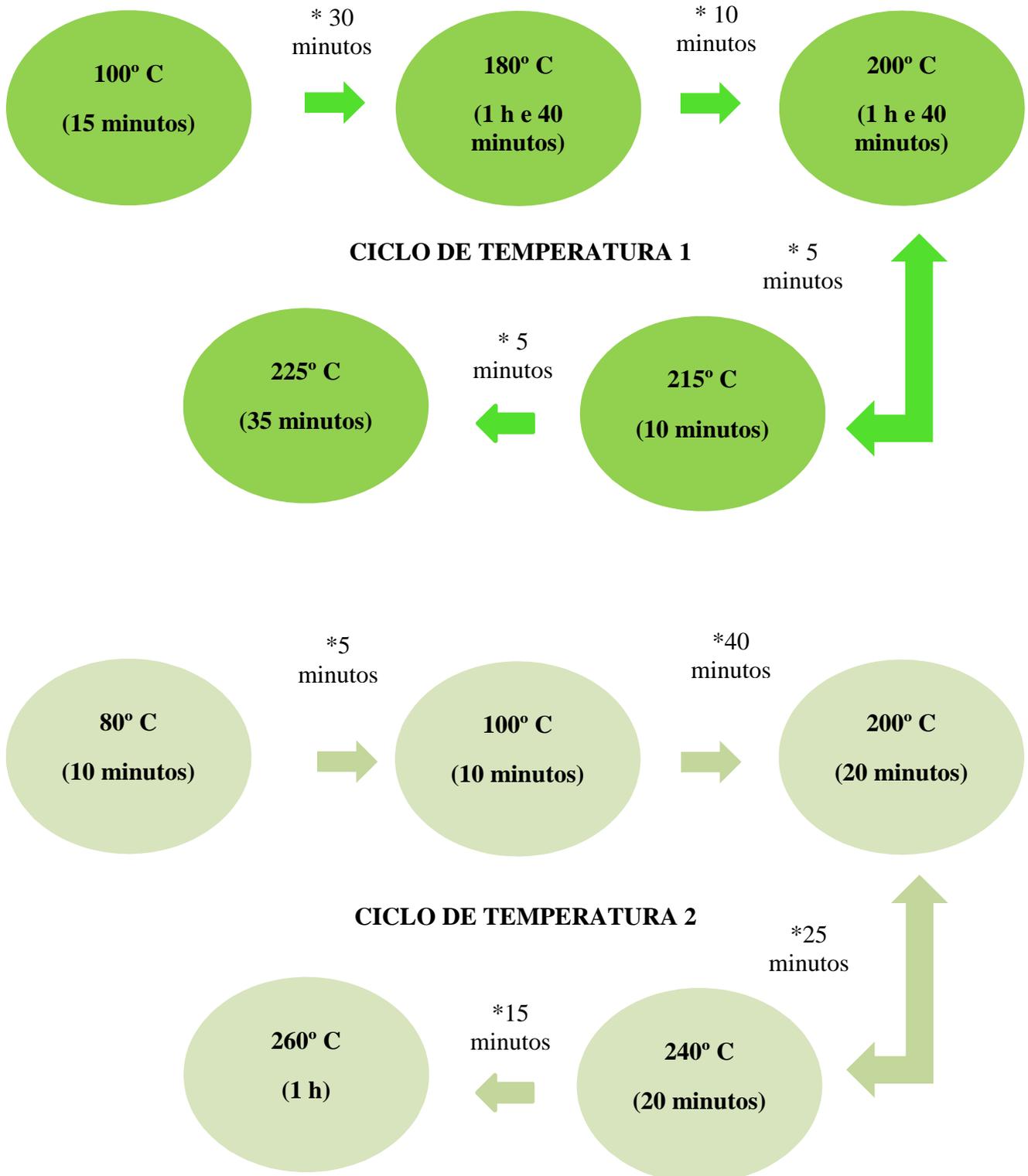
para esses materiais de acordo com o trabalho de Santos (2012) (Figura 23). Foi mantida uma carga constante de 0,5 Tonelada com um molde tipo macho e fêmea nas medidas relacionadas acima de aço inoxidável, fundindo o PET e assim possibilitando a mistura com o bagaço de cana, lembrando que como a temperatura de transição vítrea do bagaço fica em torno de 210°C e para melhorar a compatibilidade entre a fibra e o polímero, tornou-se necessário a utilização do plastificante glicerina bi – destilada na proporção de 40% em massa de PET para redução da sua temperatura de fusão, já que o plastificante aumenta a distância entre as cadeias poliméricas reduzindo as interações intermoleculares entre essas, além de aumentar a molhabilidade das fibras pelo PET, pois diminui a viscosidade do polímero, além da ocorrência de interações intermoleculares com a matriz de PET reciclado e o bagaço (SANTOS, 2012). Também se fez uso de folha de teflon para evitar aderência e facilitar a retirada do corpo de prova do molde.

Figura 22 – Foto da prensa utilizada para fabricação dos corpos de prova



Fonte : Foto da própria autora

Figura 23 – Ciclos de temperatura utilizados 1 (PET, Bagaço e Glicerina) e 2 (PET)



* Intervalo de tempo das rampas de aquecimento

Fonte : Fluxograma adaptado de SANTOS (2012)

3.3 ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES

3.3.1 ENSAIOS DE DETERMINAÇÕES DE PROPRIEDADES TÉRMICAS

Em relação aos ensaios de propriedades térmicas foram realizadas duas abordagens. Uma primeira caracterizando as matérias – primas utilizadas, o bagaço de cana e o PET e, a segunda propondo a análise dos corpos de prova fabricados, ou seja, do compósito em si.

A Calorimetria Exploratória Diferencial, o DSC do laboratório do Departamento de Materiais do CEFET – MG, da Shimadzu, modelo DSC-60 foi utilizada para traçar o perfil térmico das amostras (Figura 24), esse equipamento por meio de atmosfera controlada por nitrogênio, analisa as perdas térmicas da amostra em função da variação controlada da temperatura em uma taxa de aquecimento constante. Sendo assim, é possível por esse método averiguar as temperaturas de T_g (Temperatura de transição vítrea), T_m (Temperatura de fusão) e T_d (Temperatura de Degradação), encontrando assim a melhor temperatura de trabalho na prensa, já que essa temperatura deve ser maior que a T_m, porém abaixo da T_d, considerada a temperatura ideal de trabalho, além de ser possível a obtenção do calor específico de cada material utilizado e do compósito em si.

A atmosfera utilizada foi de nitrogênio, seguindo apenas uma corrida até a temperatura de 400°C, com fluxo de gás N₂ de 50 mL/min com amostra de 0,5 mg.

Figura 24 - Equipamento de DSC



Fonte : Foto da própria autora

Além da análise por DSC, também foi realizada a análise de Termogravimetria (TGA) e Termogravimetria Diferencial (DTA) da Shimadzu, modelo DTG – 60 H do Departamento de Química do CEFET-MG (Figura 25), em atmosfera de nitrogênio com fluxo de gás de 50 mL/min, até uma temperatura de 500°C, com amostras de 3,25mg para verificação da perda de massa em cada corpo de prova, assim como das matérias – primas utilizadas para a fabricação do compósito.

Figura 25 - Equipamento de DTA e TGA



Fonte : Foto da própria autora

E por último, com o propósito de verificar as propriedades isolantes, foi realizada uma análise qualitativa de condutividade dos materiais de partida em relação ao compósito, visto que devido ao tamanho do corpo de prova trabalhado, não seria possível determinar com exatidão o valor de condutividade do mesmo. Dessa forma, foi realizada a tentativa de se detectar parâmetros imprescindíveis para materiais isolantes, como porosidade e formação de lâminas no corpo de prova, além de determinar o valor de densidade aparente dos mesmos. Sabendo-se o valor de condutividade do PET, do bagaço e do ar (havendo porosidade indica presença de ar), pode-se concluir que o valor de condutividade do material proposto será uma média entre esses três materiais.

3.3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Em relação à caracterização dos corpos de prova, realizou-se a abordagem do material in natura (sem misturar) e dos corpos de prova fabricados. A abordagem in natura teve o propósito de caracterizar a matéria-prima utilizada. Já os corpos de prova, a caracterização teve o intuito de se conhecer a microestrutura e composição química do material proposto, verificando modificações que ocorreram.

Uma das análises de caracterização empregada foi a espectrometria óptica (FTIR), pois essa análise indica os grupos orgânicos presentes na microestrutura do material sendo possível avaliar melhor as interações que estão ocorrendo entre o PET e o bagaço de cana e analisar a viabilidade da mistura, além de verificar a atuação do plastificante. Essas análises foram realizadas no equipamento da marca IRPrestige – 21 (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer), do Departamento de Química do CEFET–MG, em atmosfera de nitrogênio, por meio da técnica ATR, em amostras de 5 mg, numa faixa do espectro de 4000 a 400 cm^{-1} (Figura 27).

Figura 26 – Foto do Espectrômetro óptico



Fonte : Foto da própria autora

Os espectros de infravermelho foram realizados da matéria prima e do composto final.

A análise da microestrutura formada por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) para verificar a interface da mistura formada, bagaço – pet, averiguando se a interface se deu de maneira compatível ou não, melhorando as propriedades do polímero com a adição

da fibra e também verificando a presença de porosidade que é significativa no caso de materiais isolantes. Foi realizada com processo de metalização em ouro antes da análise, com tensão de 10KV, utilizando atmosfera de nitrogênio e aumentos de 50x, 100x, 200x e 450x no equipamento SEDX da Shimadzu, modelo SSX 550, Superscan, do Departamento de Materiais do CEFET–MG (Figura 27),

Figura 27 – Foto do MEV



Fonte : Foto da própria autora

Além das análises no Espectrômetro no Infravermelho (FTIR) e no MEV, também foi realizada a verificação da densidade aparente dos materiais, medindo seus volumes com um micrômetro e pesando as amostras em balança com precisão de $\pm 0,01\text{g}$ e calculada segundo a equação 7, para assim identificar uma propriedade importante no que tange a características de isolantes térmicos.

$$D_g = \frac{M_s (\text{g})}{V (\text{cm}^3)}$$

(7)

3.3.3 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADE MECÂNICA

Depois de realizada a caracterização dos corpos de prova, realizou-se ensaios mecânicos destrutivos com o interesse de verificar melhoras nas propriedades mecânicas dos

mesmos, obtendo-se como comparativo o PET puro produzido pelo Ciclo de Temperatura 2, mostrado anteriormente.

Esse ensaio foi realizado em máquina de tração AG - X da Shimadzu com capacidade de 10 KN do laboratório de polímeros do Departamento de Materiais do CEFET-MG (Figura 28). O ensaio de tração foi realizado segundo norma ASTM D638, nos quatro tipos de corpos de prova (Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3 e Tipo 4) em triplicatas, com velocidade de 3 mm/min em atmosfera adequada, prendendo-os de maneira adequada a não causar trincas nas extremidades devido a garra, até que se alcançasse a ruptura dos mesmos.

Figura 28 – Foto do equipamento de tração



Fonte : Foto da própria autora

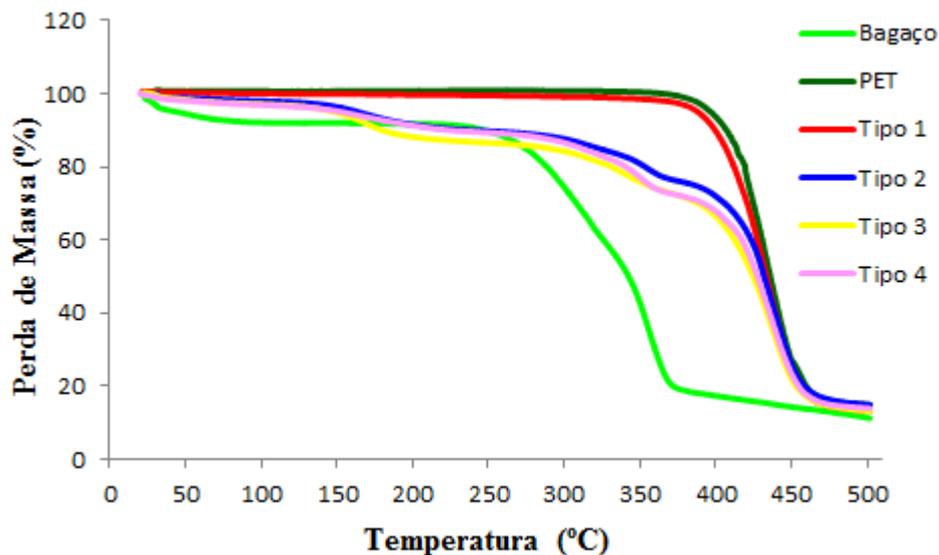
4 RESULTADOS

4.1 RESULTADO DAS ANÁLISES REFERENTES ÀS PROPRIEDADES TÉRMICAS

4.1.1 RESULTADO DA ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

O comportamento térmico das amostras teve grande alteração com a adição da fibra. No entanto nenhuma alteração significativa ocorreu devido ao processo de compressão térmica, visto que os gráficos do PET reciclado e do PET sob compressão (Tipo 1) estão se sobrepondo, conforme observado na Figura 29.

Figura 29 – Representação gráfica da Análise Termogravimétrica



Fonte : Autora

De acordo com o gráfico da Figura 29, percebe-se que a presença do bagaço faz com que a perda de massa ocorra em temperaturas mais baixas. No entanto, não foi observado grandes alterações da temperatura de início da perda de massa em relação aos três tipos de corpos de prova obtidos com bagaço (Tipo 2, Tipo 3, Tipo 4). Como era esperado a perda de massa ficou entre os valores do PET puro (Tipo 1 e PET reciclado) e o bagaço, o qual apresentou maior perda de massa, iniciando o processo em torno de 226° C, enquanto o Tipo 1 e o PET reciclado tiveram o início de perda de massa (aqui se subentende degradação térmica do material) em torno de 360° C. Nos três compósitos (Tipo 2, Tipo 3 e Tipo 4)

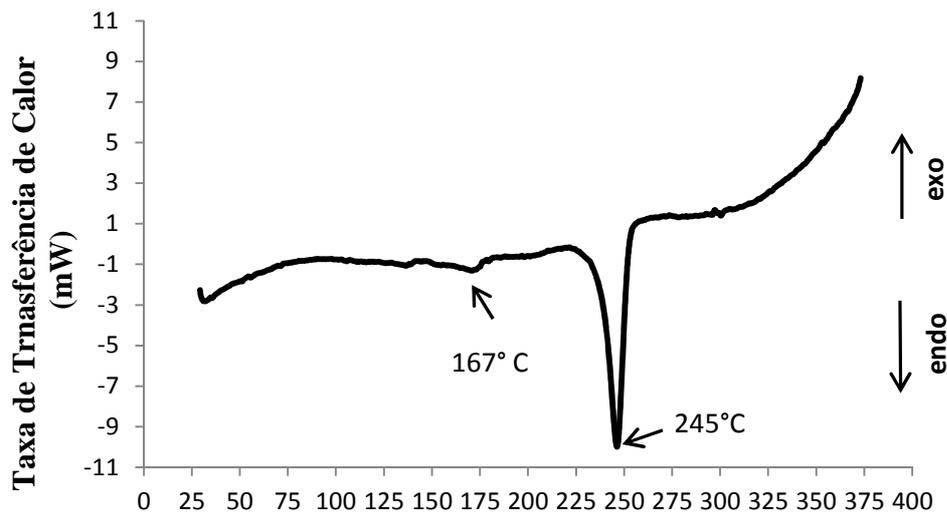
apresentaram perda de massa iniciando em torno de 260° C, próximo da média entre os dois valores relativo ao materiais que os compõem.

4.1.2 RESULTADO DAS ANÁLISES DA CALORIMETRIA DIFERENCIAL EXPLORATÓRIA (DSC)

4.1.2.1 CALORIMETRIA DIFERENCIAL EXPLORATÓRIA (DSC) DO PET RECICLADO

A curva do DSC do PET reciclado indicou a existência de dois processos endotérmicos, segundo percebe-se na Figura 30 abaixo.

Figura 30 – Representação gráfica do DSC do PET reciclado



Fonte : Autora

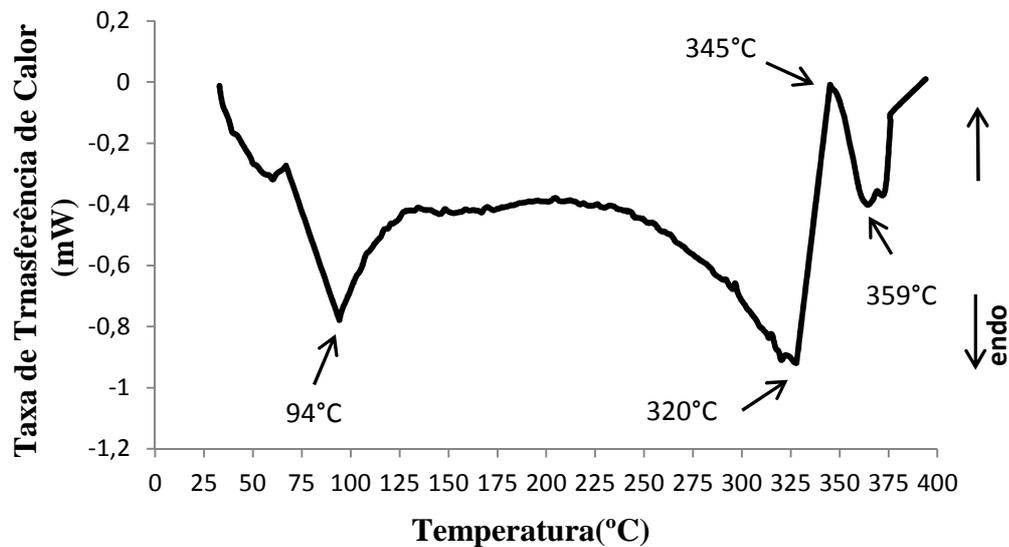
Verifica-se que há um deslocamento da linha de base em 167° C, isso ocorreu devido a um evento endotérmico de fusão de fração de cristais formados a partir de cadeias com menor massa molar média (MARCONCINI; RUVOLO FILHO, 2006), visto que o mesmo tinha sido tratado termicamente (com aquecimento à 180° C durante 4 horas) antes da análise do DSC, logo não deve existir presença de água residual no material. O maior evento endotérmico ocorreu à 245° C, indicando o ponto de fusão do material. Contudo, não foi possível detectar o evento referente a Transição Vítreo do PET reciclado, a qual segundo a literatura ocorre por volta de 80° C, essa mudança na linha de base do DSC normalmente não é verificada com facilidade (MARCONCINI; RUVOLO FILHO, 2006).

Comparando com os valores de TGA, verifica-se que o início de perda de massa do PET reciclado, ou seja, de sua degradação, inicia-se em torno de 360° C, um valor 115° C a mais do que o ponto de fusão do mesmo (245° C), o que indica que o material apresenta uma boa estabilidade térmica acima do seu valor do ponto de fusão.

4.1.2.2 CALORIMETRIA DIFERENCIAL EXPLORATÓRIA (DSC) DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

A curva de DSC do bagaço tratado, ao contrário da referente ao PET reciclado, apresenta três eventos endotérmicos e um evento exotérmico, como verifica-se na Figura 31 abaixo.

Figura 31 – Representação gráfica do DSC do Bagaço de cana-de-açúcar



Fonte : Autora

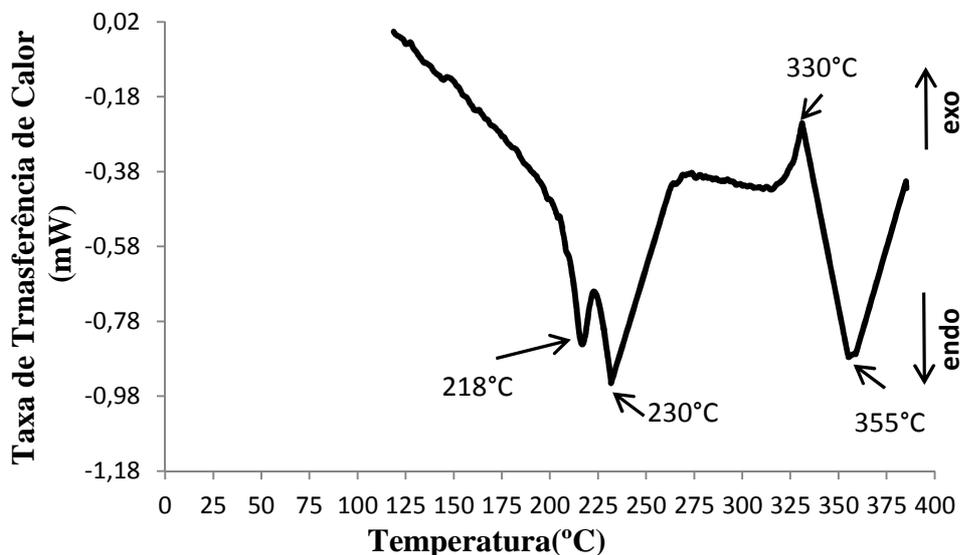
No caso do DSC do bagaço de cana-de-açúcar, o primeiro evento endotérmico ocorre a 94° C, este evento foi associado a vaporização de água presente nos sítios intersticiais da fibra (SAIKIA, 2008; RAMIRES, 2010). O segundo evento endotérmico à 320° C está associado ao início da decomposição térmica da fibra de bagaço. O terceiro evento que ocorre à 345° C, o qual é exotérmico está relacionado a decomposição da celulose, levando a formação de produtos voláteis, como dióxido e monóxido de carbono

(MEGIATTO, 2006; RAMIRES, 2010). E, o último evento endotérmico à 359° C, está associado à decomposição da lignina presente na fibra, pois segundo Ramires (2010), embora as reações de decomposição sejam eventos exotérmicos, como paralelamente ocorrem liberação de voláteis (eventos endotérmicos), os picos que são observados podem ser endotérmicos ou exotérmicos, a depender do balanço químico das reações de decomposição e liberação de voláteis. Nesse pico, percebe-se um alargamento e pouca intensidade, o que está relacionado ao fato de que a presença desse composto na fibra está em baixo teor.

4.1.2.3 CALORIMETRIA DIFERENCIAL EXPLORATÓRIA (DSC) DO CORPO DE PROVA TIPO 1

A curva de DSC do corpo de prova Tipo 1, referente ao PET reciclado conformado com compressão térmica, apresenta-se diferente da curva referente ao PET reciclado sem compressão, ao contrário do que é verificado na curva de TGA, conforme percebe-se na Figura 32 abaixo.

Figura 32 – Representação gráfica da curva de DSC do corpo de prova Tipo 1



Fonte : Autora

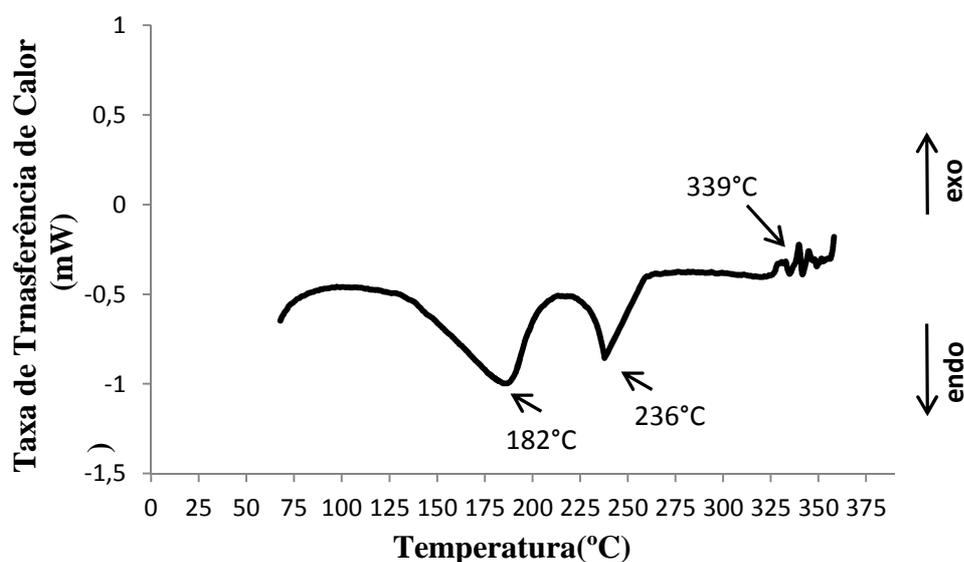
Nessa curva estão presentes três eventos endotérmicos e um evento exotérmico. O primeiro evento endotérmico ocorre a 218°C, muito próximo do segundo evento endotérmico à 230°C. Esses dois picos são referentes à fusão do material. Essa fusão

ocorre em temperatura mais baixa do que a do PET reciclado, devido ao fato de que o material passou por um ciclo térmico de duração prolongada (3h 25min) gerando modificações em seu ponto de fusão, considerando que quando polímeros são submetidos a novos ciclos térmicos os pontos de fusão e transição vítrea podem ser modificados. O terceiro evento é representado por um pico exotérmico à 330°C, semelhante ao processo da fibra, essa ocorrência pode estar associada à liberação de gases no material, pois o processo de conformação sob compressão térmica gerou um material com elevada porosidade, o que será demonstrado com a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mais a frente, dessa forma, essa porosidade acumula gases provenientes da atmosfera que devem ter sido liberados verificando-se a presença de um pico exotérmico na análise de DSC do corpo de prova Tipo 1. O último pico, o qual ocorre à 355°C, está associado ao processo de degradação do material (perda de massa), como visto na análise termogravimétrica (TGA).

4.1.2.4 CALORIMETRIA DIFERENCIAL EXPLORATÓRIA (DSC) DO CORPO DE PROVA TIPO 2

A curva de DSC do corpo de prova Tipo 2 (compósito de PET reciclado com 10% de bagaço), ao contrário do Tipo 1 tem a presença de dois eventos endotérmicos significativos e um terceiro evento exotérmico, conforme visto na Figura 33.

Figura 33 – Representação gráfica da curva de DSC do corpo de prova Tipo 2

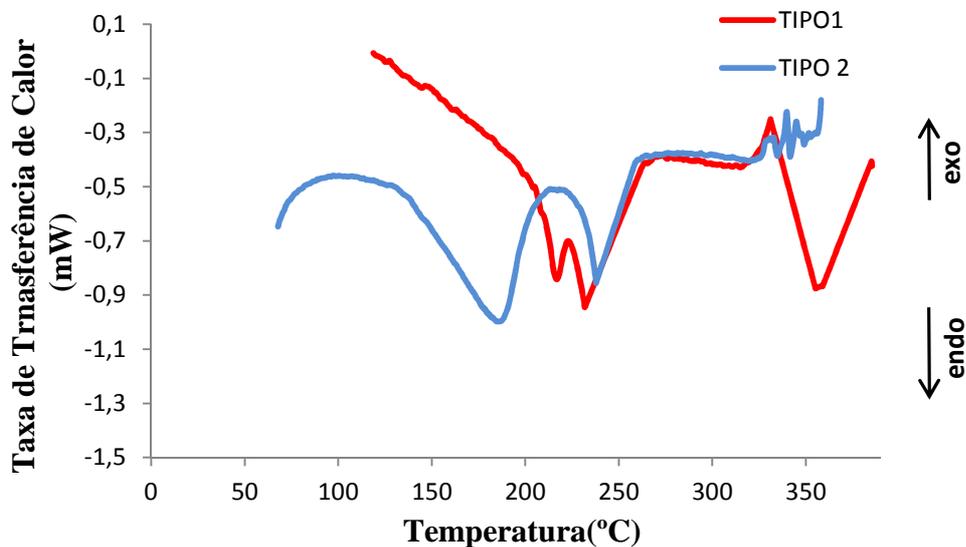


Fonte : Autora

Nessa curva estão presentes dois picos endotérmicos à 182° C e 236° C, com certa proximidade, mas não tão próximos como visto no gráfico do corpo de prova Tipo 1. No entanto, da mesma forma, esses dois eventos estão relacionados ao processo de fusão da amostra, a diferença entre os picos deve-se provavelmente a presença do plastificante (glicerina), além do bagaço que compõem essa amostra. O terceiro evento, representado por um pico exotérmico pouco significativo, provavelmente está relacionado à decomposição da celulose, como foi visto na curva de DSC do bagaço, a qual ocorreu a 345° C, sendo que agora está um pouco abaixo à 339° C, devido a interação proporcionada pelos outros materiais na amostra (plastificante e o PET reciclado).

Na Figura 34 consegue-se analisar as diferenças significativas entre as duas curvas de DSC, do corpo de prova Tipo 1 e Tipo 2, verificando os deslocamentos que ocorrem e a variação de temperatura nos picos.

Figura 34 – Representação gráfica da curva de DSC do corpo de prova Tipo 1 em contraposição ao corpo de prova Tipo 2



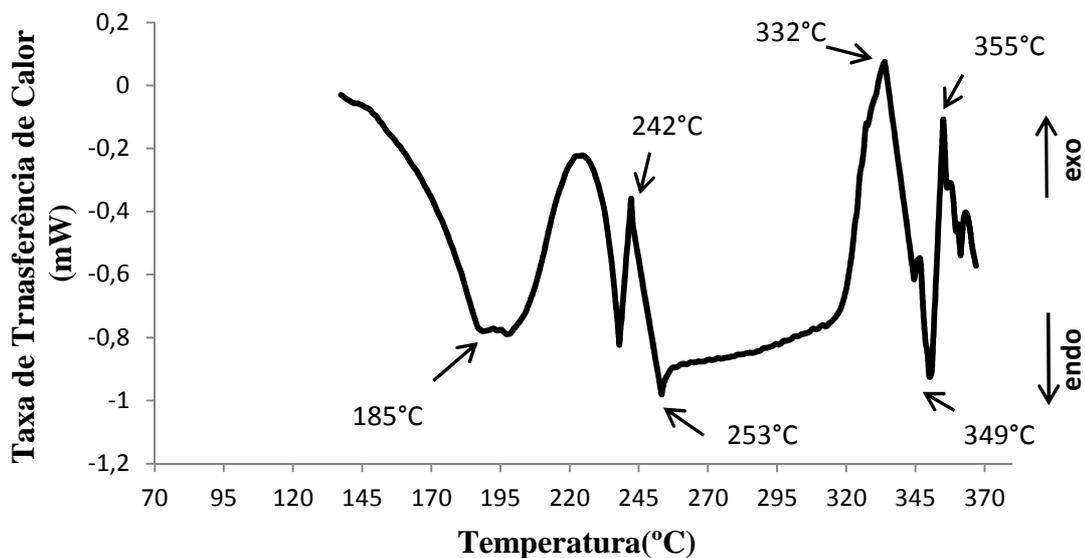
Fonte : Autora

Conforme é demonstrado, o comportamento térmico dos corpos de prova Tipo 1 e 2 são diferentes, o que mostra as modificações ocorrida na amostra com a inserção do bagaço, e adição do plastificante reduz a temperatura de fusão do PET, evitando assim a decomposição da fibra no processo.

4.1.2.5 CALORIMETRIA DIFERENCIAL EXPLORATÓRIA (DSC) DO CORPO DE PROVA TIPO 3

A curva de DSC do corpo de prova Tipo 3 (compósito de PET reciclado com 15% de bagaço), apresentou-se muito diferente das apresentadas pelos corpos de prova Tipo 1 e 2, conforme pode ser visto na Figura 35.

Figura 35 – Representação gráfica da curva de DSC do corpo de prova Tipo 3



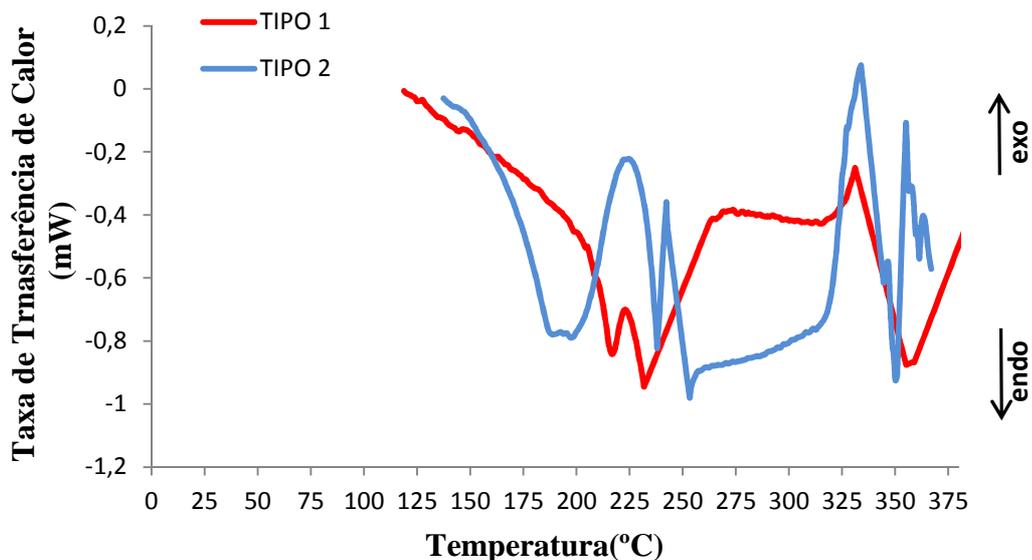
Fonte : Autora

Nessa curva são verificados seis picos significativos, sendo três eventos endotérmicos e três eventos exotérmicos. Os dois primeiros eventos endotérmicos à 185° C e 253° C, respectivamente, assim como na curva do corpo de prova Tipo 2 são referentes ao fenômeno de fusão do material, sendo os valores próximos ao encontrado nos corpos de prova Tipo 1 e 2, apenas estando o segundo pico (253° C) num valor mais alto do que os demais, o que pode ser devido a maior presença e/ou maior interação entre os três materiais, PET reciclado, plastificante e bagaço, proporcionando um aumento na fusão do material. O primeiro evento exotérmico que ocorre a 242° C pode estar relacionado à saída de voláteis, os quais tanto podem ser gases presentes na porosidade da amostra, como a própria volatilização da glicerina. O próximo evento exotérmico, que ocorre à 332° C, deve estar relacionado à decomposição de parte da celulose presente na amostra devido ao bagaço, assim como o último evento exotérmico à 355° C. Já o terceiro evento endotérmico à 349° C, pode estar relacionado à degradação do PET, visto

que assim como no corpo de prova Tipo 1 esse processo ocorreu à 355° C. A diminuição no valor deve estar associado a presença do plastificante e do bagaço, já que como falado anteriormente, o plastificante foi adicionado com o objetivo de melhorar a interação entre os materiais e reduzir o ponto de fusão do PET, evitando assim a decomposição da fibra antes da finalização do processo.

O que pode se perceber na curva do corpo de prova Tipo 3 é que a adição do plastificante e do bagaço de cana-de-açúcar, até certo ponto, deslocou a curva para direita, ou seja, aumentou os valores dos pontos de fusão do material, além de ser possível a identificação de outros eventos significativos relacionados ao bagaço e ao plastificante, conforme pode ser visto na Figura 36 abaixo referente a comparação do corpo de prova Tipo 3 com o Tipo 1.

Figura 36 – Representação gráfica da curva de DSC dos corpos de prova Tipo 1 e 3

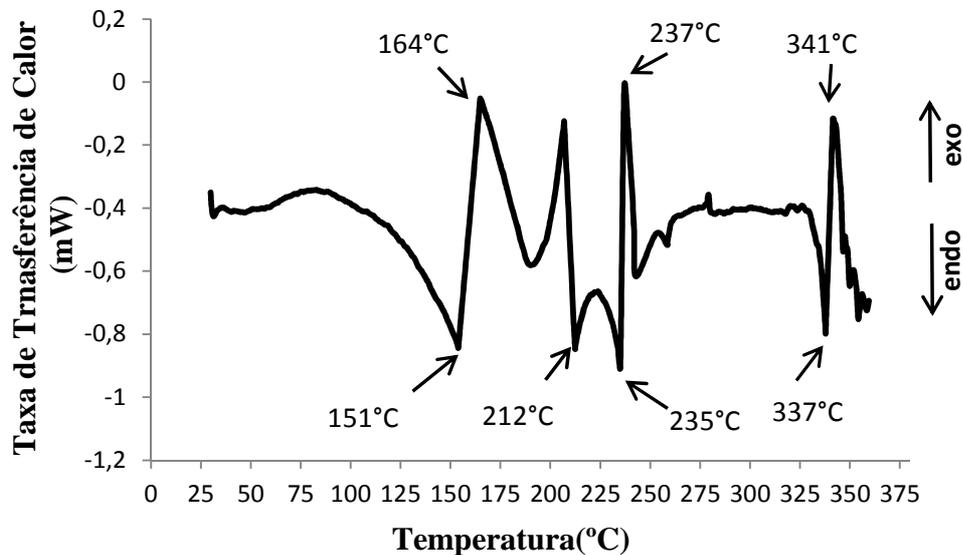


Fonte : Autora

4.1.2.6 CALORIMETRIA DIFERENCIAL EXPLORATÓRIA (DSC) DO CORPO DE PROVA TIPO 4

A curva de DSC do corpo de prova Tipo 4 (compósito de PET reciclado com 20 % de bagaço) apresentou-se muito diferente das demais, conforme percebido na Figura 37 a seguir.

Figura 37 – Representação gráfica da curva de DSC do corpo de prova Tipo 4

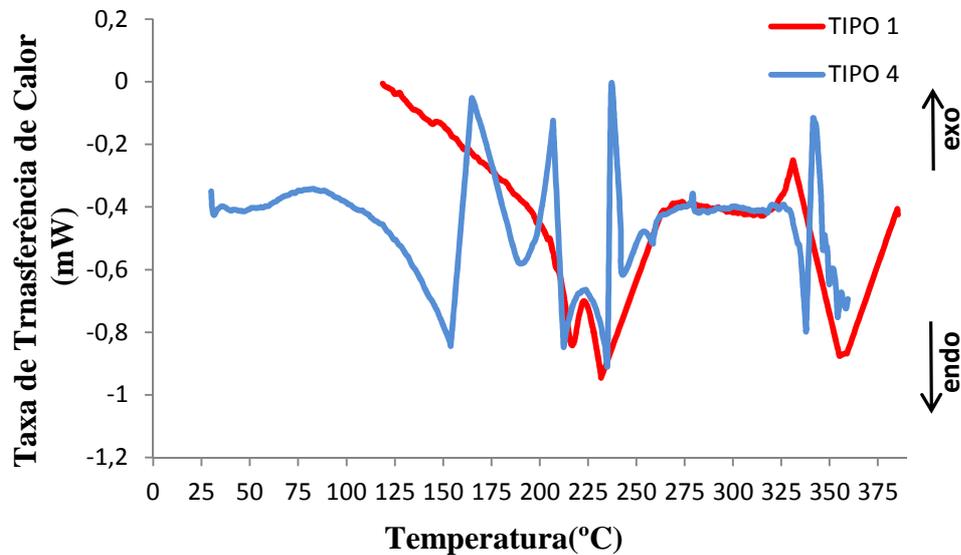


Fonte : Autora

Nesse gráfico são vistos sete eventos significativos ocorrendo, mais do que os verificados nos corpos de prova Tipo 1, 2 e 3. Dos sete eventos, quatro são endotérmicos e três estão relacionados a processos exotérmicos. Os três primeiros picos endotérmicos à 151° C, 212° C e 235° C, respectivamente, devem estar relacionados a fusão do material, o que é mais significativo no segundo e terceiro pico, pois está mais intenso e as temperaturas estão mais próximas. O primeiro evento exotérmico à 164° C, provavelmente, está relacionado a saída de voláteis, já que o material além da porosidade presente como nos demais corpos de prova, também apresenta uma maior quantidade de bagaço, o que leva a uma maior quantidade de feixes de fibrilas presentes proporcionando um maior acúmulo de gases. O segundo processo exotérmico verificado à 237° C, deve estar relacionado à volatilização da glicerina, assim como foi percebido na curva do corpo de prova Tipo 3 à 242° C. O último evento endotérmico é visto à 337° C e pode estar relacionado ao processo de degradação do PET, já que está muito próximo do verificado nos corpos de prova Tipo 1, 2 e 3. E, o último processo exotérmico, que ocorre à 341° C, deve estar associado, assim como visto nos corpos de prova Tipo 2, 3 e do bagaço, a decomposição da celulose presente no bagaço.

No entanto, a curva de DSC do corpo de prova Tipo 4, foi a que mais se aproximou da curva referente ao corpo de prova Tipo 1, como pode ser analisado pela sobreposição de vários pontos na Figura 38 abaixo.

Figura 38 – Representação gráfica da curva de DSC dos corpos de prova Tipo 1 e 4



Fonte : Autora

Embora possam ser verificados mais eventos significativos na curva referente ao corpo de prova Tipo 4, comparando com a do Tipo 1, são vistas sobreposições das curvas em vários pontos, ao contrário do verificado nas curvas dos corpos de prova Tipo 2 e 3. Entretanto, assim como nas demais é percebido os eventos referentes aos processos relacionados à volatilização da glicerina e a decomposição do bagaço, os quais não estão presentes no corpo de prova Tipo 1, já que o mesmo não possui esses elementos. Por essa razão, estão presentes uma quantidade maior de eventos, tanto endotérmicos como exotérmicos.

4.2 RESULTADOS REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

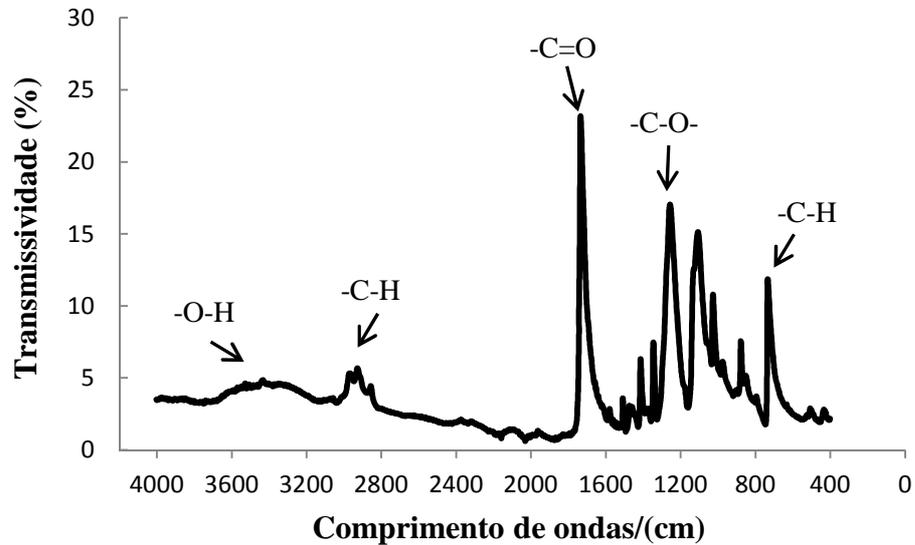
4.2.1 RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESPECTROMETRIA NO INFRAVERMELHO (FTIR)

4.2.1.1 ESPECTROMETRIA NO INFRAVERMELHO (FTIR) DO PET RECICLADO

A análise de espectrometria no infravermelho (FTIR) para todas as amostras foi realizada com 5 mg de cada amostra, estabelecendo como faixa do espectro a região do comprimento de onda de 400 a 4000 cm^{-1} , em atmosfera de nitrogênio, com apenas uma varredura.

No caso do PET reciclado foram identificados seis comprimentos de onda significativos em seu espectro, de acordo com a Figura 39 a seguir.

Figura 39 – Representação gráfica do espectro do PET reciclado



Fonte : Autora

A Tabela 6 a seguir mostra as possíveis atribuições dos comprimentos de onda identificados no gráfico acima.

Tabela 6 – Possíveis atribuições para os picos identificados no espectro do PET reciclado

Comprimento de Onda/ (cm)	Possíveis atribuições
730	atribuído ao estiramento da ligação -C-H de anéis aromáticos
1099	atribuído ao estiramento da ligação -C-O
1250	atribuído ao estiramento da ligação -C-O do grupamento ácido carboxílico
1732	atribuído ao estiramento da ligação -C=O do grupamento ácido carboxílico
2904	atribuído ao estiramento da ligação -C-H
3356	atribuído ao estiramento da ligação -O-H

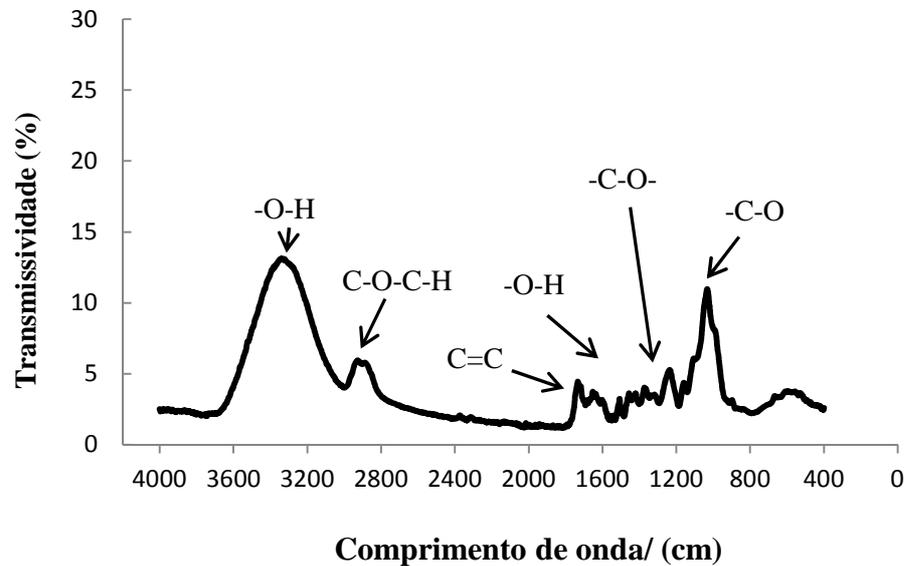
Fonte : Silverstein *et al* (1979)

Conforme se verifica na Tabela 6 acima, a primeira banda a 730 cm^{-1} apresentou-se como bem significativo, de transmissividade em torno de 15%. Essa banda pode estar atribuído ao estiramento da ligação -C-H de anéis aromáticos presentes na molécula do PET reciclado (SILVERSTEIN *et al*, 1979), de acordo com a fórmula apresentada na FIGURA 14. O segundo comprimento de onda à 1099 cm^{-1} está associado ao estiramento da ligação -C-O presente em grupos ésteres (SILVERSTEIN *et al*, 1979), sendo que nesse caso estaria relacionado ao estiramento dessa ligação advindos de um éster conjugado, característico do PET (MANCINI, ZANIN, 2002). O próximo comprimento de onda à 1250 cm^{-1} , com transmissividade em torno de 20%, está relacionado ao estiramento da ligação -C-O , semelhante a banda em 1099 cm^{-1} , mas dos grupamentos de ácido carboxílicos presentes na molécula de acordo com a FIGURA 14 abordada anteriormente. Em 1732 cm^{-1} , possivelmente ocorre o estiramento da ligação -C=O dos grupos de ácido carboxílico presentes na molécula (SILVERSTEIN *et al*, 1979). A banda referente ao comprimento de onda à 2904 cm^{-1} , associa-se ao estiramento da ligação -C-H , em menor intensidade comparada as demais bandas (SILVERSTEIN *et al*, 1979). Já à 3356 cm^{-1} , ocorre o estiramento da ligação -O-H . Esse último comprimento de onda pode estar associado à absorção dos grupos hidroxilas terminais nas cadeias de PET, assim como a presença de umidade, apesar da secagem em estufa durante 4 horas à 180°C da amostra de PET reciclado antes da realização do ensaio (MANCINI, ZANIN, 2002).

4.2.1.2 ESPECTROMETRIA NO INFRAVERMELHO (FTIR) DO BAGAÇO

O espectro no infravermelho do bagaço de cana-de açúcar está apresentado na Figura 40.

Figura 40 – Representação gráfica do espectro do Bagaço de cana-de-açúcar



Fonte : Autora

Nesse espectro estão presentes seis comprimentos de onda significativos para esse material, conforme a Tabela 7 à frente.

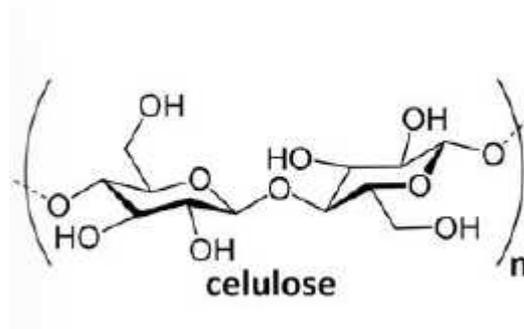
Tabela 7 – Possíveis atribuições aos comprimentos de onda presentes no espectro do Bagaço de cana-de-açúcar

Comprimento de Onda / (cm)	Possíveis atribuições
1024	atribuído ao estiramento da ligação – C-O
1222	atribuído ao estiramento da ligação – C-O do grupamento álcool e éter
1334	atribuído a vibração angular do plano da ligação –O-H
1662	atribuído ao estiramento da ligação – C=C- do anel aromático
2862	atribuído ao estiramento da ligação – C-O-C-H de aldeído presente na celulose
3269	atribuído ao estiramento da ligação – O-H do grupo fenol

Fonte : Silverstein *et al* (1979)

Diferente do espectro do PET reciclado, a primeira banda de comprimento de onda é verificada em valor mais alto de comprimento de onda, à 1024 cm^{-1} . Essa banda está associada ao estiramento da ligação -C-O presente na molécula de celulose presente no bagaço, conforme Figura 41 a seguir da composição química da celulose.

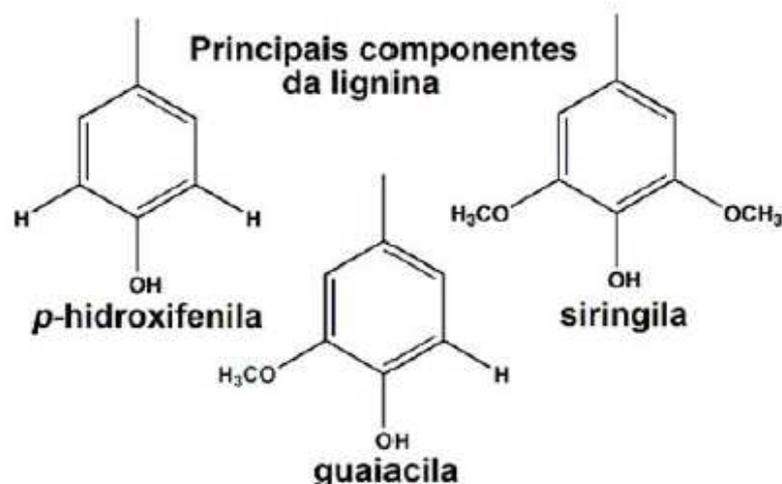
Figura 41 – Estrutura química da celulose



Fonte : Da Silva (2011).

A segunda banda de comprimento de onda à 1222 cm^{-1} , é atribuído ao estiramento da ligação -C-O dos grupos álcool e éter, os quais estão presentes tanto na composição da celulose mostrada na Figura 42 acima, como na composição de dois dos compostos presentes na lignina, a siringila e guaiaçila, conforme se vê na Figura 42 a seguir (SANTOS, 2012).

Figura 42 – Estrutura química dos compostos presentes na lignina



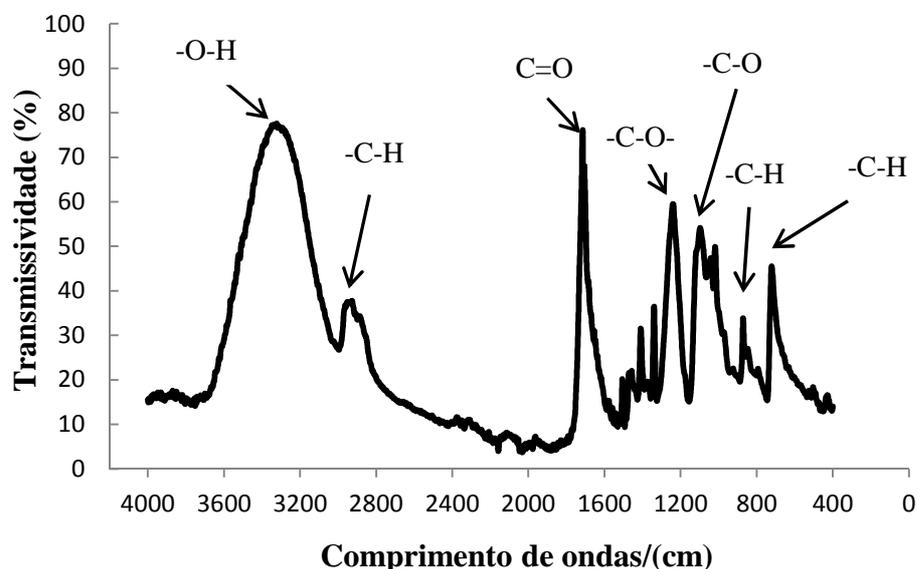
Fonte : Da Silva (2011).

O comprimento de onda seguinte à 1334 cm^{-1} , está associado a vibração angular do plano da ligação -O-H . Essa ligação está presente tanto na celulose, como nos três principais componentes da lignina (SANTOS, 2012). O quarto comprimento de onda está relacionado ao estiramento da ligação -C=C dos anéis aromáticos presentes nos três principais componentes da lignina. Em 2862 cm^{-1} , é atribuído ao estiramento da ligação -C-O-C-H de aldeído presente na celulose (SANTOS, 2012). E, por último, em 3269 cm^{-1} , atribui-se ao estiramento da ligação -O-H dos grupos fenóis presentes nos três principais componentes da lignina (SANTOS, 2012).

4.2.1.3 ESPECTROMETRIA NO INFRAVERMELHO (FTIR) DO CORPO DE PROVA TIPO 1

No espectro do corpo de prova Tipo 1, embora fossem esperados os mesmos comprimentos de onda encontrados no espectro do PET reciclado, houveram algumas ligeiras diferenças, como pode ser notado na Figura 43 a seguir.

Figura 43 – Representação do espectro do corpo de prova Tipo 1



Fonte : Autora

As cinco primeiras bandas assemelham-se muito ao espectro visto no PET reciclado, enquanto os dois últimos apresentam-se diferentes. As atribuições de cada banda podem ser verificados na Tabela 8.

Tabela 8 – Possíveis atribuições nas bandas presentes no espectro do corpo de prova

Tipo 1

Comprimento de Onda / (cm)	Possíveis atribuições
715	atribuído ao estiramento da ligação -C-H de anéis aromáticos
869	atribuído ao estiramento da ligação -C-H de anéis aromáticos
1087	atribuído ao estiramento da ligação -C-O
1236	atribuído ao estiramento da ligação -C-O do grupamento ácido carboxílico
1710	atribuído ao estiramento da ligação -C=O do grupamento ácido carboxílico
2918	atribuído ao estiramento da ligação -C-H
3271	atribuído ao estiramento da ligação -O-H

Fonte : Silverstein *et al* (1979)

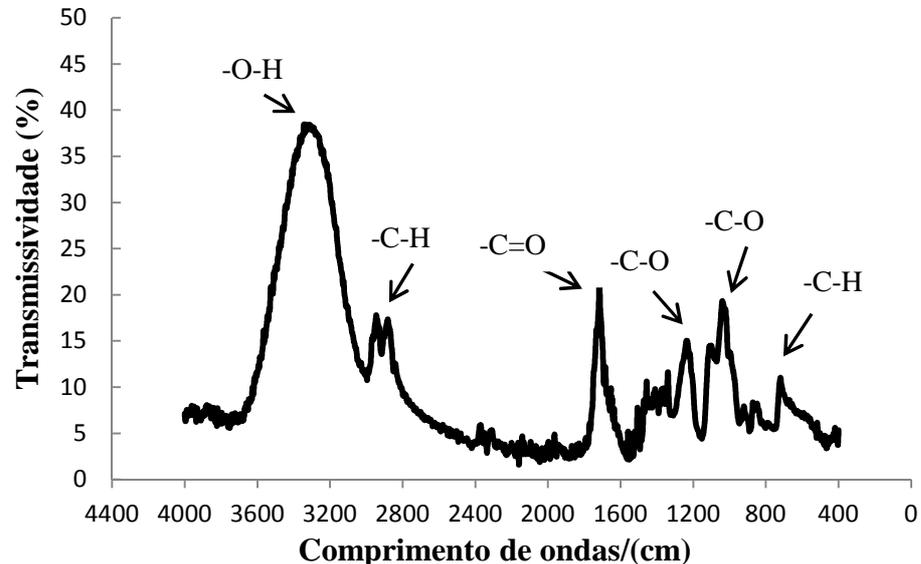
A primeira banda encontrada é associada ao estiramento da ligação -C-H do anel aromático presente na molécula. Esse ponto assemelha-se ao encontrado no PET reciclado a 730 cm^{-1} . O próximo comprimento de onda a 869 cm^{-1} , relaciona-se ao estiramento da ligação -C-H presente nos mesmos anéis aromáticos. A terceira banda, estando em 1087 cm^{-1} , é atribuído ao estiramento da ligação -C-O, presente nos grupos ésteres (SILVERSTEIN *et al*, 1979), estando relacionado esse estiramento da ligação proveniente de um éster conjugado, característico do PET (MANCINI, ZANIN, 2002), conforme ocorrido no PET reciclado. O quarto comprimento de onda a 1236 cm^{-1} , associado ao estiramento da ligação -C-O dos grupos de ácido carboxílico presentes no composto. Em 1710 cm^{-1} , ocorre o estiramento da ligação -C=O presente nos ácidos carboxílicos da molécula. Já em 2918 cm^{-1} , percebe-se que da mesma forma que no PET reciclado a 2904 cm^{-1} , está relacionado ao estiramento da ligação -C-H presente na molécula, contudo nessa amostra o pico apresenta-se de forma mais intensa, com 40% de transmissividade, o que provavelmente pode estar associado ao processo de compressão térmica, o qual pode ter levado a um rearranjo molecular do composto, apresentando assim esse comportamento diferenciado. E, por último, em 3271 cm^{-1} , ocorre o estiramento da ligação -O-H. Esse último comprimento de onda, semelhante ao presente no PET reciclado à 3356 cm^{-1} , deve estar associado à absorção dos grupos hidroxilas

terminais nas cadeias de PET, assim como a presença de umidade, mesmo o material tendo passado pela compressão térmica (MANCINI, ZANIN, 2002). No entanto, nesse espectro verifica-se uma diferença em relação à média de transmissividade dos gráficos, ficando o valor em torno de 80%, enquanto no PET reciclado é por volta de 5%. Isso pode estar associado à presença de voláteis, inclusive água, que podem estar presentes nas porosidades da amostra, assim como a alguma contaminação que pode ter ocorrido durante o processo.

4.2.1.4 ESPECTROMETRIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO (FTIR) DO CORPO DE PROVA TIPO 2

O espectro do corpo de prova Tipo 2 (PET reciclado com 10% de bagaço), encontra-se na Figura 44 a seguir.

Figura 44 – Representação gráfica do espectro do corpo de prova Tipo 2



Fonte : Autora

A Tabela 9 estão representadas as atribuições dos grupamentos químicos que formam o compósito.

Tabela 9 – Possíveis atribuições aos comprimentos de ondas presentes no espectro do corpo de prova Tipo 2

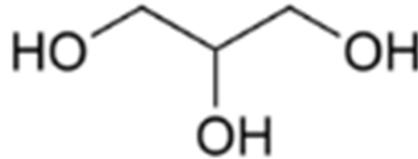
Comprimento de Onda / (cm)	Possíveis atribuições
711	atribuído ao estiramento da ligação -C-H de anéis aromáticos
1020	atribuído ao estiramento da ligação -C-O
1226	atribuído ao estiramento da ligação -C-O do grupamento ácido carboxílico
1714	atribuído ao estiramento da ligação -C=O do grupamento ácido carboxílico
2875	atribuído ao estiramento da ligação -C-O-C-H de aldeído presente na celulose
3263	atribuído ao estiramento da ligação -O-H

Fonte : Silverstein *et al* (1979)

Nesse espectro estão presentes seis bandas de comprimento de onda significativos, sendo que os mesmas estão associadas aos grupos presentes nos três compostos que compõe o material, o bagaço de cana-de-açúcar, o PET reciclado e o plastificante, a glicerina. A primeira banda, em 711 cm^{-1} , está associada ao estiramento da ligação -C-H de anéis aromáticos. Esse comprimento está presente no corpo de prova Tipo 1, à 715 cm^{-1} , e no PET reciclado em 730 cm^{-1} . Em 1020 cm^{-1} , ocorre o estiramento da ligação -C-O, provavelmente associada a ligação presente na celulose, conforme identificado no espectro do bagaço em 1024 cm^{-1} . Já, em 1226 cm^{-1} , está ocorrendo o estiramento da ligação -C-O dos grupos ácidos carboxílicos presentes no material. Essa banda é semelhante ao presente em 1236 cm^{-1} no corpo de prova Tipo 1, logo estando associado a molécula do PET presente na amostra. O quarto comprimento de onda ocorre a 1714 cm^{-1} , essa banda associa-se ao estiramento da ligação -C=O do grupo ácido carboxílico, da mesma forma que no corpo de prova Tipo 1 à 1710 cm^{-1} , estando portanto da mesma forma associado a molécula do PET. Em 2875 cm^{-1} , ocorre o estiramento da ligação -C-O-C-H de aldeído presente na celulose do bagaço da amostra. E, em 3263 cm^{-1} , ocorre o estiramento da ligação -O-H da amostra, que devido a intensidade intermediária a verificada nos espectros do bagaço e do corpo de prova Tipo 1, deve estar associada tanto ao estiramento da ligação -O-H dos grupos fenóis presentes nos três principais componentes da lignina do bagaço, como estar associado à absorção dos grupos hidroxilas terminais nas cadeias de PET ou a presença de umidade no mesmo, conforme

verificado nos espectros do corpo de prova Tipo 1 e do PET reciclado. Mas, também pode estar associada ao estiramento da ligação –O-H presente no plastificante (glicerina), o qual apresenta a composição molecular exposta na Figura 45 abaixo.

Figura 45 – Composição molecular da glicerina

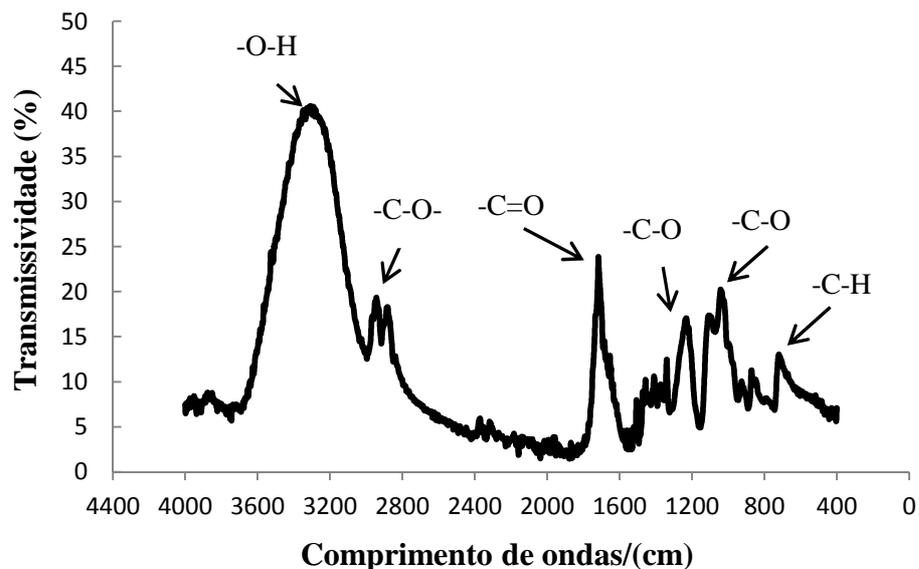


Fonte : Schmmeler *et al* (2010).

4.2.1.5 ESPECTROMETRIA NO INFRAVERMELHO (FTIR) DO CORPO DE PROVA TIPO 3

O espectro do corpo de prova Tipo 3 (compósito de PET reciclado com 15% de bagaço) assemelhou-se muito ao visto no corpo de prova Tipo 2, conforme Figura 46 a seguir.

Figura 46 – Representação gráfica do espectro do corpo de prova Tipo 3



Fonte : Autora

A Tabela 10 mostra as possíveis atribuições presentes nos comprimentos de onda mais significativos desse espectro.

Tabela 10 – Possíveis atribuições aos comprimentos de onda presentes no espectro do corpo de prova Tipo 3

Comprimento de Onda / (cm)	Possíveis atribuições
702	atribuído ao estiramento da ligação -C-H de anéis aromáticos
1031	atribuído ao estiramento da ligação -C-O
1224	atribuído ao estiramento da ligação -C-O do grupamento ácido carboxílico
1714	atribuído ao estiramento da ligação -C=O do grupamento ácido carboxílico
2879	atribuído ao estiramento da ligação -C-O-C-H de aldeído presente na celulose
3257	atribuído ao estiramento da ligação -O-H

Fonte : Silverstein *et al* (1979)

Semelhante ao visto no espectro do corpo de prova Tipo 2, nesse espectro percebe-se a presença dos comprimentos de onda associados aos três compostos presentes na amostra, o PET reciclado, o bagaço e a glicerina.

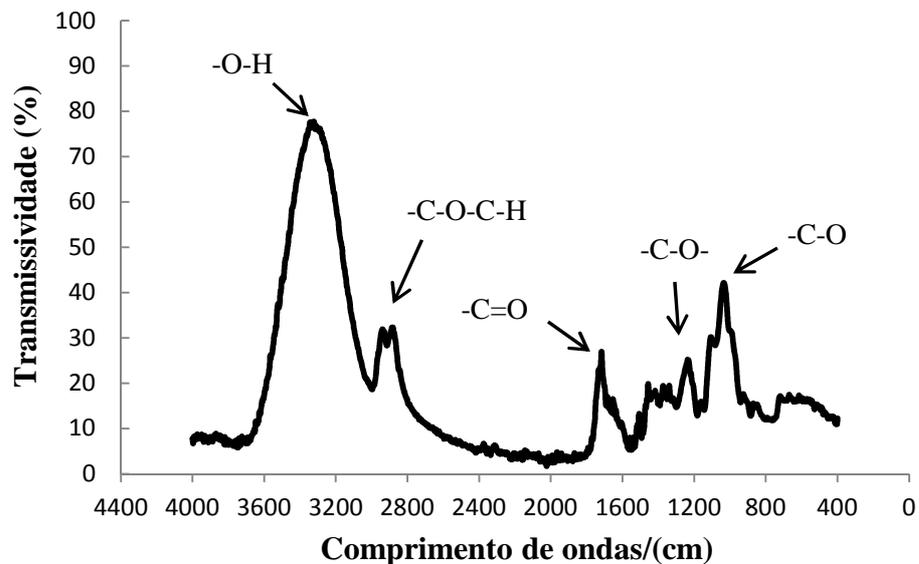
O primeiro comprimento de onda a 702 cm^{-1} , semelhante ao visto no corpo de prova Tipo 2 a 711 cm^{-1} , está associado ao estiramento da ligação -C-H de anéis aromáticos presentes no PET. A segunda banda a 1031 cm^{-1} , está relacionada ao estiramento da ligação -C-O, provavelmente associada ao estiramento da ligação presente na celulose, conforme identificado no espectro do bagaço em 1024 cm^{-1} e no espectro do corpo de prova Tipo 2 à 1020 cm^{-1} . Em 1224 cm^{-1} , ocorre o estiramento da ligação -C-O dos grupos carboxílicos presentes no material. Essa banda é semelhante a presente em 1236 cm^{-1} no corpo de prova Tipo 1 e em 1226 cm^{-1} no corpo de prova Tipo 2, logo estando associado a molécula do PET presente na amostra. O quarto comprimento de onda presente a 1714 cm^{-1} , é atribuído ao estiramento da ligação -C=O dos ácidos carboxílicos presentes na amostra e, também se associa a molécula de PET, pois ele é visto a 1710 cm^{-1} no corpo de prova Tipo 1 e em 1714 cm^{-1} no corpo de prova Tipo 2. Em 2879 cm^{-1} , é atribuído ao estiramento da ligação -C-O-C-H de aldeído presente na celulose está associado ao bagaço presente na amostra, assim como verificado no corpo de prova Tipo 2 (2875 cm^{-1}) e no bagaço (2862 cm^{-1}). E, por último, em 3257 cm^{-1} , está associado ao estiramento da ligação -O-H que, assim como analisado para o corpo de

prova Tipo 2, pode estar associado aos três compostos presentes na amostra, bagaço, PET reciclado e glicerina, como também a umidade presente.

4.2.1.6 ESPECTROMETRIA NO INFRAVERMELHO (FTIR) DO CORPO DE PROVA TIPO 4

O espectro do corpo de prova Tipo 4, representado na Figura 47 abaixo, apresentou apenas cinco comprimentos de onda significativos, sendo que não está presente o comprimento de onda mais baixo, conforme visto nos espectros dos corpos de prova Tipo 1, 2 e 3.

Figura 47 – Representação gráfica do espectro do corpo de prova Tipo 4



Fonte : Autora

O não aparecimento desta banda próximo ao comprimento de onda de 700 cm^{-1} , pode estar associada ao fato de que nesse composto a quantidade de PET reciclado presente foi menor do que nos demais. As outras bandas são identificadas na Tabela 11 a frente.

Tabela 11 – Possíveis atribuições aos comprimentos de onda do espectro do corpo de prova Tipo 4

Comprimento de Onda / (cm)	Possíveis atribuições
1022	atribuído ao estiramento da ligação -C-O
1217	atribuído ao estiramento da ligação -C-O do grupamento ácido carboxílico
1714	atribuído ao estiramento da ligação -C=O do grupamento ácido carboxílico
2872	atribuído ao estiramento da ligação -C-O-C-H de aldeído presente na celulose
3278	atribuído ao estiramento da ligação -O-H

Fonte : Silverstein *et al* (1979)

No espectro do corpo de prova Tipo 4, o primeiro comprimento de onda significativo aparece em 1022 cm^{-1} , essa banda está associada ao estiramento da ligação -C-O, presente na composição da celulose do bagaço, semelhante ao verificado no corpo de prova Tipo 2 (1020 cm^{-1}) e Tipo 3 (1031 cm^{-1}). A segunda banda a 1217 cm^{-1} , é atribuída ao estiramento da ligação -C-O dos grupamentos de ácidos carboxílicos presente na amostra, estando associada a molécula de PET, pois bandas de comprimentos de onda próximos são vistas nos corpos de prova Tipo 1, 2 e 3, assim como no PET reciclado. Em 1714 cm^{-1} , ocorre o estiramento da ligação -C=O presente nos ácidos carboxílicos da amostra. Da mesma forma, estando associado à molécula de PET, já que comprimentos de onda semelhantes são verificados nos espectros do corpo de prova Tipo 1, 2 e 3, assim como no PET reciclado. O próximo comprimento de onda, 2872 cm^{-1} , já se associa ao estiramento da ligação -C-O-C-H de aldeído presente na celulose do bagaço, assim como foi visto nos corpos de prova Tipo 2, 3 e bagaço. E, por último, em 3278 cm^{-1} , é atribuído ao estiramento da ligação -O-H (grupos hidroxilas), podendo ser dos três compostos presentes na amostra (bagaço, PET reciclado e glicerina) ou de umidade presente.

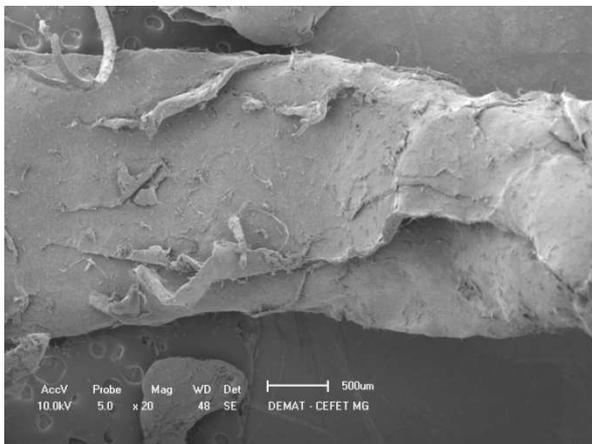
4.2.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

4.2.2.1 ANÁLISES DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DAS MATÉRIAS-PRIMAS

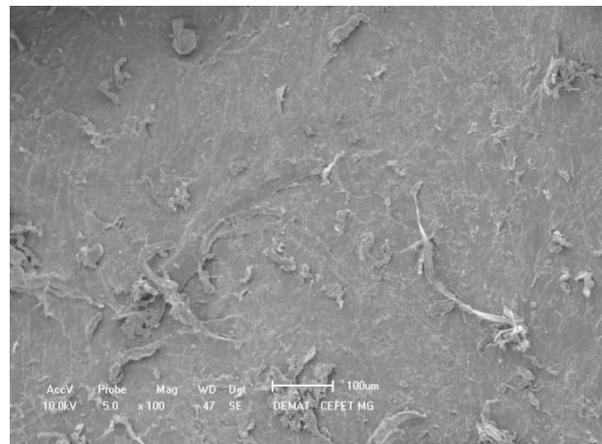
4.2.2.1.1 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DO PET

Além da análise de espectrometria no infravermelho (FTIR), foi realizada a caracterização dos corpos de prova por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Essa análise em relação ao PET foi feita em dois aumentos, 20 e 100 vezes, conforme Figura 48 a, b, c e d abaixo.

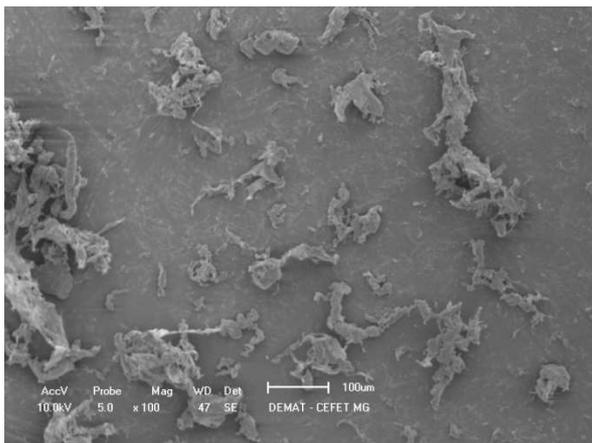
Figura 48 – Micrografias do PET



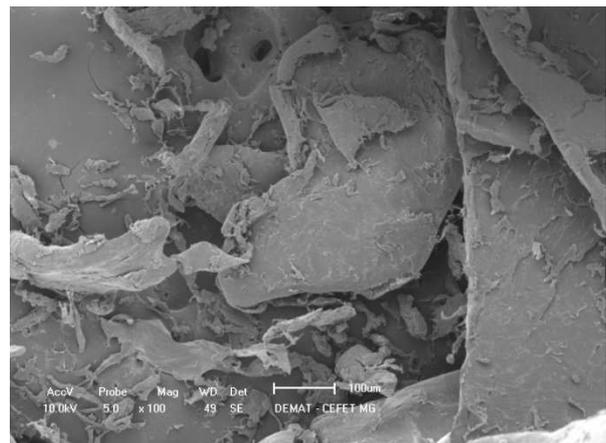
(a) Micrografia do PET com aumento de 20x



(b) Micrografia do PET com aumento de 100x



(c) Micrografia do PET com aumento de 100x com presença de partículas menores



(d) Micrografia com aumento de 100x identificando variações nos tamanhos de partículas

Fonte : Microscópio Eletrônico de Varredura do DEMAT

As micrografias do PET identificaram a presença de partículas com granulometrias diferentes. Esse resultado deve-se ao processo de trituração do material

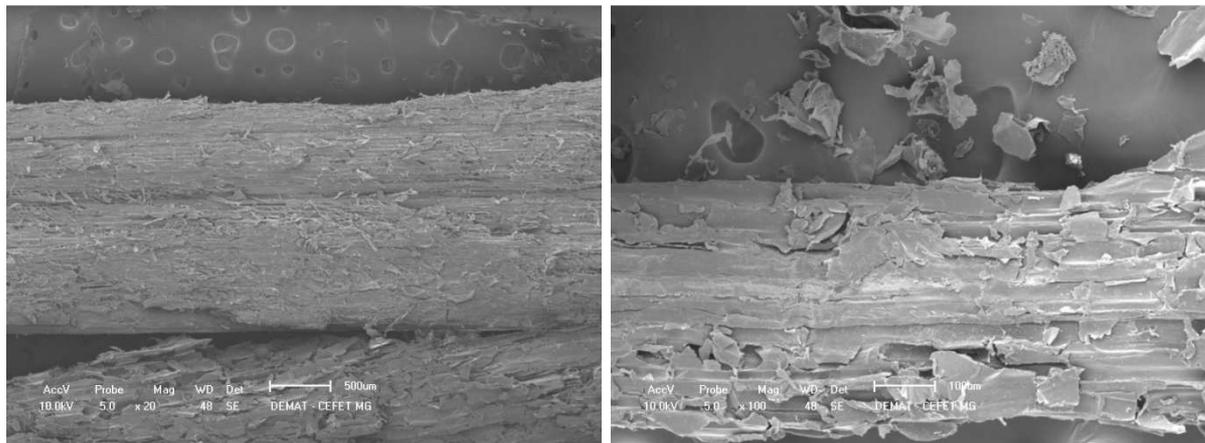
foi realizado, como abordado anteriormente na Figura 19, o que impossibilita a homogeneidade da granulometria no material. Dessa forma, foram identificadas partículas muito pequenas, vistas a olho nú como um pó mais aderente nas mãos e, partículas maiores em torno de 2 mm como se percebe na Figura 48 c e d.

Não foram identificados porosidades nesse material, ao contrário do que será abordado em seguida no bagaço de cana-de-açúcar. O que foi passível de se identificar são rugosidades (Figura 48 b), deformações (Figura 48 a e d) e lascas (Figura 48 d).

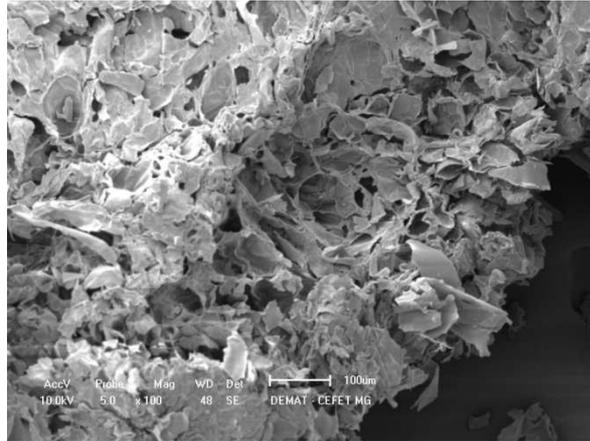
4.2.2.1.2 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

No caso do bagaço de cana-de-açúcar foram realizados três aumentos, 20x, 100x e 200x. Nesses aumentos são verificadas a presença de porosidades, camadas e três tipos de estruturas presentes, conforme Figura 49 a, b e c a seguir.

Figura 49 – Micrografias da fibra de bagaço de cana-de-açúcar



(a) Micrografia da fibra de bagaço de cana-de-açúcar com aumento de 20x identificando um tipo de estrutura (b) Micrografia do bagaço com aumento de 100x identificando outra estrutura

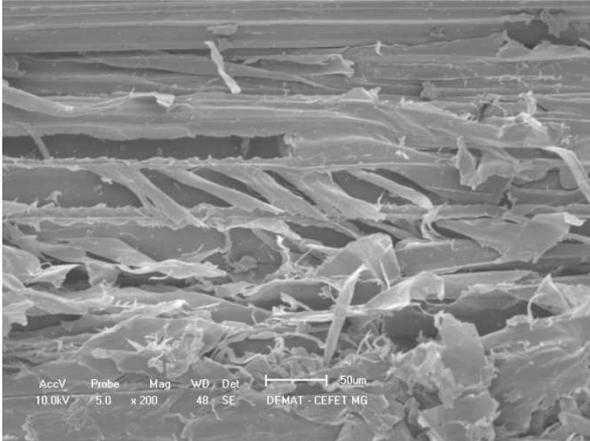


(c) Micrografia do bagaço com aumento de 100x
identificando uma terceira estrutura

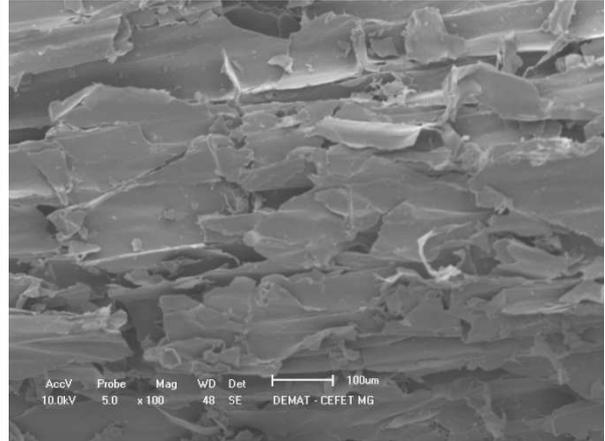
Fonte : Microscópico eletrônico de varredura do DEMAT

Assim como no PET, a granulometria identificada apresentou-se heterogênea, visto que o processo de trituração do bagaço, da mesma forma que no PET, não proporcionou homogeneidade aos grãos. Contudo, nesse material são identificadas uma grande quantidade de poros, uniões de feixes de fibrilas, os quais são constituídos por um grande número de células justapostas e intimamente ligadas por substâncias de origem pectínica (SALAZAR *et al*, 2006), além da formação da estrutura em camadas, nas quais uma fina casca envolve uma segunda camada mais espessa, onde o conjunto de fibrilas formam-se na forma de espirais ao longo do eixo da fibra (DOS SANTOS, 2006) (Figura 50 a, b, c, d e e).

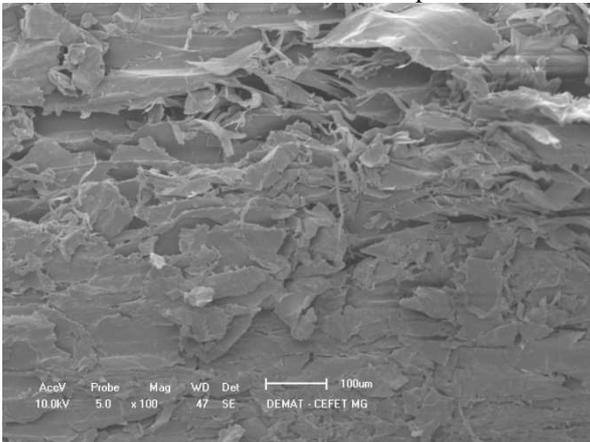
Figura 50 – Micrografias do bagaço



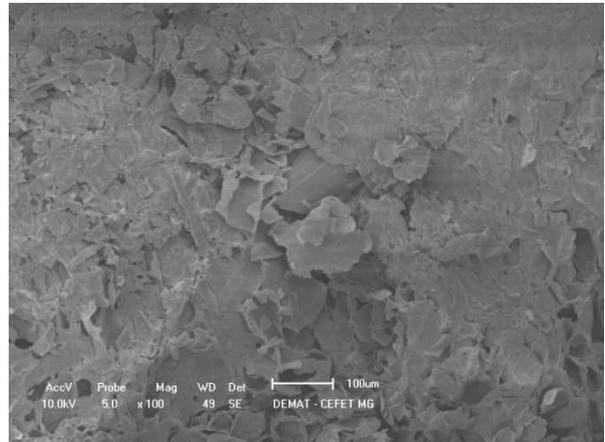
(a) Micrografia do bagaço com aumento de 200x identificando as diferentes camadas presentes



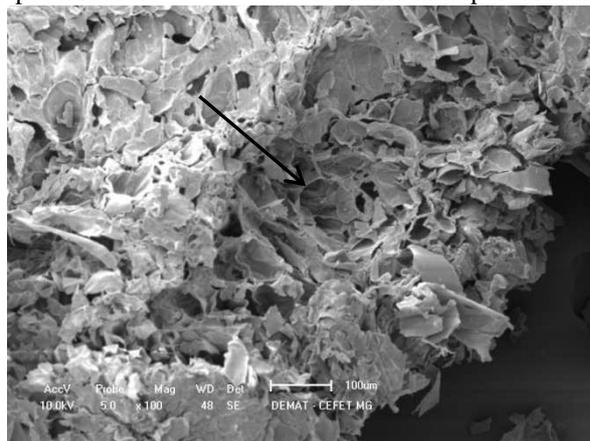
(b) Micrografia do bagaço com aumento de 100x mostrando as finas camadas externas



(c) Micrografia do bagaço com aumento de 100x identificando a presença de porosidades



(d) Micrografia do bagaço com aumento 100x identificando porosidades e camadas



(e) Micrografia com aumento de 100x identificando os feixes de fibrilas identificados pela seta

Fonte : Microscópio eletrônico de varredura do DEMAT

Os canais presentes nessa estrutura fibrosa são extremamente importantes na utilização das fibras como agente de reforço em compósitos, já que facilitam a difusão da

resina polimérica para o interior da fibra, tendo como consequência a melhor adesão/interação fibra-matriz (TRINDADE *et al*, 2005; MEGIATTO, 2006).

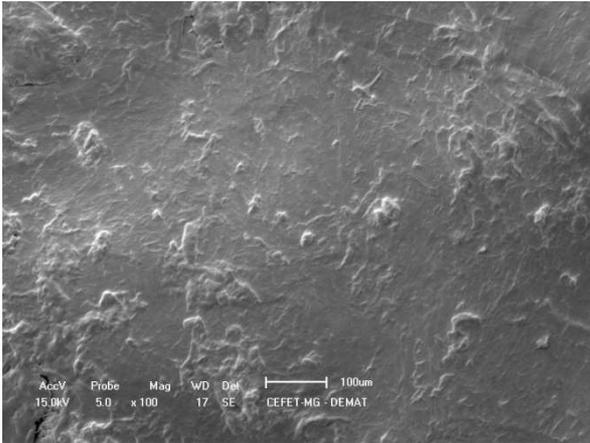
Também deve ser considerado que a presença de porosidade, como demonstrado, pode proporcionar a esse material uma baixa condutividade térmica, devido a presença de ar que se instala no local. Essa alta porosidade irá conferir ao compósito formado uma redução em sua condutividade térmica e, como segundo Incropera *et al* (2008), materiais isolantes possuem uma porosidade significativa, o que proporciona a propriedade de baixa condutividade dando-lhes a capacidade isolante.

Com a análise microscópica foi avaliado que o diâmetro médio das fibras de bagaço de cana-de-açúcar é de aproximadamente de 300 μm .

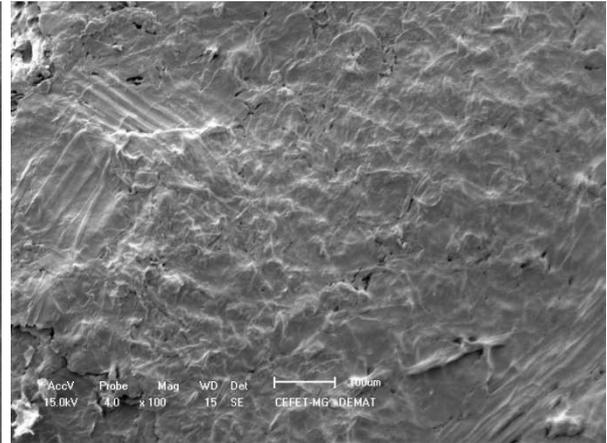
4.2.2.2 ANÁLISES DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DOS CORPOS DE PROVA

As análises microscópicas dos corpos de prova foram apresentadas em aumentos diferenciados, desde 50x à 450x.

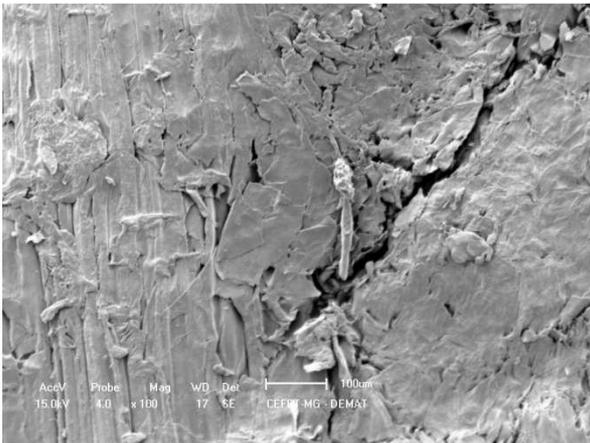
A Figura 51 a, b, c e d a seguir mostra os quatro tipos de corpos de prova caracterizados por MEV no aumento de 100x.

Figura 51 – Micrografias dos corpos de prova

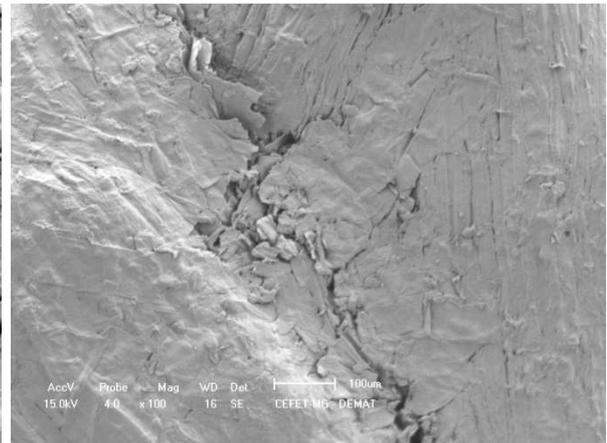
(a) Micrografia do corpo de prova Tipo 1 no aumento de 100x



(b) Micrografia do corpo de prova Tipo 2, com aumento de 100x



(c) Micrografia do corpo de prova Tipo 3 no aumento de 100x



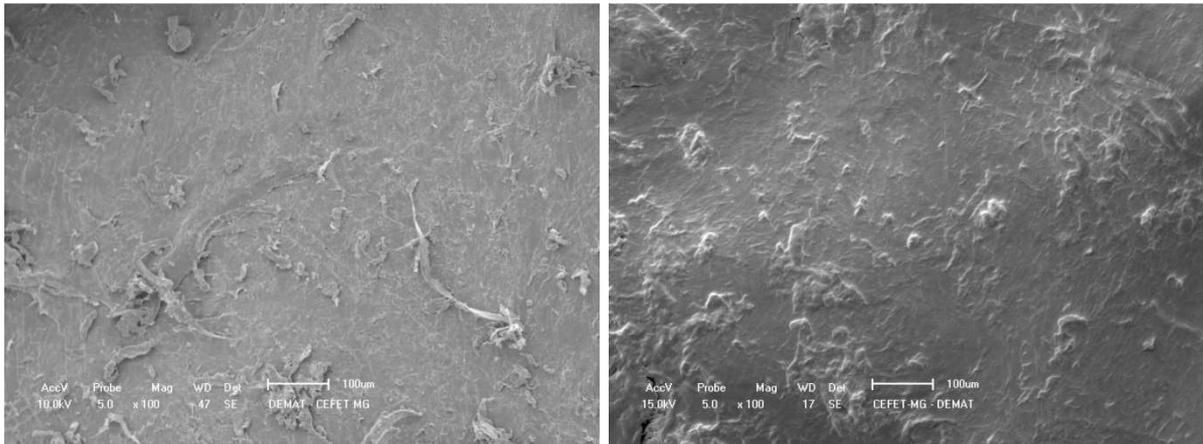
(d) Micrografia do corpo de prova Tipo 4 no aumento de 100x

Fonte : Microscópio Eletrônico de Varredura do DEMAT

Nessas micrografias, percebe-se diferenças significativas entre os corpos de prova Tipo 1 e os demais, o que era esperado já que o corpo de prova Tipo 1 é formado de PET puro. Essa micrografia assemelha-se em muito com a do PET reciclado antes do processo de compressão térmica, conforme Figura 52 a e b comparativa em diante.

Além disso, pode-se notar que as micrografias dos corpos de prova Tipo 3 e 4 são mais semelhantes, quando comparadas ao corpo de prova Tipo 2, em razão de maior quantidade de fibra presente nas mesmas para os corpos de prova Tipo 3 e 4. Nota-se uma maior quantidade de fibra, assim como camadas justapostas, enquanto isso não é percebido no corpo de prova Tipo 2. No entanto, nesse são verificadas pequenas porosidades espalhadas no corpo de prova.

Figura 52 – Micrografias comparativas



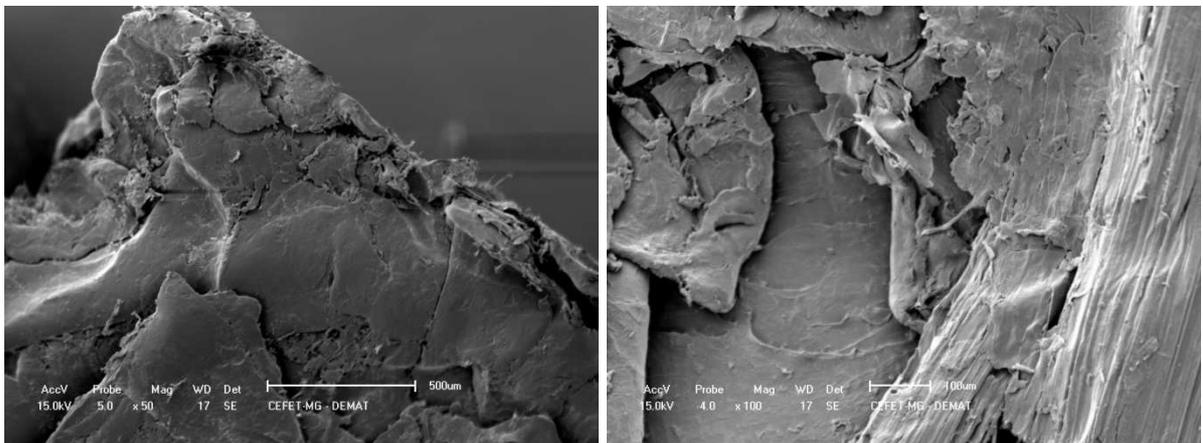
(a) PET reciclado com aumento de 100x

(b) Corpo de prova Tipo 1 (PET com compressão térmica) com aumento de 100x

Fonte : Microscópio Eletrônico de Varredura do DEMAT

Na análise microscópica também foi notada a presença de lamelas, indicando que as amostras se conformaram como um compósito laminado, Figura 53 a e b.

Figura 53 – Micrografias dos corpos de prova Tipo 1 e 3



(a) Micrografia do corpo de prova Tipo 1 com aumento de 50x mostrando a formação de lamelas

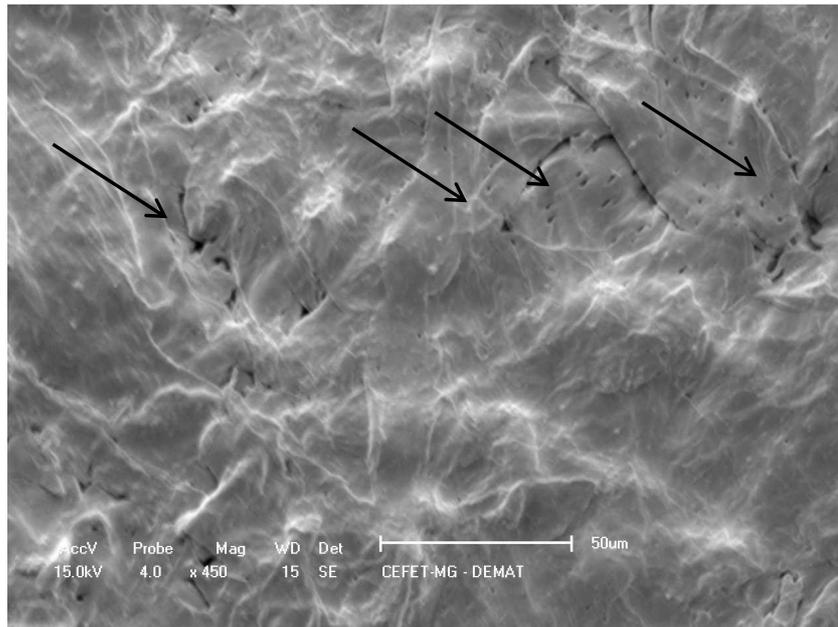
(b) Micrografia do corpo de prova Tipo 3 com aumento de 100x

Fonte : Microscópio Eletrônico de Varredura do DEMAT

Essa característica, assim como a porosidade presente, conforme verificado na Figura 54 do corpo de prova Tipo 2, é um bom indicativo da aplicação desse material como isolante térmico, já que segundo Incropera *et al* (2008), os melhores isolantes

térmicos são os que se apresentam como compostos laminados, assim como possuem certo grau de porosidade.

Figura 54 – Micrografia do corpo de prova Tipo 2 com aumento de 450x identificando as micro porosidades no material com setas indicativas



Fonte : Microscópio Eletrônico de Varredura do DEMAT

Além disso, deve-se apontar que o processo de metalização das amostras para análise de Microscopia Eletrônica de Varredura foi bastante demorado, devido a grande presença de gases nas amostras, em razão da elevada porosidade. Essa característica reforça mais a presença da porosidade nas amostras e a formação de lâminas, indicando se tratar de um material com características que o levam a ser um bom isolante e, sua condutividade térmica deve estar entre um valor médio dos valores da condutividade térmica do PET, do Bagaço e do ar, presente na porosidade.

4.2.3 RESULTADOS DA DENSIDADE APARENTE DOS CORPOS DE PROVA

Em relação à densidade aparente dos corpos de prova, os resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados da densidade aparente encontrados para os quatro corpos de prova

Tipo de corpo de prova	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade aparente (g/cm ³)
Tipo 1	3,42	0,15	0,04
Tipo 2	4,56	0,15	0,03
Tipo 3	4,56	0,2	0,04
Tipo 4	4,56	0,15	0,03

Fonte : Autoria da própria autora

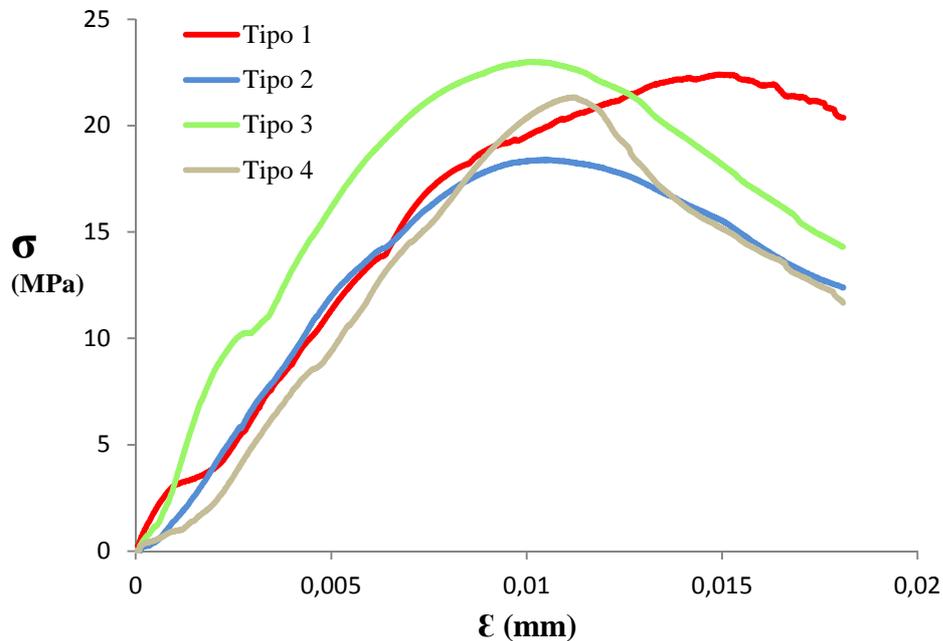
Os dados obtidos mostram pequena diferença entre os quatro corpos de prova obtidos. Essa diferença basicamente se deve a diferenças entre os valores de massa e volume obtidos, visto que o processamento desses materiais, embora com parâmetros pré-estabelecidos de forma idêntica, não tem como manter uma homogeneidade do processo. No entanto, embora não tenha havido nenhuma diferença significativa entre eles, a densidade encontrada para os quatro tipos de corpos de prova foi baixa, indicando que o material é extremamente leve, tanto devido a própria densidade dos materiais componentes, como pela presença de porosidade nas amostras. Esse dado é significativo no que tange a questão da aplicabilidade como isolante térmico, visto que os mesmos apresentam baixa densidade aparente.

4.3 RESULTADO REFERENTE À ANÁLISE DE PROPRIEDADE MECÂNICA

4.3.1 RESULTADO DO ENSAIO DE TRAÇÃO NOS CORPOS DE PROVA

A curva referente ao ensaio está demonstrada na Figura 55, a qual representa a deformação (ϵ) em relação a Tensão (σ) sobre o material, assim como os valores de Resistência à Tração, Módulo de Elasticidade e Tensão de Ruptura demonstrados na Tabela 13 em seguida.

Figura 55 – Representação gráfica do ensaio de tração dos quatro tipos de corpos de prova



Fonte : Autoria da própria autora

Tabela 13 – Valores de Resistência à Tração (RT), Módulo de Elasticidade (E) e Tensão de Ruptura

Corpo de Prova	Resistência a Tração (Mpa)	Módulo de Elasticidade	Tensão de Ruptura (Mpa)
Tipo 1	22,18±0,05	0,02±0,03	20,82±0,04
Tipo 2	18,3±0,04	0,015±0,03	12,32±0,04
Tipo 3	22,96±0,03	0,02369±0,02	14,35±0,05
Tipo 4	21,22±0,03	0,0156±0,02	12,23±0,04

Fonte : Autoria da própria autora

O ensaio de tração apresentou valores de Resistência à Tração maiores para o corpo de prova Tipo 3. Isso já era esperado, pois conforme trabalhos desenvolvidos por Paiva *et al* (2002) e Da Silva (2011), os melhores resultados de propriedades mecânicas de compósitos de PET com fibras em moldagem por compressão foram onde o teor de fibra era de 15%, no presente estudo representado pelo corpo de prova Tipo 3 (85% de PET e 15% de Bagaço – Fibra).

No entanto, os valores encontrados para os quatro Tipos de corpos de prova foi relativamente baixo, comparado com o valor de Resistência à Tração do PET oriundo de garrafas, $69,41 \pm 1,6$ Mpa (SILVA *et al*, 2006). Sendo que os valores do corpo de prova Tipo 3 e Tipo 1 sejam muito próximos, somente no corpo de prova Tipo 3 houve um pequeno ganho de Resistência à Tração na matriz polimérica, esse ganho foi pouco significativo. Isso se deve provavelmente ao plastificante utilizado, o qual não proporcionou uma melhoria significativa na interação entre os dois componentes, fibra e PET, conforme pode ser visto na Resistência à Tração dos outros dois Tipos de corpos de prova, os quais obtiveram valores menores do que no PET sem adição de bagaço (Tipo 1). Além disso, o processamento da fibra e das amostras, não possibilitou a formação de uma fibra homogênea e orientada na amostra, o que implica em pequenos aumentos em relação à tração, devido a não orientação.

Santos (2012) analisou ensaios de impacto de compósitos de PET reciclado com vários tipos de plastificantes oriundos de fontes renováveis diferentes com fibras de sisal produzidos por compressão térmica e, segundo seus resultados, os corpos de prova de PET reciclado com Glicerol (mesma composição química da glicerina bi - destilada), também tiveram valores menores do que nas amostras de PET reciclado sem adição de fibra, mostrando assim que esse plastificante não proporciona boa adesão/interação entre os componentes do material.

Em relação aos Módulos de Elasticidade encontrados para os quatro tipos de corpos de prova, não houve nenhuma mudança com adição do bagaço. Os resultados encontrados foram baseados na Equação apresentada abaixo.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (8)$$

Os valores iguais dos Módulos de Elasticidade, provavelmente devem estar associados à pequena quantidade de fibra presente (10%, 15% e 20%), que não deve ter alterado os valores dessa grandeza relativa ao PET, sendo os valores desse predominante.

Em relação aos valores de Tensão de Ruptura das amostras, o corpo de prova Tipo 1 apresentou valor maior do que os demais, estando muito próximo ao seu valor de Resistência à Tração. Já os demais corpos de prova apresentaram valores relativamente

próximos, mas menores do o do PET puro. Nesse quesito a incorporação da fibra modificou os resultados em relação ao corpo de prova sem adição de bagaço (Tipo 1).

O corpo de prova Tipo 4, embora tenha apresentado Tensão de Ruptura com valor próximo aos corpos de prova Tipo 2 e 3, apresentou um comportamento de curva diferenciado, com uma queda de tensão após o valor máximo mais acentuada. Isso pode vir de encontro ao abordado por Paiva *et al* (2002) e Da Silva (2011), que incorporações de fibras na matriz polimérica com percentual maior que 15% deterioram os valores de propriedades mecânicas das amostras.

5 DISCUSSÕES FINAIS

A análise qualitativa em relação à aplicação do compósito como isolante térmico, percebeu-se que as amostras trabalhadas apresentam propriedades que lhe proporcionariam essa aplicação. As amostras se apresentaram com porosidade significativa, baixa densidade aparente, além da conformação na forma laminar, todas essas propriedades são indicativas de seu uso como isolante estrutural.

Na análise quantitativa, as amostras não apresentaram bom desempenho em relação à propriedade mecânica. Isso se deve ao fato de que a interação/adesão entre o bagaço e o PET, proporcionada pela glicerina, não foi muito boa. No entanto, encontrar um plastificante que proporciona uma boa adesão/interação entre o PET e fibras lignocelulósicas é complicado, normalmente consegue-se essa característica com junções de mais de um plastificante, como se verificou no trabalho de Santos (2012), no qual essa melhora foi alcançada com a união do glicerol (semelhante composição química da glicerina bi-destilada), com o TBC (Tributil citrato), devido às próprias características da molécula do PET.

Contudo, embora a propriedade mecânica referente à tração não tenha tido bom resultado, conforme era esperado o Tipo 3 foi o que desempenhou melhor resultado, em razão da proporção de bagaço presente, resultado que está de acordo com trabalhos de Paiva *et al* (2002) e Da Silva (2011).

Um outro problema que pode estar associado à não melhora na propriedade mecânica é o próprio processamento utilizado. A compressão térmica, embora um processo mais barato, como a extrusão e injeção, não permite um controle rígido dos parâmetros de processamento, logo não se obtém um controle adequado com relação à conformação do material. Dessa forma, a orientação da fibra não é atingida e, isso influencia muito na Resistência à Tração do corpo de prova.

Entretanto, ao contrário do resultado em relação à propriedade mecânica, as propriedades térmicas não apresentaram grandes variações, mas houve pequena melhora no que diz a temperatura de degradação da amostra, além da não decomposição do bagaço no processo de compressão térmica, proporcionado pela glicerina que reduziu a Temperatura de fusão do polímero permitindo a fabricação das amostras. E, essa melhora

foi verificada assim como em relação à propriedade mecânica mais significativa no corpo de prova Tipo 3, o qual apresentou o maior deslocamento da curva à direita.

Na caracterização das amostras, o FTIR mostrou que a amostra apresentava os grupos moleculares presentes nos três materiais que compõem as amostras (PET reciclado, bagaço e glicerina). Não se conseguiu verificar deslocamentos de bandas, exceto alguns pequenos grupos que podem indicar certa cristalização do compósito, assim como um rearranjo molecular. Contudo, não tem como se comprovar tal hipótese.

Já em relação à caracterização pelo MEV, características importantes no que diz respeito à aplicação desse material como isolante foram identificadas, como porosidade e formação de lâminas no processo de conformação dos corpos de prova.

A densidade aparente, embora tenha valor baixo, não apresentou grandes alterações nos valores entre os quatro tipos de corpos de prova obtidos, o que é um indicativo que a densidade aparente do material predominante, no caso o PET prevaleceu sobre os demais.

Todas essas em análises em conjunto, mostraram a viabilidade da fabricação de compósitos de PET reciclado com adição de bagaço de cana-de-açúcar pelo processo de compressão térmica. Assim como, a composição adequada para esse compósito é àquela com 15% de bagaço. No entanto, melhorias em relação ao plastificante mais adequado e ao ciclo de temperatura devem ser feitas, para obtenção de um material com melhores propriedades e garantir seu uso comercial.

6 CONCLUSÃO

Embora não tenha sido possível a identificação do valor de condutividade térmica das amostras fabricadas pelo processo de compressão térmica, foi possível a identificação de propriedades importantes que indicam que o compósito tem características isolantes, como porosidade, formação lamelar e densidade aparente baixa.

Em relação aos três Tipos de compósitos fabricados, a composição que apresentou as melhores propriedades foi a do Tipo 3, com 15% em peso de bagaço. Esse resultado está de acordo com dados da literatura. Assim como o acréscimo de fibra no material deteriora a propriedade mecânica do mesmo.

O plastificante usado, não proporcionou uma boa adesão/interação, indicada pelos valores do ensaio de tração obtidos. Logo, não é um bom plastificante a ser usado no processo.

Em relação ao processo de compressão térmica, ele se mostrou viável para a fabricação do compósito, ainda que não proporcione um controle rígido do processo de conformação do material e seja realizado com um ciclo relativamente extenso.

A reutilização do PET reciclado a partir de garrafas PET foi possível, mesmo que o processo de trituração do material não proporcione uma granulometria homogênea a matéria-prima do processo. O mesmo foi observado na trituração do bagaço de cana-de-açúcar.

Dessa forma, os resultados encontrados nesse trabalho indicam que o material proposto tem características que indicam seu uso como isolante térmico estrutural, assim como a viabilidade do processo de fabricação do mesmo. No entanto, melhorias significativas devem ser realizadas para que o processo possa ser efetuado de forma comercial, como diminuição do ciclo térmico para a fabricação das amostras, assim como o uso de um plastificante mais adequado ou junção de plastificantes, proporcionando uma melhor adesão/interação dos materiais componentes do compósito.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Melhorar o ciclo de temperatura do processo de fabricação do compósito, possibilitando a produção comercial do mesmo;
- Utilizar outros plastificantes no processo verificando se há uma melhor adesão/interação entre os componentes do compósito;
- Fabricar amostras cilíndricas maiores possibilitando a análise da condutividade térmica do material;
- Aplicar o material como isolante estrutural e verificar a viabilidade da aplicação;
- Analisar o processo de degradação das amostras;
- Fabricar o material com outros processos de fabricação e analisar as diferenças proporcionadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST. **Aplicações das Principais Resinas Plásticas**. Disponível em : < <http://www.abiplast.org.br/noticias> >. Acesso em : 27 jun. 2012 às 17:16.

ALARCON, G. A. R. Caracterización del bagazo de la caña de azúcar. In: 6º CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Unicamp. **Anais do AGRENER**. Campinas, SP. 2006.

ALUCCI, M. P. **Inadequação climática da edificação: do excessivo consumo de energia ao comprometimento da saúde do usuário**. Tecnologia de edificações, São Paulo, IPT/PINI, p. 486-499, 1988.

ANJOS, Marcos Alyssandro Soares dos. **Adição do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados**. 2009. 172f. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, 2009.

ARAÚJO, E. M.; MÉLO, T. J. A.; CARVALHO, L. H.; ALVES, K. G. B.; CARVALHO, K. G. B.; ARAÚJO, K. D.; SOUZA, T. L. F.; SANTOS, J. P. **Aproveitamento de resíduos de fibra de vidro provenientes de indústrias da Paraíba na produção de compósitos**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, vol. 6, n. 2, p. 11, 2002.

BLOG DO PLANTO. **Plantar cana com consciência, para plantar sempre mais**. Disponível em: < <http://blog.planalto.gov.br/> >. Acesso em: 15 mai. 2012 às 14:00.

BLOG MUNDO POSSÍVEL. **Artesanato com garrafas PET**. Disponível em : < <http://blogmundopossivel.com.br/> > . Acesso em: 25 set. 2011 às 16:00.

BRASIL. **Decreto Lei nº 1413**, de 14 de agosto de 1975 Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais.

BOMBARCO, ACONTECIMENTOS E NEGÓCIOS. **Laminado**. Disponível em : <<http://bombarco.com.br/index.php/noticias/exibir/seminario-compositos-na-copa-de-2014-sera-realizado-em-agosto-no-rio-de-janeiro>> . Acesso em : 10 jun. 2012 às 15:00.

BULK MOLDING COMPOUNDS MÉXICO. **Bulk molding compounds**. Disponível em : < <http://www.bulkmolding.com/> >. Acesso em : 20 mar. 2012 às 15:00.

CANEVAROLO JR, Sebastião V. **Ciências dos polímeros – um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Carlos : Artiliber Editora LTDA, 2010. 3° ed. p. 280.

CALLISTER, William D. Jr. **Ciência e engenharia dos materiais – uma introdução**. 5°ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. p. 358-381.

CARVALHO, A.; RISSON, P.; VIEIRA, S. L.; ZENI, M.; ZATTERA, A. J. **Reaproveitamento de resíduos de laminados de fibra de vidro na confecção de placas reforçadas de resina poliéster**. Revista de Polímeros : Ciência e Tecnologia, São Paulo, vol. 8, n. 3, p. 17, 1998.

CASTRO, P. R. C e KLUGE, R. A. **Ecofisiologia de culturas extrativas: cana-de-açúcar; seringueira; coqueiro; dendezeiro e oliveira**. Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2001. 138 p.

CIANOTTO, M. A. **Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. Instituto de pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo**. Tecnologia de Edificações, 1° ed. São Paulo : CONSTRUTORA LIX DA CUNHA S.A/PINI/IPT, DIVISÃO DE EDIFICAÇÕES, 1988. p. 71-74.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Levantamento de Safras. Acompanhamento de safras**. Brasília, 2011.

CORAUCCI, Jean. **Lotus 78**. Disponível em: < <http://www.gpexpert.com.br/>> . Acesso em: 31 mai. 2012 às 16:00.

DAMASCENO, Livia Ferraz; BATISTELLE, Rosane Aparecida Gomes; SANTOS, Maria Fernanda Nobrega; LAHR, Francisco Antonio Rocco. **Projeto de um Protótipo sustentável**. Revista Minerva Pesquisa e Tecnologia, São Carlos, vol. 6, n. 2, p. 117, 2009.

DA SILVA, C. G. **Bagaço de cana-de-açúcar como reforço de matrizes termorrígidas baseadas em macromoléculas de lignina**. 2011. 220f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2011.

DARÉ, Carlos Alberto Neme; TARGA, Luiz Antônio; ISA, Mario Moro. **Avaliação da eficiência de isolantes térmicos por reflexão, utilizados como subcoberturas**. Energia Agrícola, Botucatu, vol. 20, n. 2, p. 14-29 , 2005.

DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SÓCIO-ECONÔMICOS. **Estudos & Pesquisas. Estudo setorial da construção civil 2011**. Brasília, 2011. n° 56.

DE PAOLI, Marco Aurelio. **Degradação e Estabilização de Polímeros**. Disponível em : < <http://chemkeys.com/en/> >. Acesso em : 27 jun. 2012 às 18:01.

DEL CORSO, Fernando. **Morte em Monza : quem é o culpado**. Revista Quatro Rodas. São Paulo, outubro, edição 219,1978.

DOS SANTOS, P. A. **Uso de fibras de curauá como agente de reforço para poliamida-6**. 2006. 82f. Dissertação (Mestrado em Físico-Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2006.

ELEKEIROZ. **Manual básico do poliéster insaturado**. Várzea Paulista, SP: 2004, 60p.

FELIPE, Renata Carla T. S. **Materiais Compostos**. Rio Grande do Norte : CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO RN DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL CURSO SUPERIOR EM TECNOLOGIA DA FABRICAÇÃO MECÂNICA, 2008. p.70.

FERNANDES, A. J. **Manual da cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livroceres, 1984. 196 p.

FIESP. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo, **Coleta seletiva e reciclagem de excedentes industriais**. São Paulo, nov. 2003. Disponível em: <http://www.fiesp.com.br/download/publicacoes_meio_ambiente/manual_coleta_seletiva.pdf>. Acesso em: 10 out.2004 às 11:00.

GNANOU, Yves; FONTANILLE, Michel. **Organic and Physical Chemistry of Polymers**. Nova Jersey :JOHN WILEY, 2008. 3°ed. p. 617.

GOOGLE MAPS. Praça Sete Belo Horizonte. Disponível em : < <http://maps.google.com.br/> >. Acesso em : 02 mai. 2013 às 16:00.

GOUVEA, Dra. Míriam Tvrzská de; CASELLA, Esleide Lopes. **Condução multidirecional: a equação de difusão de calor**. Portfólio da Profa. Dra. Míriam Tvrzská de Gouvêa, vol II, n. 5, p. 1-16, 2004.

HARADA, Júlio; WIEBECK, Hélio. **Plásticos de engenharia : tecnologia e aplicações**. São Paulo : Artlieber, 2006.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A.(IPT) / COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM (CEMPRE), Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. Publicação IPT 2622, São Paulo/SP (2001).

ITO, Ana Paula; AMÊNDOLA, Mariângela; PARK, Kil Jin. **Determinação de condutividade térmica de grãos de soja**. Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, México, vol. 5, n. 2, p. 76-81, 2003.

JUNIOR, Altibando Orteni. **A Fibra de vidro em matrizes poliméricas e cimentícias e seu uso estrutural em construção civil - o estado da arte**. 2007. 228f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, UFSCAR, São Carlos, 2007.

LENÇO, Paulo Cesar. **Caracterização do bagaço de cana para obtenção de energia**. 2010. 181f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2010.

LIMA, Ângela Maria Ferreira. **Estudo da cadeia produtiva do polietileno tereftalato (pet) na região metropolitana de Salvador como subsídio para análise do ciclo de vida**. 2001. 94f. Monografia (Especialização em Gerenciamento e Tecnologia Ambientais na indústria) – Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, UFBA, Salvador, 2001.

MANCINI, S. D.; ZANIN, M. **Influência de Meios Reacionais na Hidrólise de PET pós-consumo**. Polímeros : Ciência e tecnologia, vol. 12, p.34-40, 2002.

MARCONCINI, J. M.; RUVOLO FILHO, A. **Análise termodinâmica do comportamento mecânico na região elástica de blendas de Poli (tereftalato de etileno) reciclado e poliolefinas recicladas**. Polímeros : Ciência e Tecnologia, vol.16, p. 323-331, 2006.

MATOS, Tássio F. L.; SCHALCH, Valdir. **Composição dos Resíduos Poliméricos, Pós-consumo, Gerados no Município de São Carlos, SP**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 17, nº 4, p. 346-351, 2007.

MEGIATTO, J. D. **Fibras de Sisal : Estudo de propriedades e modificações químicas visando aplicação em compósitos de matriz fenólica**. 2006. 272f. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2006.

MONTENEGRO, R. S. P.; PAN, S. S. K.; RIBEIRO, M. C. M. **Resina PET para recipientes**. 2000, p.1-15.

PAIVA, J. M.; FROLLINI, E. **Sugarcane bagasse reinforced phenolic and lignophenolic composites**. Journal of Applied Pulymer Science, vol. 83, n. 4, p. 880-888, 2002.

PAYNE, J. H. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana**. São Paulo: Nobel, 1989. 245 p.

PENTAK. **O melhor isolante térmico e impermeabilizante para qualquer tipo de telha**. Disponível em: < <http://www.londontelhas.com.br/isolantes/pentak.html> >. Acesso em: 02 de jul. 2012 às 20:00.

RAMIRES, E. C. **Biocompósitos a partir de matriz polimérica baseada em lignina, tanino e glicoxal reforçadas com fibras naturais**. 2010. 277f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2010.

REIN, P. **Cane sugar engineering**. Berlim: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2007. 768 p.

REIS, Mara Nilza Estanislau. **Fenômeno de Transporte**. Portfólio da Profa. Dra. Mara Nilza Estanislau, vol. 2, n. 5, p. 1-6, 2008.

RESENDE, F. L. P. **Comparação entre as técnicas de análise termogravimétrica e leito fluidizado para pirólise de biomassa**. 2003. 185f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2003.

REVISTA MEIO AMBIENTE INDUSTRIAL. **A marca história das mil certificações ISO 14001 no Brasil**. São Paulo: maio/junho de 2003, Ano VIII, edição 43, nº 42.

REVISTA DO PLÁSTICO REFORÇADO. **Ao pó voltarás?** São Paulo: Julho/agosto de 2002, edição 26, p.80-85.

SAIKIA, D. **Investigations on Structural Characteristics, Thermal Stability, and Higrscopicity of Sisal Fibers at Elevated Temperatures**. International Journal of Thermophysics, vol. 29, n. 6, p. 2215-2225, 2008.

SALAZAR, V. L. P.; LEÃO, A. L. **Biodegradação das fibras de coco e sisal aplicadas na indústria automotiva**. Energia na agricultura, vol. 21, n.2, p. 99-133, 2006.

SANTOS, Rachel Passos de Oliveira. **Compósitos baseados em PET reciclado, fibras de sisal e plastificantes oriundos de fontes renováveis : estudo do processamento e propriedades destes materiais.** 2012. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade São Paulo, USP, São Carlos, 2012.

SATO, S. N. **Mantas refletem o calor e tem função impermeabilizante. Maioria possui foil de alumínio em uma ou duas faces.** Revista Técnica, São Paulo, novembro, 2003.

SHACKELFORD, J. F. **Introduction to materials Science for Engineers.** Nova York : Macmillan publishing Company, 1992. 3º ed. p. 896.

SCHMMELE, D.; SALES, J. M. A.; RESK, I. S. **Preparação, caracterização e degradação de blendas PS/TPS usando glicerol e óleo de buriti como plastificantes.** Polímeros : Ciência e Tecnologia, vol. 20, p.6-13, 2010.

SILVA, Ed-ek Soares; BORGES, Jacques Cousteau da Silva; OLIVEIRA NETO Manoel Leonel de. Efeito da adição de bagaço de cana de açúcar sobre as propriedades térmicas de pu de mamona. In : Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação, 302, 2010, Maceio, **Anais do CONEPI 2010.** Maceio, AL. 2011.

SILVA, André Luis Bonfim Bathista; SILVA, Emerson Oliveira da. **Conhecendo Materiais Poliméricos.** Mato Grosso: Universidade Federal do Mato Grosso Departamento de Física, 2003. p.84.

SILVA, Talita C.; MIRANDA, Leila Figueiredo de. **Estudo comparativo do Poli (tereftalato de etileno) virgem e reciclado.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia Mackenzie, Universidade Mackenzie, 2006.

SILVERSTEIN, Robert; BASSLER, Clayton; MORRILL, Terence. **Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos.** Tradução da 3ª por Ricardo Bicca e Roberto Faria. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1979. 299p

SOSA-ARNAO, J. H. **Caldeiras aquatubulares de bagaço: estudo do sistema de recuperação de energia.** 2007. 224f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2007.

TRINDADE, W. G.; HOAREAU, W.; MEGIATTO, J. D.; RAZERA, I. A. T.; CASTELLAN, A.; FROLLINI, E. **Thermoset Phenolic Matrices Reinforce with Unmodified and Surface-Grafted Furfuryl Alcohol, Sugar Cane Bagasse and Curaua**

Fibers : Propertiers of Fibers and Composites. Biomacromolecules, vol. 6, n.5, p. 2485-2496, 2005.

VECCHIA, F. Isolamento por reflexão. In: Encontro Nacional, 6., Encontro Latino-Americano sobre conforto no ambiente construído, 3., São Pedro, 2001. **Anais do ENCAC 2001.** São Pedro, SP. 2001.

VIEIRA, Roniérik Pioli. **Painéis : uma alternativa fácil para o gerenciamento de resíduos de madeira.** ENCICLOPEDIA BIOSFERA, Goiania, vol.7, n.12, p. 1, 2011.

WICKIPÉDIA. **Condução térmica.** Disponível em: <
http://pt.wikipedia.org/wiki/Condu%C3%A7%C3%A3o_t%C3%A9rmica >. Acesso: 02 jul. 2012 às 21:00.

WICKIPÉDIA. **Condutividade térmica.** Disponível em: <
http://pt.wikipedia.org/wiki/Condutividade_t%C3%A9rmica >. Acesso em: 02 jun. 2012 às 15:32.

WICKIPÉDIA. **Difusividade térmica.** Disponível em: <
http://pt.wikipedia.org/wiki/Difusividade_t%C3%A9rmica >. Acesso em: 04 jun. 2012 às 16:05.

9)