Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Dissertação de Mestrado

Felipe Carvalho Mol Borges

ESTUDO DE REPROCESSAMENTO DE POLÍMEROS: análise da viabilidade técnica de reprocessamento de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) pós consumo aplicado a tubos de drenagem

Belo Horizonte

Fevereiro de 2019

Felipe Carvalho Mol Borges

Estudo de reprocessamento de polímeros: análise da viabilidade técnica de reprocessamento de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) pós consumo aplicado a tubos de drenagem

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Claudinei Rezende Calado

Belo Horizonte

Fevereiro de 2019

Borges, Felipe Carvalho Mol.
B732e Estudo de reprocessamento de polímeros : análise da viabilidade técnica de reprocessamento de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) pós consumo aplicado a tubos de drenagem / Felipe Carvalho Mol Borges. - 2019.
80 f. : il.
Orientador: Claudinei Rezende Calado.

Dissertação (mestrado) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2019.
Bibliografia.

1. Polietileno. 2. Indústria de reciclagem. 3. Blendas. I. Calado, Claudinei Rezende. II.Título.

CDD: 620.1123

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca - Campus I /
CEFET-MG Bibliotecário: Wagner Oliveira Braga - CRB/6-3261

Estudo de reprocessamento de polímeros: análise da viabilidade técnica de reprocessamento de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) pós consumo aplicado a tubos de drenagem

Dissertação apresentada em 20 fevereiro de 2019 por Felipe Carvalho Mol Borges, ao Curso de Mestrado em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, aprovada pela banca examinadora constituída dos professores:

_____

Prof. Dr. Claudinei Rezende Calado - orientador

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

_____

Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

_____

Prof. Dr. Cleverson Fernando Garcia

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Belo Horizonte

20 de fevereiro de 2019

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Claudinei Rezende Calado, pelo apoio e contribuição ao longo do desenvolvimento deste trabalho, orientando quanto às melhores formas de abordagem do tema escolhido.

A Empresa Liderplast LTDA pelo apoio e pelo fornecimento de materiais e dados para elaboração deste trabalho.

Ao aluno do curso de Engenharia de Materiais do CEFET MG Gabriel Gontijo Rabelo Santiago pelo suporte na preparação das amostras e realização dos ensaios.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET, pela cessão dos equipamentos e espaços físicos para o desenvolvimento desta pesquisa.

A minha família, Carlos Eduardo Borges, meu pai, Bernardo Carvalho Mol Borges, meu irmão e Isabel Siqueira Sepúlveda Figueiredo, minha namorada, pelo apoio incondicional desprendido ao longo destes meses de curso, bem como o carinho e afeto nos momentos mais difíceis da jornada.

A CAPES uma vez que o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Os materiais poliméricos por sua facilidade de processamento, pelo seu baixo custo e pela sua versatilidade são utilizados em diversas aplicações e cada vez mais tem ganhado espaço no mercado como matéria-prima na indústria. Porém, estes materiais são obtidos de uma fonte não renovável, a maioria deles são olefinas, obtidos pelo processamento do petróleo, e não são biodegradáveis, por estes motivos se faz necessário pensar em seu reprocessamento para garantir a sustentabilidade. O presente estudo teve como foco a produção de blendas e análise da variação das propriedades mecânicas do PEAD fornecido por empresas de sucata de polímeros para aplicação em tubos de drenagem, com a adequação de suas propriedades para reuso como matéria-prima. A pesquisa contou com amostras de materiais reciclados cedidas pela indústria de fabricação de tubos de drenagem corrugados. Empresas parceiras providenciaram a granulação das amostras enviadas pelos fornecedores de matéria-prima reciclada que foram utilizadas na construção dos corpos de prova posteriormente submetidos a ensaios de índice de fluidez e tração. Os laboratórios do CEFET-MG foram utilizados para realização dos ensaios nos corpos de prova com o fito de avaliar as alterações nas propriedades mecânicas do material e comparar, assim, dados dos materiais puros com os das blendas produzidas com os materiais pós consumo, obtidos a partir de amostras fornecidas por empresas de reciclagem. Ao final deste trabalho evidenciou-se a dificuldade do controle de propriedades das blendas e chegou-se a uma blenda composta por resíduo de tanque de combustível com tapete de banheiro que se aproxima das propriedades do atual tubo corrugado produzido pela Empresa A.

PALAVRAS CHAVE: Polietileno, indústria de reciclagem, blendas

ABSTRACT

Polymeric materials, because of their ease of processing, low cost and versatility, are used in many applications and have increasingly gained market share as a raw material in the industry. However, these materials are obtained from a non-renewable source, most of them are olefins, obtained by the processing of petroleum, and are not biodegradable, for these reasons it is necessary to think about their reprocessing to ensure sustainability. The present study focused on the production of blends and analysis of the variation of the mechanical properties of the HDPE supplied by scrap companies of polymers for application in drainage pipes, with the adequacy of their properties for reuse as raw material. The research featured samples of recycled materials provided by the corrugated drain pipe manufacturing industry. Partner companies provided the granulation of the samples sent by suppliers of recycled raw material that were used in the construction of the test specimens subsequently submitted to tests of fluidity and traction index. The CEFET-MG laboratories were used to perform the tests on the test specimens in order to evaluate the changes in the mechanical properties of the material and to compare data of the pure materials with those of the blends produced with the post-consumption materials obtained from samples provided by recycling companies. At the end of this work the difficulty of the control of the properties of the blends was evidenced and a mixture composed of residue of fuel tank with bathroom mat that approached the properties of the present corrugated tube produced by Company A.

KEYWORDS: Polyethylene, recycling industry, blends

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representações esquemáticas da estrutura do PEAD. 18
Figura 2 – Tanque de combustível Hyundai HB20 em PEAD..... 20
Figura 3 – 5 carros mais vendidos no Brasil de janeiro a maio de 2017. 21
Figura 4 – Fluxograma do ciclo de vida de polímeros aplicada a indústria automotiva..... 23
Figura 5 – Termoplásticos mais encontrados no resíduo sólido brasileiro. 26
Figura 6 – Simbologia utilizada para identificação de embalagens poliméricas segundo norma NBR13230 da ABNT. 29
Figura 7 – Esquema de separação de polímeros por densidade. 30
Figura 8 – Sucata de PEAD de tapete de vestiário/banheiro. 32
Figura 9 - Sucata de PEAD de embalagens domésticas..... 32
Figura 10 - Sucata de tanque de combustível. 33
Figura 11 – Moinho de facas 34
Figura 12 – Amostra moída pelo moinho de facas 34
Figura 13 – Fluxograma do processo para produção de blendas recicladas. .. 36
Figura 14 – Equipamento medição índice de fluidez de polímeros 37
Figura 15 – Corpo de prova para o ensaio de tração. Dimensões: L = 114mm, A = 41,70mm, C = 19,40mm e espessura = 3mm 39
Figura 16 – Equipamento ensaio de tração AG-X 40
Figura 17 – Prensa hidráulica SL11 Solab. 41
Figura 18 – Placas produzidas na prensa hidráulica SL11 Solab. 41
Figura 19 – Equipamento extrusão Rheomex. 42
Figura 20 – Amostras sucata PEAD ensaiada a diferentes parâmetros..... 48
Figura 21 – DSC Amostras de ED..... 50
Figura 22 – DSC Amostras de PR..... 50
Figura 23 – DSC Amostras de TC..... 51
Figura 24 – DSC Amostras de TB. 51
Figura 25 – DSC Amostras de TE. 52
Figura 26 – DSC Amostras de TE3. 52
Figura 27 – DSC Amostras de TEB..... 53
Figura 28 – DSC Amostras de TEA..... 53

Figura 29 – Resumo comparativo ensaio DCS. 54
Figura 30 – Previsto x realizado blenda TC e TB. 58
Figura 31 – Previsto x realizado blenda TE1 e TE3. 58
Figura 32 – Ensaio de tração – ED. 65
Figura 33 – Ensaio de tração – TC..... 65
Figura 34 – Ensaio de tração – TEA. 65
Figura 35 – Ensaio de tração – TE1..... 66
Figura 36 – Ensaio de tração – TE3..... 66
Figura 37 – MFI blendas TB e TC. 70
Figura 38 – MFI Blenda TE1 e TE3..... 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Carros mais vendidos de janeiro a maio de 2017..... 21
Tabela 2 – Propriedades mecânicas da blenda de PP virgem com PP reprocessado..... 27
Tabela 3 – Valores de resistência ao impacto de blenda de PP virgem com PP reprocessado..... 28
Tabela 4 – Lista de siglas para as amostras analisadas. 33
Tabela 5 – Índices de fluidez das amostras. 44
Tabela 6 – Dados ensaio amostra PEAD PR. 45
Tabela 7 – Dados ensaio amostra PEAD TEA. 46
Tabela 8 – Dados ensaio amostra PEAD TEB. 46
Tabela 9 – Dados ensaio com PEAD ED**.** 47
Tabela 10 – MFI Blenda TB e TC. 56
Tabela 11 – MFI TE1 e TE3. 57
Tabela 12 – Blenda TE1 e TE3 - 1º Reprocessamento. 59
Tabela 13 – Blenda TE1 e TE3 - 2º Reprocessamento. 60
Tabela 14 – Blenda TE1 e TE3 - 3º Reprocessamento. 60
Tabela 15 – Blenda TB +TC - 1º Reprocessamento. 61
Tabela 16 – Blenda TB +TC - 2º Reprocessamento. 62
Tabela 17 – Blenda TB +TC - 3º Reprocessamento. 63
Tabela 18 – Resumo reprocessamento das blendas. 63
Tabela 19 – Propriedades mecânicas das amostras puras. 66
Tabela 20 – Propriedades mecânicas das blendas. 67
Tabela 21 – Ensaio de tração embalagens domésticas extrudadas. 68
Tabela 22 – MFI das blendas TB e TC. 69
Tabela 23 – MFI das blendas TE3 e TE1. 71
Tabela 24 – Ensaio de tração Blendas TE1 e TE3. 72
Tabela 25 – Ensaio de tração blendas TC e TB. 73
Tabela 26 – Simulação de custos com matéria-prima Empresa A. 78
Tabela 27 – Simulação de redução de custos com uso de blenda de PEAD... 79
Tabela 28 – Resumo previsão alteração material 79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

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

DFR – Projeto orientado para reciclagem

DSC - Calorimetria Diferencial Exploratória

ED – Embalagens domésticas

FCA S.A. – Fiat Chrysler Automóveis Sociedade Anônima

FENABRAVE – Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores

FIAT S.A. – Fábrica Italiana de Automóveis de Turim Sociedade Anônima

MFI – Medição do índice de Fluidez

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PEBD – Polietileno de Baixa Densidade

PET – Polietileno tereftalato

PELBD – Polietileno Linear de Baixa Densidade

PEUBD – Polietileno de Ultra Baixa Densidade

PEUAPM – Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PMMA – Polimetil-Metacrilato

PP – Polipropileno

PR – Pellet Reciclado

SINDIPEÇAS – Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores

TB – Tapete de banheiro

TC – Tanque de combustível

TE1 – Tubo elétrico 1 polegada

TE3 – Tubo elétrico 3 polegadas

TEA – Tubo empresa A

TEB – Tubo empresa B

VFV – Veículos em fim de vida

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO 13
2. OBJETIVOS 15
2.1 Objetivos Gerais 15
2.2 Objetivos específicos 15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 16
3.1. Polímeros 16
3.2. O Polietileno 17
3.3 Polímeros e a indústria automotiva 18
3.4 Reciclagem Veicular 22
3.5 Reciclagem de Polímeros 24
4. MATERIAIS E MÉTODOS 31
4.1 Materiais 31
4.1.1 Preparação das amostras 33
4.1.2 Formulação das blendas 35
4.2 Métodos 37
4.2.1 Índice de fluidez 37
4.2 Calorimetria diferencial exploratória 38
4.5 Extrusão das amostras 41
4.6 Tratamento dos dados 42
5. RESULTADOS 43
5.1 Índice de fluidez 43
5.1.3 Efeito dos parâmetros de processamento na fluidez do material 48
5.2 Caracterização das amostras 49
5.3 Análise das blendas 55

5.4 Análise da homogeneidade das blendas 59
5.5 Análise das propriedades mecânicas 64
5.6 Modelo matemático para predizer propriedades..... 69
6.CONCLUSÕES 74
REFERÊNCIAS..... 76
APÊNDICE 78

1.INTRODUÇÃO

Atualmente é impossível pensar em um mundo sem polímeros. Estes materiais estão tão presentes na sociedade contemporânea que se tornaram de suma importância para o cotidiano e para o setor industrial.

Com o aumento do consumo deste tipo de material nas últimas décadas, principalmente com a sua adoção pela indústria automotiva, consequentemente aumentou-se a geração de resíduos e os impactos ambientais.

“Em um automóvel são encontrados em média 40 plásticos diferentes, cada qual com variações na composição, nos aditivos e corantes. Essa diversidade dificulta e mesmo em alguns casos inviabiliza a reciclagem” (MEDINA; GOMES, 2002).

Segundo Medina e Gomes (2002), a mistura dos diversos materiais presentes nos componentes de um veículo dificulta, muito quando não torna impossível a recuperação. Frente a isto, as fábricas e montadoras já vêm trabalhando juntamente com seus parceiros e fornecedores e com os produtores de materiais dos setores químico e siderúrgico e até com recicladores, no desenvolvimento de novos projetos e produtos que resultem em automóveis mais recicláveis.

Tendo em vista que alguns tipos de polímeros não são biodegradáveis, é de fundamental importância que se avalie novas aplicações e estudos de reciclagem, a fim de mitigar os impactos gerados pelo aumento da demanda e consumo, conciliando o ganho ambiental e a viabilidade econômica.

O uso de polietileno de alta densidade (PEAD) em tanques de combustíveis já é uma tendência mundial adotada pelas montadoras de veículos. Estudos realizados pela Associação de Fabricantes de Plásticos para Sistemas de Combustível, no ano de 2005 já evidenciava a tendência do aumento e a dominância do uso de tanques de combustível construídos em PEAD. No ano de 2005 a participação do tanque plástico no mercado automobilístico já representava 91% na Europa, 77% na América do Norte, 60% na América do sul e 26% na Ásia. Com perspectivas de aumento da dominância do uso PEAD em tanques nos anos seguintes (SUZUKI, 2007).

Diante disto, este trabalho focou em encontrar uma aplicação de reciclagem do polietileno de alta densidade, PEAD, de tanques de combustíveis relacionada à indústria de construção civil objetivando assim conciliar oferta e demanda para a indústria de reciclagem de polímeros. Aplicando-se desta forma, a sucata de PEAD utilizado em tanques de combustíveis veiculares e PEAD obtida de diversas fontes como matéria-prima para a fabricação de tubos corrugados aplicados a cabeamento elétrico e tubos de drenagem.

A partir da busca por publicações acadêmicas a respeito de polímeros, percebeu-se que há um número reduzido de estudos, se comparado as produções acadêmicas dedicadas aos materiais metálicos e cerâmicos e em se tratando de reprocessamento e formação de blendas este número de publicações e artigo se reduz ainda mais, sendo ainda muitos destes estudos focados na formação de blendas de polímeros com algum material de origem vegetal. Frente a isto este trabalho objetiva ser útil contribuindo para o estudo das blendas formadas com diferentes tipos de polímeros para contribuir e estimular a atividade de reciclagem. O presente trabalho pretende caracterizar e analisar as alterações nas propriedades mecânicas do PEAD pós-consumo quando misturado e reprocessado.

Foram analisados diferentes cenários por meio de ensaios em corpos de prova compostos por blendas formadas de PEAD pós consumo - isto é, aquele material obtido na indústria de reciclagem após o término da vida útil com o descarte. Para isto, foram analisadas as propriedades das amostras dos materiais puros e posteriormente as misturas de matéria-prima reprocessada, para avaliação do efeito nas propriedades e das características finais obtidas de acordo com a alteração de proporção de material nas blendas formadas por materiais misturados.

Pode-se supor que a indústria de processamento de polímeros demonstrará interesse pelo tema e atualmente já possui uma demanda suficiente de matéria-prima que possibilite a viabilidade econômica da implementação da mistura de material pós vida útil ao material virgem, acarretando redução de custo, devido ao volume de produção e ao tamanho da cadeia de produção.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho visa ser útil à indústria de plásticos, contribuindo para o cumprimento de sua responsabilidade sócio ambiental, dando o correto tratamento aos resíduos gerados pós consumo de seus produtos, podendo ser também uma alternativa de redução de custo e ganho de competitividade no mercado.

2.2 Objetivos específicos

O presente estudo pretende analisar o efeito nas propriedades mecânicas das blendas formadas a partir de sucatas de polímeros provenientes da indústria de reciclagem.

Para isto, amostras de PEAD puras foram caracterizadas. Posteriormente blendas com estas amostras foram produzidas e analisadas as alterações em suas propriedades mecânicas após estes materiais serem misturados e reprocessados.

Para atingir este objetivo, os seguintes passos foram seguidos:

- Fabricação de corpos de prova com diferentes proporções de matéria-prima reprocessada e pós consumo;
- Avaliação das propriedades mecânicas por meio de ensaios de tração;
- Avaliação da variação das propriedades mecânicas finais das blendas de PEAD formadas com materiais pós-consumo, tendo suas proporções e propriedades conhecidas e inicialmente;
- Sugestão de uma faixa ótima de mistura entre estes materiais em que seja viável o reprocessamento;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Polímeros

Primeiramente, são polímeros um conjunto de macromoléculas orgânicas constituídos de unidades repetitivas ao longo de sua cadeia, chamadas de monômeros. Estes monômeros são ligados entre si por ligações covalentes e podem ser obtidos a partir das matérias primas como o petróleo, o gás natural, a hulha, o carvão mineral ou de produtos naturais como o caso da celulose e do amido.

Quanto ao tipo de classificação, dividem-se os polímeros em artificiais, orgânicos ou sintéticos, de acordo com a fonte de obtenção.

Os polímeros orgânicos ou naturais são sintetizados diretamente pela natureza, tem-se neste caso, como exemplo, a borracha natural e a celulose.

Já polímeros artificiais são aqueles obtidos a partir de reações químicas de polímeros naturais orgânicos, cita-se o acetado de celulose como exemplo desta classe de polímeros.

Polímeros sintéticos são aqueles produzidos artificialmente ou sintetizados quimicamente e são oriundos, em sua grande maioria, de derivados de petróleo. Este tipo de material pode ser manipulado quanto ao tamanho e composição química, sendo possível modelar suas propriedades para diversas aplicações. (CALLISTER, 2005)

Os polímeros podem ser classificados como termoplásticos (plásticos), termofixos, borrachas e fibras. O material que será analisado se enquadra na categoria dos termoplásticos, que são aqueles polímeros que apresentam densidades baixas e são conformáveis a quente, são isolantes térmico e elétrico, apresentam boa resistência ao impacto e possuem baixo custo, portanto, apresentam características essenciais para seu uso em larga faixa de aplicações. (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

3.2. O Polietileno

O polietileno é um polímero termoplástico que se enquadra na categoria de polímero sintético. Ele é obtido pelo acoplamento do monômero a partir do gás etileno, extraído por meio do refinamento do petróleo, por meio de mecanismos de adição.

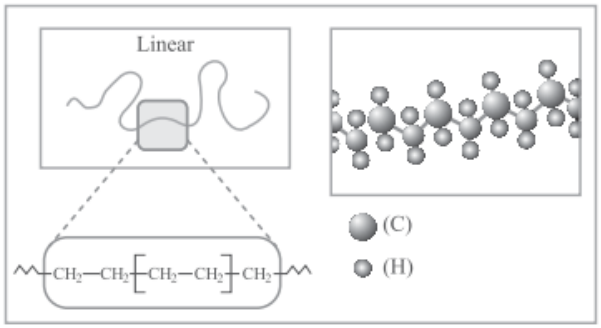
Segundo Coutinho, Melo e Maria (2003), o polietileno é um polímero com estrutura parcialmente cristalina, é caracterizado por sua flexibilidade, sendo que suas propriedades estão fortemente dependentes da quantidade de fases amorfa em relação a cristalina. Estes polímeros são inertes frente à maioria dos produtos químicos comuns, devido à sua natureza parafínica, seu alto peso molecular e sua estrutura parcialmente cristalina.

Este polímero pode ser classificado em polietileno de ultrabaixa densidade, PEUBD, polietileno linear de baixa densidade, PELBD, polietileno de baixa densidade, PEBD, polietileno de alta densidade, PEAD e polietileno de ultra alto peso molecular, PEUAPM. (COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003).

Todas estas variações do polietileno podem ser recicladas e reprocessadas. Esta classe de polímeros apresenta boa resistência ao impacto, alta flexibilidade, boa estabilidade térmica e química. (COUTINHO; MELO; MARIA, 2003).

Segundo Coutinho, Melo e Maria (2003) o polietileno linear, Figura 1, ou polietileno de alta densidade, PEAD, é um polímero com estrutura altamente cristalina (acima de 90%), isso se deve ao seu baixo teor de ramificações. A temperatura de fusão deste material é aproximadamente 132 °C e sua densidade pode variar de 0,95 a 0,97 g/cm³.

Figura 1 – Representações esquemáticas da estrutura do PEAD.



Fonte: Coutinho, Melo e Maria (2003)

Este polímero pode ser conformado por meio de moldagem por sopro, extrusão e injeção. Tem-se como exemplo dos produtos obtidos a partir dele tanques de combustível veiculares, utensílios domésticos, embalagens entre outros (COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003)

3.3 Polímeros e a indústria automotiva

Segundo Naveiro e Medina (2009), os plásticos apareceram na indústria automotiva na década de 1970, no cenário da crise do petróleo mundial no período de 1973 a 1976, como alternativa para a redução de peso e consequentemente, consumo de combustível dos veículos no mercado.

Nos dias de hoje, uma grande variedade de polímeros como PEAD, PMMA, Policarbonato, Polipropileno, ABS, Poliuretano, entre outros têm sido empregados na fabricação de componentes automotivos.

O PEAD é um material derivado do petróleo, fonte não renovável e cujo preço está associado às oscilações do mercado externo, além de não ser biodegradável, o que provoca um acúmulo de resíduos no meio ambiente (FERNANDES; DOMINGUES, 2007).

Segundo Medina e Gomes (2002), um automóvel possui cerca de 40 tipos de plásticos diferentes, sendo cada um com variações em sua composição, nos aditivos e corantes utilizados em sua fabricação. Essa grande gama de

diferentes materiais se torna um gargalo quando não inviabiliza a reciclagem. Para solucionar o problema da dificuldade de separação e da grande quantidade de materiais diferentes foi desenvolvida a metodologia de projeto orientado para reciclagem, *design for recycling*, (DFR) que visa diminuir o número de componentes e variedade de materiais plásticos, ou pelo menos projetá-los possibilitando a identificação de sua composição, o que é de extrema importância para a reciclagem, pois quimicamente há incompatibilidades que são insuperáveis. Ou seja, há misturas de materiais poliméricos que tornam impossível a reciclagem e recuperação do material.

Segundo Silva (2016), a expectativa de vida média de um veículo no Brasil era de 8 anos e 8 meses em 2014. Visto isto, é importante pensar-se em uma forma de reprocessar este material, haja vista os impactos ambientais gerados e o volume de produção da indústria nacional.

A sucata metálica é reabsorvida pelo segmento industrial, porém os resíduos poliméricos não são retrabalhados na mesma proporção. Além destes materiais não contarem com a mesma infraestrutura de logística reversa como já se tem atualmente para os materiais metálicos. Outra limitação para o reprocessamento dos polímeros em larga escala são os efeitos dos mecanismos de degradação que ocorrem no material durante o reprocessamento, estes impactam em suas propriedades mecânicas e reológicas, podendo comprometer o uso e o seu ciclo de vida destes materiais (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

Por isto, este estudo foi elaborado, com o intuito de analisar a viabilidade de reprocessamento do PEAD, haja vista que esta é uma área que apresenta demanda de trabalhos técnicos e que deve ser desenvolvida.

A frota de automóveis no Brasil cresce ano após ano, segundo dados da Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores (FENABRAVE), no ano de 2016 foram comercializados um total de 3.071.960 de veículos novos no Brasil, dividido entre as seguintes categorias, Automóveis e Comerciais Leves, Caminhões, Ônibus, Motos e Implemento. Desse total, as categorias Automóveis e Comerciais Leves respondem por 1.986.362 das unidades vendidas (FENABRAVE, 2017).

As montadoras de veículos no Brasil já têm optado pelo uso de tanques de combustível, Figura 2, fabricados em polímeros em seus novos

desenvolvimentos por diversos fatores como tempo de desenvolvimento de projeto, custo e investimento em ferramental, estabilidade dimensional do componente, entre outros.

Figura 2 – Tanque de combustível Hyundai HB20 em PEAD.

Fonte: Próprio autor (2019)

Analisando os projetos de empresas de países mais desenvolvidos, esta solução tem se mostrado amplamente aplicada.

No Brasil, esta tendência tem se mostrado crescente tendo em vista que as empresas têm utilizado como solução técnica a especificação do Polietileno de alta densidade, em tanques de combustível, devido à redução de tempo em desenvolvimento do projeto, redução de custos e investimentos em ferramentais além da vantagem associada à sua liberdade de forma, o que proporciona maior volume útil do componente e consequentemente maior autonomia para o veículo.

Este último fator é de grande importância, uma vez que se mostra um diferencial competitivo do produto no mercado frente aos veículos das montadoras concorrentes.

Um exemplo desta nova tendência do uso de materiais poliméricos aplicados a tanques de combustíveis veiculares pode ser confirmado quando verifica-se que dos 5 carros mais vendidos no Brasil de Janeiro a Maio de 2017 (FENABRAVE, 2017), GM Onix, Ford Ka, Renault Sandero, Hyundai HB20 e VW Gol, Figura 3, todos possuem tanques de combustível em PEAD.

Figura 3 – 5 carros mais vendidos no Brasil de janeiro a maio de 2017.

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 1 – Carros mais vendidos de janeiro a maio de 2017.

Modelo	**Número de vendas**
Chevrolet Onix	68.318
Hyundai HB20	41.434
Ford Ka	36.839
Renault Sandero	29.780
Volkswagenn Gol	29.680
Total	**206.051**

Fonte: Quatro Rodas (2017)

Com base nestes dados de mercado, Tabela 1, pode-se perceber que apenas os 5 modelos mais vendidos no brasil no primeiro trimestre de 2017 dentro de alguns anos produzirão aproximadamente cerca de 1.200.000 kg de sucata de PEAD. Vale ressaltar que este é apenas um dos componentes plásticos. Isto reforça a necessidade de se pensar na reciclagem dos veículos e seus materiais pós consumo.

3.4 Reciclagem Veicular

Os veículos em fim de vida (VFV), segundo Silva (2016), são aqueles que não mais apresentam condições requeridas para a circulação, seja por mau estado de conservação ou por outro motivo, constituindo assim um resíduo sólido.

No Brasil, o descarte adequado de um veículo que não está mais com condições de uso é uma tarefa complexa, pois tem questões administrativas, como a baixa do veículo, além de uma série de regras e diretrizes que devem ser seguidas conforme regulamenta a Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), promulgada em agosto de 2010.

A reciclagem veicular é uma tendência mundial e o Brasil precisa se adequar a essa nova realidade. Este é um mercado que cresce a cada ano e na mesma medida em que cresce a produção industrial cresce também a produção de rejeitos.

> O Brasil precisa investir na qualidade da reciclagem de veículos e componentes automotivos, principalmente plásticos, para melhor aproveitar e valorizar a reciclagem desse material na cadeia automotiva, acompanhando a tendência mundial (NAVEIRO; MEDINA, 2009, p.12).

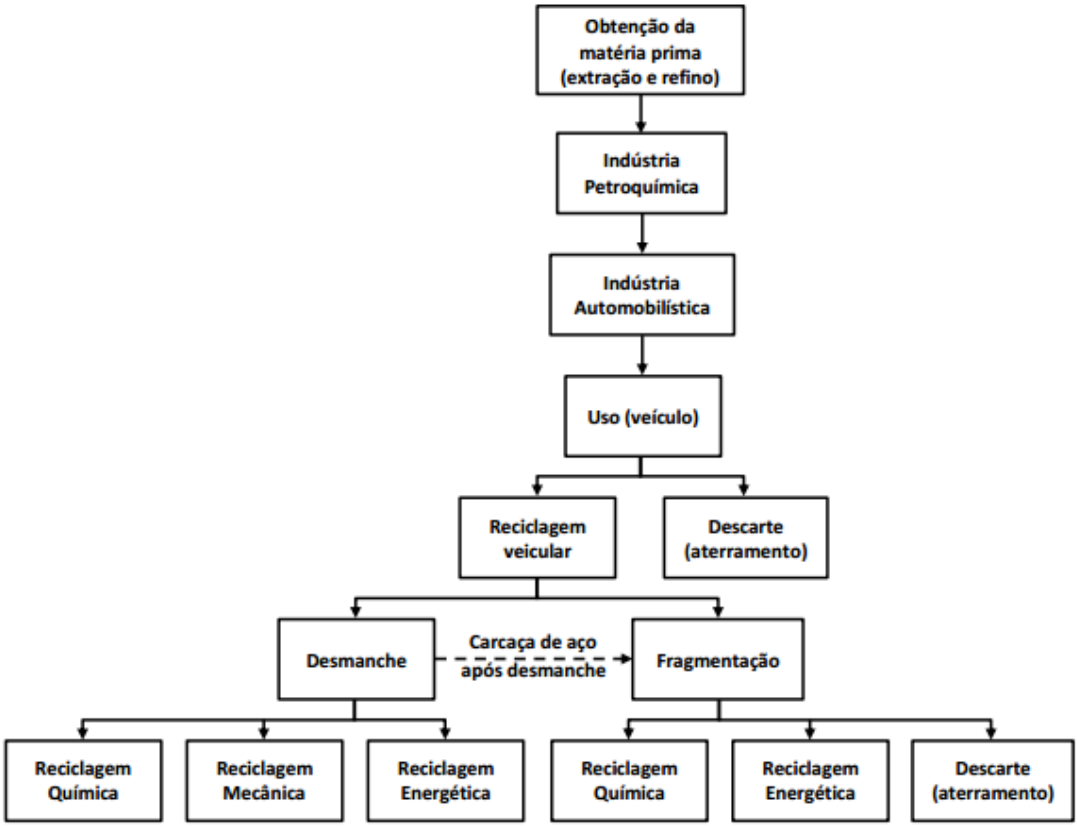
Segundo Naveiro e Medina (2009) no continente europeu desde o ano 2000 já está em vigor uma Diretiva do Conselho Europeu sobre reciclagem de veículos sucateados (*Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council, of 18 September 2000, on end-of life vehicles*) que estabeleceu a responsabilidade das montadoras pela reciclagem e tratamento final dos resíduos gerados por veículos pós consumo.

No Brasil, ao contrário do continente Europeu, não são as montadoras que estão que estão tomando as principais medidas para a reciclagem de automóveis. Este papel de coordenar a rede de reciclagem esta nas mãos dos produtores de materiais, principalmente das empresas de material plástico, indústrias siderúrgicas e metalúrgicas. Essas empresas, ligadas ou não ao setor automotivo, em grande parte dos casos estão envolvidas na coleta, separação,

recuperação de materiais para reintegrá-los ao ciclo produtivo (MEDINA; GOMES, 2002).

Em se tratando da reciclagem dos componentes automotivos fabricados em polímeros, pode-se verificar na Figura 4, as etapas para a reciclagem dos mesmos.

Figura 4 – Fluxograma do ciclo de vida de polímeros aplicada a indústria automotiva.



Fonte: Quadra (2015)

Segundo Medina e Gomes (2003), um veículo ao atingir o fim de sua vida útil, ainda possui muitos componentes que podem ser reutilizados ou recuperados uma vez que o automóvel não se desgasta uniformemente. Há, portanto, uma hierarquia, ou ordem de prioridade, de problemas a resolver, em que no primeiro grupo estão, sem dúvida, os pneus e as baterias.

Segundo Naveiro e Medina (2009), novos projetos e desenvolvimentos de veículos pensando em sua destinação final pós-consumo já são uma realidade, algumas montadoras já projetam carros considerando sua desmontagem ao final de seu ciclo de vida. Esta prática é de grande importância e vêm facilitando a reciclagem e remanufatura de peças e sistemas. Pode-se tomar como exemplo o Renault Clio II, com o qual a montadora francesa iniciou sua produção no Brasil em 1999. Este veículo foi projetado para ser 95% reciclável, antecipando-se às exigências da Legislação Europeia sobre Veículos em fim de vida – DE 2000/53/EC – que estabeleceu essa taxa como meta para 2015.

No Brasil, de acordo com estatísticas divulgadas pelo Sindipeças, no ano de 2015 a idade média da frota circulante de automóveis de passageiros, passou de 8 anos e 6 meses em 2012 para 8 anos e 8 meses em 2014 evidenciando um leve aumento da idade dos veículos brasileiros (SILVA, 2016).

Segundo Silva (2016), automóveis fabricados atualmente possuem de 10% a 15% de plásticos em sua composição com perspectiva de crescimento na participação destas peças plásticas no setor automobilístico podendo chegar até 25% nos próximos anos.

3.5 Reciclagem de Polímeros

Em se tratando de reciclagem de polímeros, pode-se classificar os tipos de reciclagem em quatro categorias:

1) Reciclagem primária,
2) Reciclagem secundária,
3) Reciclagem terciária,
4) Reciclagem quaternária.

Segundo Spinacé e Paoli (2005), entende-se por reciclagem primária os processos relativos à conversão dos resíduos poliméricos industriais reutilizados dentro da própria indústria para produção de peças ou produtos de

características similares ao polímero virgem, como no caso do reuso de rebarbas e aparas misturados à matéria-prima.

A reciclagem secundária é classificada como a utilização dos resíduos poliméricos provenientes dos resíduos sólidos urbanos, pós consumo aplicados a processos de fabricação que originem produtos que tenham aplicação menos nobre, com menor exigência do que o produto obtido com polímero virgem, como no caso da reciclagem para fabricação de embalagens para lixo.

Reciclagem terciária é o processo tecnológico de produção de insumos químicos ou combustíveis a partir de resíduos poliméricos. Neste tipo de reciclagem, os polímeros são submetidos a processos de despolimerização tais como processo de solvólise (hidrólise, alcoólise, amilose), ou por métodos térmicos (pirólise à baixa e alta temperaturas, gaseificação, hidrogenação) ou ainda métodos térmicos/catalíticos (pirólise e a utilização de catalisadores seletivos). (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

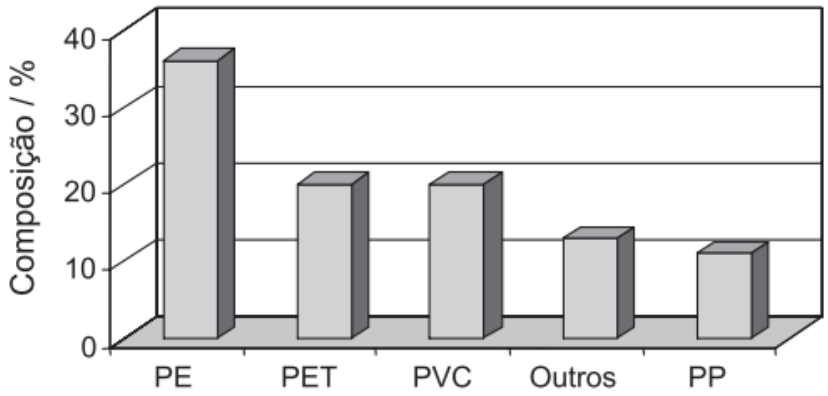
Os processos de despolimerização acima citados permitem a obtenção de monômeros de partida, que podem ser re-polimerizados, formando-se assim polímeros virgens (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

Reciclagem quaternária envolve o processo de incineração controlada em que objetiva-se a obtenção da energia proveniente dos resíduos poliméricos. Utilizando-se assim o polímero como uma fonte de combustível (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

Os tipos de reciclagem primária e secundária são também conhecidos como reciclagem mecânica ou física, sendo que a diferenciação se dá pelo tipo de material utilizado. A primária caracteriza-se pelo uso de polímero pós-industrial e a secundária envolve o processamento de material pós-consumo. A reciclagem terciária muitas das vezes também é chamada de química e a quaternária de reciclagem energética (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

Segundo Spinacé e Paoli (2005), através de estudos e levantamentos realizados nas grandes cidades brasileiras, percebeu-se que os polímeros que majoritariamente compõem os resíduos sólidos urbanos são os polietilenos, de alta e baixa densidade (PEAD e PEBD), o PET, o PVC e o PP conforme ilustrada na Figura 5, a seguir.

Figura 5 – Termoplásticos mais encontrados no resíduo sólido brasileiro.



Fonte: Spinacé e Paoli (2005)

Analisando os últimos lançamentos da indústria automotiva pode-se perceber a evolução dos materiais empregados pelo setor. Segundo Silva (2016), a partir da década de 70 houve um aumento significativo no uso de materiais mais leves como alumínio e dos plásticos neste segmento.

Atualmente é de suma importância que se pense na reciclagem dos materiais poliméricos devido ao fato destes materiais serem considerados grandes vilões ambientais. Estes tipos de materiais chegam a demorar séculos para se degradarem na natureza e ocupam grande parte do volume dos aterros sanitários, impactando negativamente nos processos de compostagem e estabilização biológica (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

O preço do material pós-consumo no mercado de reciclagem é afetado diretamente por questões tais como região, oferta, condições do material (limpo ou sujo), origem (usinas de coleta e triagem ou sucateiros) (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

Para que se reduza a quantidade de material descartada é apropriado se pensar na fabricação de componentes em polímero de grande vida útil, como em indústria automotiva e de construção civil. Outro fator importante a ser considerado é a questão da demanda por materiais destes segmentos, que pode viabilizar economicamente o reprocessamento, haja vista o volume de matéria-prima requerida para atender a capacidade produtiva.

É sabido que os materiais poliméricos reprocessados não apresentam as mesmas propriedades e características da matéria-prima virgem, motivo pelo qual os esforços têm sido direcionados no intuito de conseguir um produto acabado com as propriedades mecânicas mais semelhantes o possível do polímero virgem. Para adequar as propriedades do material reprocessado usa-se adicioná-lo ao material virgem. (FERNANDES; DOMINGUES, 2007).

Um dos casos que ilustra a dificuldade de se conciliar aplicação técnica, propriedades mecânicas com o uso de material reciclado na indústria é explicitado nos resultados dos testes de tração e impacto realizados com blendas compostas por PP virgem e reprocessado realizados por Fernandes e Domingues (2007). Nos testes realizados o aumento do percentual em massa de material reprocessado misturado à resina virgem, resultou no aumento do módulo de elasticidade do material, reduzindo-se assim sua flexibilidade. Neste caso, a aplicação final do produto foi diretamente afetada uma vez que, este estudo visava o aumento do percentual de reprocessado como matéria-prima para produção de para-choques veiculares e o módulo de elasticidade é requisito para absorção de impacto. Os resultados obtidos demonstraram uma fragilização do material com o aumento de resina reprocessada conforme mostrado abaixo nas Tabelas 2 e 3 a seguir.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas da blenda de PP virgem com PP reprocessado.

Corpo de prova	**σt(MPa)**	**σr(MPa)**	**εt(%)**	**εr(%)**
100% virgem	18,9 ± 0,1	16,5 ± 0,1	7,1 ± 1,0	400,9 ± 28,8
30% reciclado	20,5 ± 0,1	18,6 ± 0,1	7,5 ± 1,5	343,9 ± 33,4
50% reciclado	21,2 ± 0,1	15,1 ± 0,1	6,7 ± 1,0	80,9 ± 5,8
100% reciclado	22,6 ± 0,1	16,6 ± 0,2	5,1 ± 1,1	11,3 ± 3,9

Fonte: Fernandes e Domingues (2007)

Tabela 3 – Valores de resistência ao impacto de blenda de PP virgem com PP reprocessado.

Amostra	**Resistência ao impacto (kJ/m²)**
100% virgem	78,7
30% reciclado	55,1
50% reciclado	42,3
100% reciclado	19,7

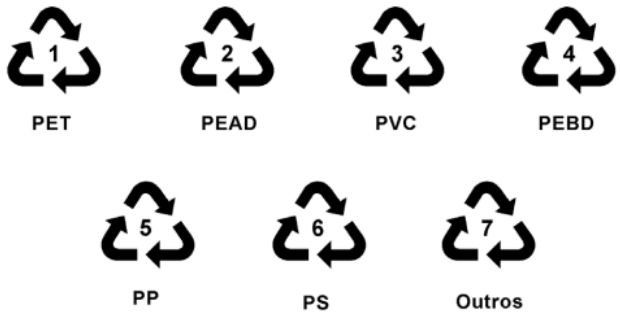
Fonte: Fernandes e Domingues (2007).

Além do controle das propriedades mecânicas para aplicações técnicas, outra dificuldade que se tem em se tratando do uso de polímeros pós-consumo é o controle da matéria prima e sua origem. Segundo Spinacé e Paoli (2005), um dos gargalos da reutilização de polímeros é a separação dos mais variados tipos de material coletados pela indústria de reciclagem.

Visando a correta destinação dos resíduos plásticos pós-consumo, grande parte dos produtos fabricados com esta classe de materiais apresenta um código de identificação que faz referência ao tipo de plástico com o qual o produto foi feito, auxiliando assim sua separação e posterior reciclagem. Este tipo de identificação contribui com a recuperação dos materiais descartados com o resíduo sólido urbano (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

Segundo Coultro, Gasparino e Queiroz (2008), o código de identificação do tipo de resina empregado geralmente se apresenta como um número que varia de 1 a 7 dentro de um triângulo de três setas, Figura 6, e sob o mesmo pode haver uma abreviatura, cujo objetivo é informar o tipo de plástico do qual o produto foi fabricado. Este sistema de identificação por códigos é de grande importância haja vista que ele impulsiona o controle de qualidade na linha de separação de materiais nos recicladores, assegurando desta forma que o plástico reciclado seja o mais homogêneo possível.

Figura 6 – Simbologia utilizada para identificação de embalagens poliméricas segundo norma NBR13230 da ABNT.



Fonte: Spinacé e Paoli (2005)

Por si só a indicação do símbolo de identificação do polímero no componente ou embalagem não assegura que a mesma é adequada para a reciclagem, mas sem dúvida nenhuma, facilita o processo de separação e seu reprocessamento ou, pelo menos, permite que este não venha a comprometer a qualidade de outras cadeias de reciclagem (COLTRO; GASPARINO; QUEIROZ, 2008).

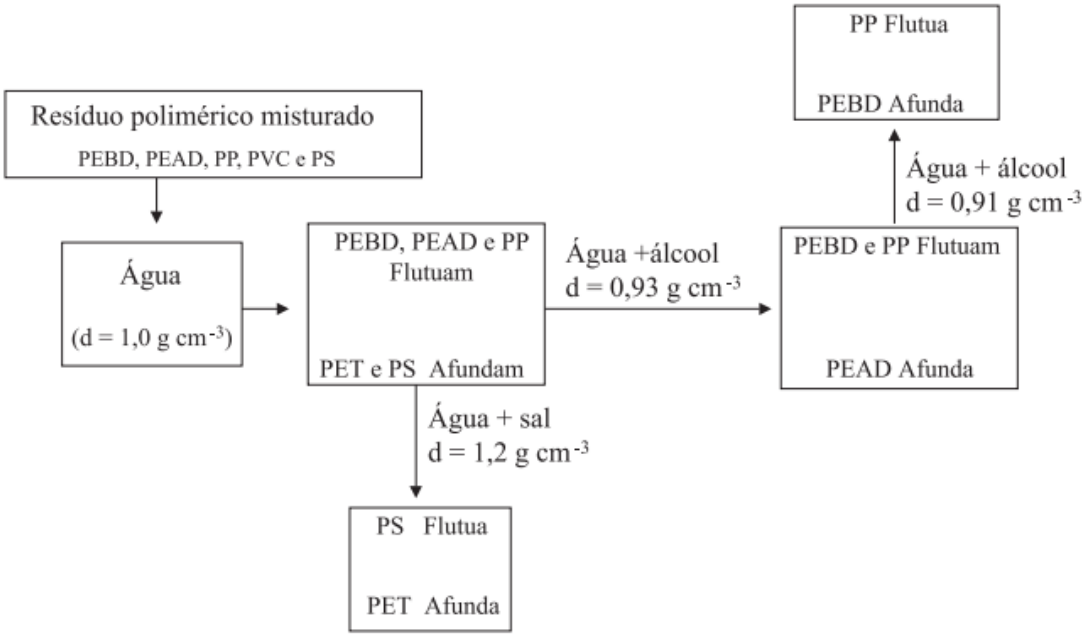
Ademais, as resinas virgens são fabricadas com propriedades específicas de acordo com os requisitos requeridos pela aplicação. Já o mercado de material reciclado está sujeito a modificações nas propriedades que ocorrem entre as variações de uma mesma resina que estão misturados no resíduo sólido urbano (COLTRO; GASPARINO; QUEIROZ, 2008).

No mercado brasileiro a cadeia de reciclagem de polímeros é caracterizada por indústrias de pequeno porte, sendo feita a coleta e seleção em sua maioria de modo manual devido ao baixo custo de mão-de-obra (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

No caso a separação automatizada, o processo de separação dos materiais poliméricos se dá por densidade em tanques de flotação ou por hidrociclones, conforme Figura 7. Neste método os polímeros de maior densidade afundam e os de menor flutuam. Para separar polímeros de densidade próxima são utilizadas misturas de água com álcool e água com sal

para fazer a segregação dos mesmos. Os materiais metálicos presentes, neste processo são separados por separação magnética.

Figura 7 – Esquema de separação de polímeros por densidade.



Fonte: Spinacé e Paoli (2005)

Segundo Spinacé e Paoli (2005), além dos métodos de separação de polímeros acima, pode-se também utilizar a espectroscopia Raman associada à análise multivariada.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Em visita às indústrias de processamento de polímeros reciclados, na região metropolitana de Belo Horizonte, percebeu-se que não há controle da origem e das propriedades dos materiais fornecidos as fabricas de componentes plásticos. Esta prática muitas vezes dificulta, quando não inviabiliza a inserção destes materiais como matéria-prima para a indústria de polímeros. Tendo em vista esta falta de informações sobre o material reciclado fornecido pelas empresas de reciclagem, iniciou-se este trabalho analisando as propriedades de fluidez das amostras dos materiais que a empresa forneceu como possíveis alternativas ao atual pellet reciclado utilizado atualmente em seu processo.

Para encontrar um material alternativo ao atual utilizado pela fabricante de tubos corrugados, utilizou-se materiais provenientes da indústria automotiva tais como PEAD aplicado a tanque de combustível descartado após o fim da sua vida útil em um carro sucateado, PEAD de tubos de drenagem, dutos para cabeamento elétrico, tapetes de banheiro plásticos aplicados em vestiários e de uso em embalagens domésticas. Esta medida visa alcançar a sustentabilidade na indústria de polímeros associada a uma redução de custo de produção.

As amostras de sucata foram o foco deste estudo uma vez que o fornecedor de pellets reciclados sinalizou que são materiais que o mercado de reciclagem tem dificuldades de comercialização. Sendo assim estes materiais possuem maior probabilidade de serem destinados a aterros e lixões se tornando um passivo ambiental, além de terem um potencial de redução de custo de matéria-prima devido a baixa demanda no mercado de reciclagem.

Os materiais ensaiados como alternativas ao atual Pellet de PEAD reciclado comprado pela empresa parceira foram:

- Tapete de vestiário / banheiro, Figura 8;
- Embalagens domésticas, Figura 9;
- Tanque de combustível, Figura 10;

- Tubo corrugado Empresa A;
- Tubo corrugado Empresa B;
- Tubo elétrico 1 pol;
- Tubo elétrico 3 pol;
- Pellet de PEAD reciclado;

Figura 8 – Sucata de PEAD de tapete de vestiário/banheiro.

Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 9 - Sucata de PEAD de embalagens domésticas.

Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 10 - Sucata de tanque de combustível.

Fonte: Próprio autor (2019)

A fim de facilitar o estudo, as amostras analisadas de cada material foram citadas por meio da legenda conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Lista de siglas para as amostras analisadas.

Material	Legenda
Tapete de vestiário / banheiro	TB
Embalagens domésticas	ED
Tanque de combustível	TC
Tubo corrugado Empresa A	TEA
Tubo corrugado Empresa B	TEB
Tubo elétrico 1 pol	TE1
Tubo elétrico 3 pol	TE3
Pellet de PEAD reciclado	PR

Fonte: Próprio autor (2019)

4.1.1 Preparação das amostras

As peças foram cortas e trituradas em moinhos de facas, Figura 11, a fim de possibilitar que sejam reprocessadas para avaliação de suas propriedades.

Na parte inferior do moinho de facas há uma peneira a qual controla o tamanho do material processado, a Figura 11 mostra como o polímero ficou após a moagem. Inicialmente analisou-se o índice de fluidez de cada amostra. Esta propriedade é de fundamental importância para o processamento desta matéria-prima. Após serem trituradas no moinho de facas, o material apresentou o aspecto conforme Figura 12.

Figura 11 – Moinho de facas

Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 12 – Amostra moída pelo moinho de facas

Fonte: Próprio autor (2019)

4.1.2 Formulação das blendas

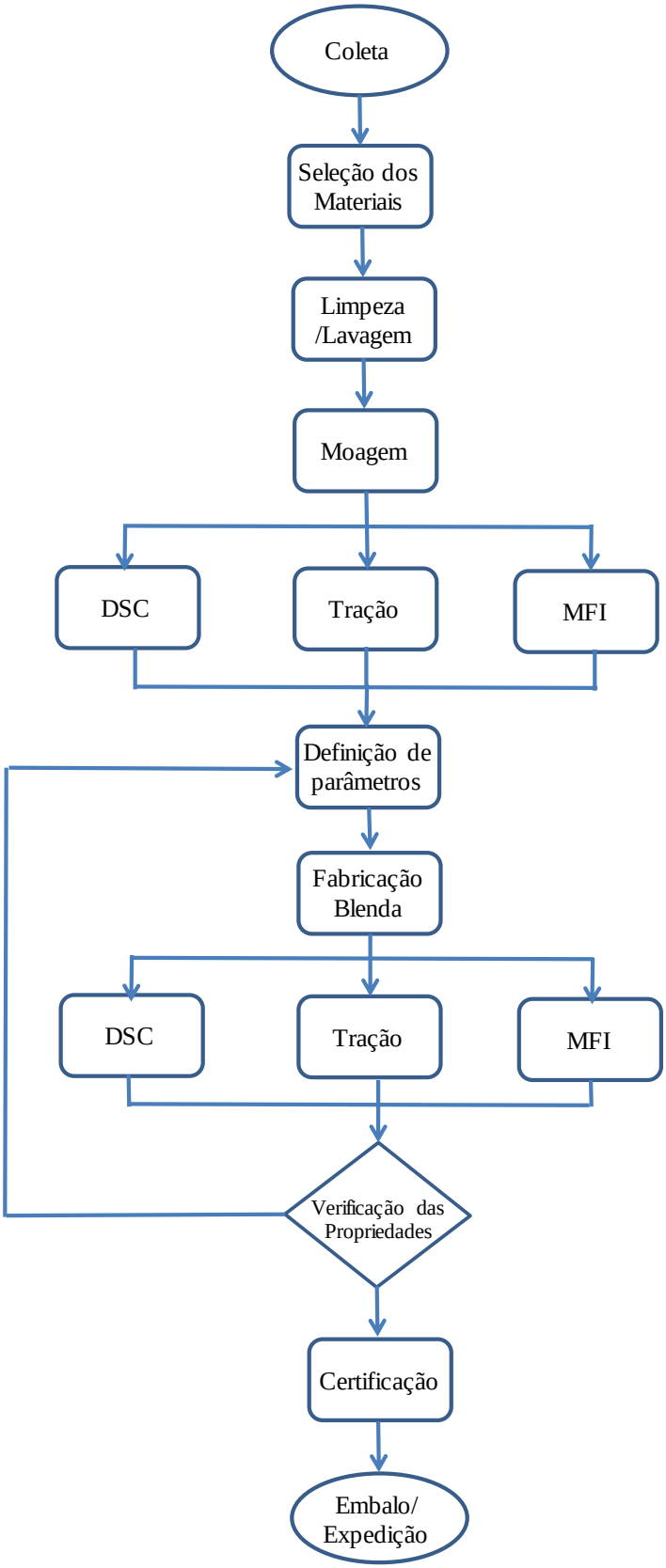
Após realizada a análise do índice de fluidez de cada amostra, as mesmas foram misturadas para formação de blendas e novamente o índice de fluidez foi analisado com o objetivo de verificar qual a proporção da mistura de cada material se aproxima do índice de fluidez do atual material fornecido em pellets comprado e processado pela empresa A.

As amostras de material granulado tiveram seu índice de fluidez medido experimentalmente e as amostras foram conformadas de acordo com as dimensões dos corpos de prova segundo norma de testes. Foram fabricadas blendas com os materiais das amostras cedidas pela empresa parceira, com diferentes teores de material misturados.

Para a formulação de blendas de sucata polimérica é importante iniciar o trabalho com a limpeza e a caracterização do material e o levantamento de suas propriedades das resinas puras. Posteriormente deve-se produzir blendas de diferentes proporções e analisar o efeito na variação de suas propriedades.

No presente estudo foram produzidas blendas nas proporções mássicas de 25%, 50% e 75%. Posteriormente foram analisadas as propriedades de fluidez e as propriedades mecânicas das blendas e das resinas puras. Este procedimento visa obter uma aproximação polinomial para predizer as propriedades e controlar as propriedades finais desejadas. O procedimento para formulação e produção de blendas está ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma do processo para produção de blendas recicladas.



Fonte: Próprio autor (2019)

4.2 Métodos

4.2.1 Índice de fluidez

O conhecimento do índice de fluidez dos polímeros é de suma importância para conhecimento das características de processamento do material. Para isto, em cada amostra fornecida foi realizado o ensaio de índice de fluidez, Melt Flow Index (MFI), segundo norma ASTM D1238-13. Este ensaio consiste em medir a resistência do material ao escoamento. O material é aquecido a uma determinada temperatura e escoa pelo equipamento pressionado por uma carga, na parte inferior do equipamento as amostras obtidas são cortadas em tempos padronizados e pesadas. Por meio de uma equação matemática (Equação 1) a resistência ao escoamento do material é determinada com relação ao peso das amostras e ao tempo de escoamento.

$$\text{MFI} = \text{Peso da amostra (g)} \times 10 / \text{Tempo de corte (min.)} \qquad (1)$$

Para realização do ensaio de MFI, foi utilizado o equipamento Dynisco Polymer Test, conforme Figura 13. Este teste foi realizado com cargas de 2,06 e 6,96 kg, com temperaturas e tempos que variaram de 190° e 210° e tempos variáveis de acordo com a resistência do material testado em escoar pelo equipamento.

Figura 14 – Equipamento medição índice de fluidez de polímeros

Fonte: Próprio autor (2019)

Durante a realização dos testes de fluidez, verificou-se que alguns materiais apresentaram uma resistência a fluidez muito maior do que outros. Para avaliar esta variação e o efeito da carga e temperatura nesta propriedade, diversas amostras foram ensaiadas em duas condições, 190ºC e 2,06kg de carga e 210°C e carga de 6,96kg. Isto foi feito para adequar todas as análises ao mesmo parâmetro de ensaio tendo-se assim uma base comparativa onde todos os materiais estudados tenham sido submetidos às mesmas condições.

A realização dos ensaios nas condições acima foi devida a grande divergência de propriedades de materiais analisados como no caso do tapete de banheiro/vestiário que era um material de grande fluidez, dificultando sua medição devido a sua velocidade de escoamento alta e ocasionando desabastecimento do equipamento. Já no caso do material de tanque de combustível, a alta resistência ao escoamento demandou grandes tempos para extração de amostras e em muitos casos estas amostras apresentavam massas de valores muito baixos.

De início, por se objetivar fazer os testes em uma configuração fora dos padrões de carga e temperatura indicados pela norma ASTM D1238-13, para se ter uma base de dados própria e buscar proteger os resultados uma vez que este trabalho tem o intuito de se tornar uma consultoria em polímeros para a indústria certificando as propriedades das amostras e fornecendo para empresas quer usam material reciclado. Porém percebeu-se que, para se conseguir um comparativo entre os resultados experimentais e os valores de referência de materiais comercialmente utilizados, definiu-se utilizar uma adaptação da norma padronizando a realização dos ensaios com temperatura de 190°C e carga de 2,06kg com tempos de corte das amostras variando para cada material devido as características próprias de cada um deles.

4.2 Calorimetria diferencial exploratória

Como os materiais analisados são provenientes da indústria de reciclagem pós consumo onde estes são selecionados manualmente por catadores de resíduos, é possível que haja contaminação por seleção

inadequada. Além disso, alguns dos materiais podem ter sido submetidos a reprocessamentos anteriores e contaminados com outro tipo de polímero. Para certificar-se de que todos os materiais são PEAD, e que não houve contaminação ou separação incorreta, foi realizada uma caracterização das amostras por meio de aquecimento e resfriamento no ensaio de calorimetria diferencial exploratória, *differential scanning calorimeter* (DSC). Para este teste, utilizou-se o equipamento do fabricante Shimadzu, modelo DSC-60.

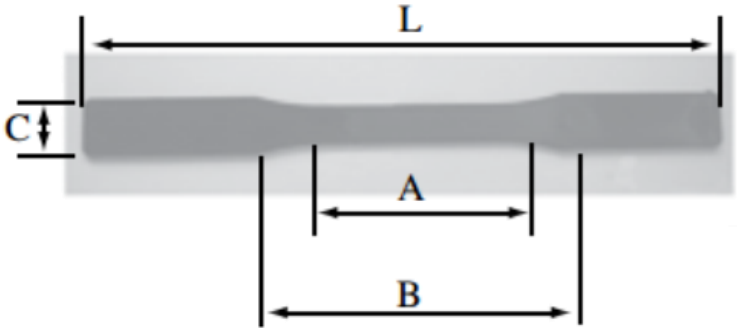
As amostras analisadas pesavam aproximadamente 5,0mg, e para realização de teste utilizou-se o gás nitrogênio com vazão de 50ml/min com variação de temperatura de 10°C/min.

4.3 Ensaio de tração

Após a realização da mistura de diferentes materiais de índice de fluidez conhecidos, foi realizado ensaio de tração para verificar o efeito da composição sobre as propriedades mecânicas das amostras.

Os corpos de prova para este ensaio, Figura 15, foram confeccionados de acordo com a norma ASTM D638-14 que foram submetidos a ensaios de tração objetivando, assim, caracterizar a variação das propriedades mecânicas de cada amostra com a relação de proporção de material pós-consumo utilizado.

Figura 15 – Corpo de prova para o ensaio de tração.
Dimensões: L = 114mm, A = 41,70mm, C = 19,40mm e espessura = 3mm

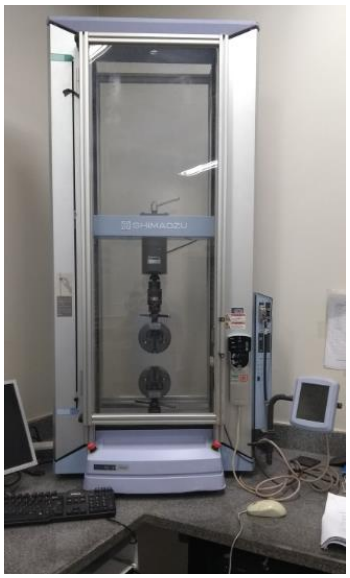


Fonte: Próprio autor (2019)

O ensaio de tração consiste em submeter uma amostra do material a ser analisado (corpo de prova) a um esforço longitudinal. Neste ensaio as extremidades desta amostra são fixadas às garras do equipamento de medição e submetidas ao carregamento. A partir das medidas de cargas e os respectivos alongamentos, constrói-se a curva tensão-deformação, a qual mostra essa relação para diferentes tipos de materiais.

Para realização deste ensaio, foi utilizado o equipamento de tração, Figura 16, disponível no laboratório de polímeros do CEFET-MG da marca Autograph, modelo AG-X com carga de até 10 kN e deslocamento de 10 mm/min.

Figura 16 – Equipamento ensaio de tração AG-X



Fonte: Próprio autor (2019)

Para fabricação dos corpos de prova para o ensaio de tração utilizou-se uma prensa hidráulica SL11 Solab, Figura 17, disponível no laboratório de polímeros do CEFET-MG que posteriormente foram cortadas nas dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração. Para fabricação das placas, Figura 18, utilizou-se 40g de cada material. As amostras foram submetidas a ciclos de carga e temperatura. A temperatura utilizada foi de 210°C, com ciclo de carga alternados de 8 e 4 toneladas por 5 minutos, sendo 2 ciclos repetidos para cada carga. Posteriormente o equipamento foi desligado, as chapas com material

prensado ficaram por mais 30 minutos em contato com as lâminas aquecidas do equipamento e pressão de 4 toneladas e posteriormente foram resfriadas ao ar. Este procedimento de alteração de carga visa garantir a uniformidade e o escoamento do material entre as placas homogeneizando-o.

Figura 17 – Prensa hidráulica SL11 Solab.

Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 18 – Placas produzidas na prensa hidráulica SL11 Solab.

Fonte: Próprio autor (2019)

4.5 Extrusão das amostras

Para garantir a homogeneidade da mistura dos materiais para produção das blendas, os materiais formam submetidos ao processo de extrusão. Nesta

etapa as amostras foram processadas a 180°C, com velocidade de rosa de 20 m/min e pressão de 5.8 bar. O equipamento utilizado foi o RHEOMEX 19/25 Extruder, Figura 19, disponível no laboratório de polímeros do Campus VI do CEFET-MG.

Figura 19 – Equipamento extrusão Rheomex.

Fonte: Próprio autor (2019)

4.6 Tratamento dos dados

Para tratamento estatístico e análise dos dados obtidos experimentalmente, os valores das replicatas foram processados em gráficos boxplot (quartil 1 - 1,5*distância interquartílica e quartil 3 + 1,5*distância interquartílica) para avaliar a presença de valores discrepantes (outliers).

5. RESULTADOS

5.1 Índice de fluidez

Iniciou-se a análise pela medição do índice de fluidez (MFI) dos materiais das amostras fornecidas. Segundo o fornecedor de sucata plástica, todos os materiais fornecidos são PEAD.

Para este ensaio, foi adotado que tempo de corte das amostras varia para cada material de acordo com seu comportamento durante o ensaio. Materiais que escoaram rapidamente tiveram um tempo de corte menor, visando evitar o desabastecimento do equipamento de teste. Por outro lado, aqueles materiais que apresentaram maior resistência ao escoamento no equipamento o tempo de corte das amostras foi maior.

Quando submetidas ao ensaio de MFI, os resultados apresentados indicaram grande variação em suas propriedades de fluidez, Tabela 5, o que evidencia que todos os materiais analisados apresentam propriedades muito diferentes. Essa variação nas propriedades da matéria-prima reciclada se mostra como um gargalo ao processamento da sucata polimérica, pois para cada um destes materiais haveria necessidade de recalibrar os parâmetros de processo como velocidade de rosca e temperatura de processamento, o que implicaria em grande geração de refugo, horas de máquina e homem hora perdidos na produção, além do que não seria possível obter o controle de suas propriedades para aplicações que exigem requisitos técnicos. O material virgem neste ponto apesar de ser mais caro, apresenta essa vantagem de controle de processo e de propriedades do produto final uma vez que a caracterização deste material é fornecida pelo fabricante, Braskem.

Tabela 5 – Índices de fluidez das amostras.

Amostra	MFI (g/10 min)	Custo (R$/kg)
TC	0,023	R$1,30
TE3	0,048	R$1,00
PR	0,291	R$3,50
TEB	0,317	-
ED	0,326	R$1,30
TEA	0,330	-
TE1	0,802	R$1,00
TB	2,534	R$1,00

Fonte: Próprio autor (2019)

Os dados acima foram obtidos com testes realizados com temperatura de 190ºC e carga de 2.06kg. Todas as amostras foram submetidas às mesmas condições para obtenção de base comparativa.

Foram medidas as propriedades das diversas amostras de materiais fornecidas como alternativas de matéria-prima a serem empregadas no processo de produção de tubos corrugados pela empresa A. Analisando a Tabela 5, pode-se perceber uma variação no MFI do pellet reciclado e no valor do MFI do tubo produzido pela Empresa A. Estes valores deveriam ser coincidentes, uma vez que os tubos da empresa A são produzidos com o pellet reciclado. Porém esta variação na medição observada pode ser atribuída a diversos fatores tais como uma possível degradação do material pela temperatura de processamento.

Segundo Araújo, Martins e Scienza (2016) após sucessivos reprocessamentos as propriedades reológicas do PEAD em baixas taxas de cisalhamento apresentaram mudanças significativas em sua viscosidade quando a temperatura de processamento é aumentada e quando se emprega vários ciclos de reprocessamento.

Observada em loco acima de 210°C, ou por fatores de controle de processo e matéria-prima como uso de pellets reciclado com adição de sucata

de tubos não conformes produzido, uma vez que estes são triturados e misturados aos pellets reciclados e reprocessados.

Com as amostras de materiais fornecidas o procedimento de medição do índice de fluidez foi realizado e parte dos dados dos materiais analisados e que as medições apontaram resultados mais próximos do tubo corrugado produzido pela Empresa A estão nas Tabelas 6 a 9.

Dentre os materiais houve grande divergência nos valores de fluidez como no caso da amostra de tapete de banheiro e do tanque de combustível. Porém alguns materiais apresentaram medições muito próximas como no caso do material comprado do fornecedor atual da empresa, em pellets, do tubo produzido pela própria empresa A, do tubo produzido pela empresa B e da sucata de embalagens domésticas.

Tabela 6 – Dados ensaio amostra PEAD PR.

Amostra PEAD PR		
N	Pesos amostras máquina (g)	MFI (g/10min)
1	0,0571	0,2855
2	0,0585	0,2925
3	0,0581	0,2905
4	0,0583	0,2915
5	0,0589	0,2945
6	0,0554	0,2770
7	0,0602	0,3010
8	0,0593	0,2965
	Média	0,2911
	Erro %	8,664
	Maior valor	0,3010
	Menor valor	0,2770
	Medições eliminadas	
9	0,0547	0,2735

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 7 – Dados ensaio amostra PEAD TEA.

Amostra PEAD TEA		
N	Pesos amostras máquina (g)	MFI (g/10min)
1	0,063	0,315
2	0,067	0,335
3	0,0642	0,321
4	0,0663	0,332
5	0,0685	0,343
6	0,0656	0,328
7	0,0671	0,336
9	0,0667	0,334
	Média	0,330
	Erro %	8,730
	Maior valor	0,343
	Menor valor	0,315
	Medições Eliminadas	
8	0,0698	0,349

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 8 – Dados ensaio amostra PEAD TEB.

Amostra PEAD TEB		
N	Pesos amostras máquina (g)	MFI (g/10min)
1	0,0621	0,311
2	0,0636	0,318
3	0,0633	0,317
4	0,0629	0,315
5	0,0639	0,320
6	0,0624	0,312
7	0,065	0,325
8	0,0634	0,317
9	0,063	0,315
10	0,0637	0,319
	Média	0,317
	Erro %	4,670
	Maior valor	0,325
	Menor valor	0,311

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 9 – Dados ensaio com PEAD ED**.**

Amostra PEAD ED		
N	Pesos amostras máquina (g)	MFI (g/10min)
1	0,0685	0,3325
3	0,0661	0,3209
4	0,0653	0,3170
5	0,0668	0,3243
6	0,0688	0,3340
	Média	0,3257
	Erro %	5,360
	Maior valor	0,3340
	Menor valor	0,3170
	Medições Eliminadas	
2	0,0604	0,2932

Fonte: Próprio autor (2019)

Para análise dos valores obtidos pelo teste de índice de fluidez, deve-se obter pelo menos 5 amostras para medição sendo que a variação encontrada nos dados deve ser menor que 10% para que o resultado seja confiável. No caso dos testes realizados foram obtidas diversas amostras, todas com o mesmo procedimento afim de evitar que houvesse grandes variações que impactassem na medição, sendo que os dados obtidos com valores mais divergentes da média foram eliminados. Esta ação foi tomada uma vez que o sistema de corte automático do equipamento do CEFET-MG encontra-se inoperante, diante disto o corte foi realizado manualmente com tempo cronometrado. Assim pode-se eliminar alguma variação que viesse a ocorrer durante a realização do procedimento.

A partir dos dados apresentados nas Tabelas 6 a 9, pode-se perceber que o PEAD de embalagens domésticas apresentou propriedades de fluidez próximas com as do tubo produzido e da atual matéria prima utilizada pela empresa A. Sendo assim, verificou-se a necessidade de avaliar as propriedades mecânicas destes materiais para verificar viabilidade técnica do seu uso como matéria-prima.

5.1.3 Efeito dos parâmetros de processamento na fluidez do material

A viscosidade das resinas, dentre as propriedades reológicas, é um dos parâmetros mais utilizados na análise do comportamento dos materiais poliméricos durante o processamento.

De acordo com os parâmetros de processamento cada material apresenta um determinado comportamento. Isto pode ser evidenciado no caso da amostra de tubo de 1 polegada processada a 210ºC e com carga de 2,06kg, Figura 19, identificada como amostra A, e a amostra obtida do mesmo material submetido ao ensaio a 210ºC e carga de 6,96 kg, identificado na Figura 19 como amostra B.

Conforme a Figura 20, comparando as amostras na imagem a seguir fica evidente que o material identificado como B, submetido ao ensaio a 210ºC e carga de 6.96 kg, apresenta aspecto mais uniforme, liso e aumento de volume em relação a primeira.

Figura 20 – Amostras sucata PEAD ensaiada a diferentes parâmetros.

Fonte: Próprio autor (2019)

Segundo Araujo, Martins e Scienza (2016), “o conhecimento do comportamento da viscosidade em função da temperatura auxilia na compreensão do mecanismo do processo de fluxo”. A relação viscosidade x temperatura é determinante para a escolha das condições de processamento.

5.2 Caracterização das amostras

5.2.1 Calorimetria Diferencial de Varredura

Segundo o catálogo da Braskem (2015), produtora de polímeros, há uma grande variedade de PEAD's com diferentes propriedades e características de processamento. Tendo em vista que na indústria de reciclagem de polímeros pós consumo os materiais coletados são misturados e separados manualmente por catadores.

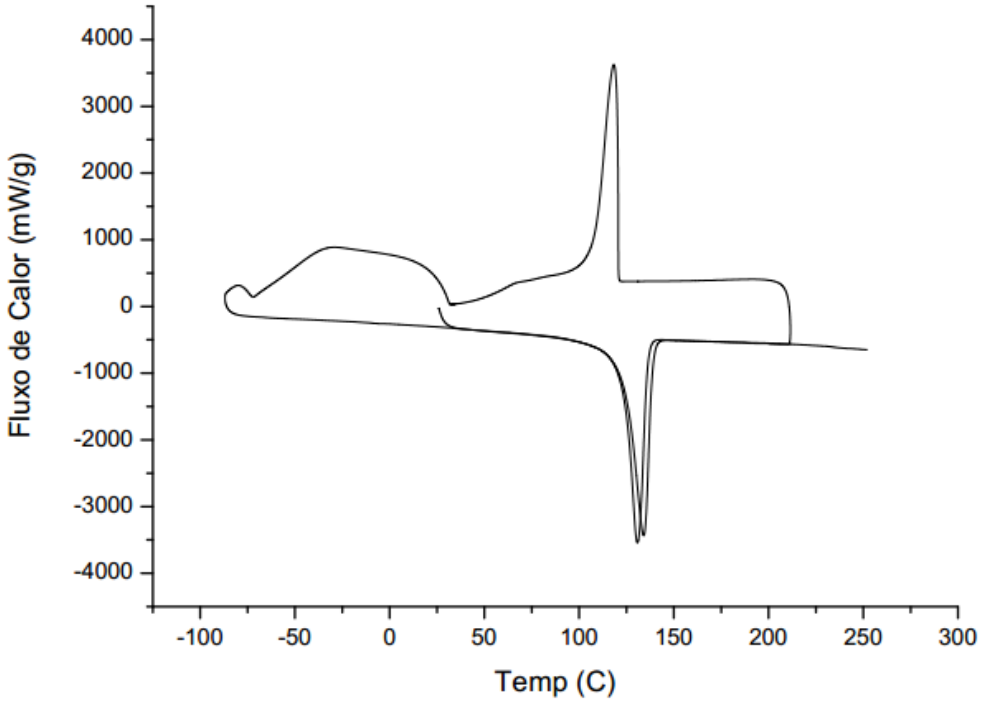
Segundo Coultro, Gasparino e Queiroz (2008, p. 119):

> Em alguns casos até 40% das embalagens apresentaram a identificação do material de forma incorreta. Portanto, ainda existe informação errônea no mercado brasileiro sobre o tipo de material da embalagem plástica (incluindo ausência do símbolo de identificação).

Diante disto, foi levantada a possibilidade de haver entre as amostras algum material que não fosse PEAD ou fosse uma blenda de PEAD com outro tipo de polímero.

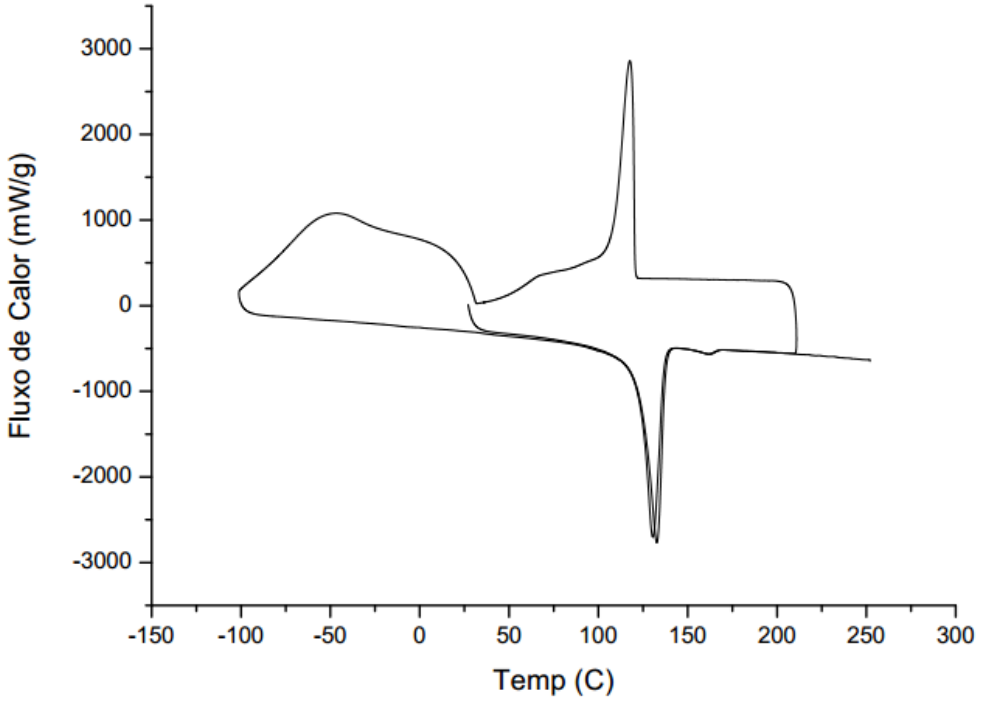
Para certificar-se da uniformidade dos materiais analisados todas as amostras tiveram suas propriedades térmicas obtidas por um ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) conforme resultados expressos a seguir a partir da Figura 21 a Figura 28.

Figura 21 – DSC Amostras de ED.



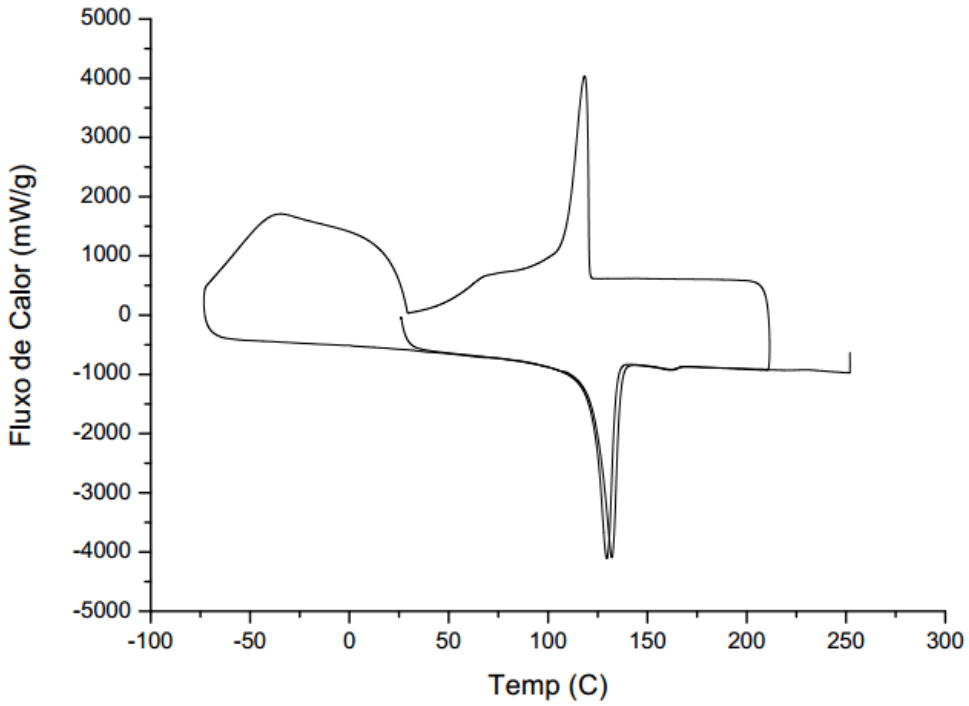
Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 22 – DSC Amostras de PR.



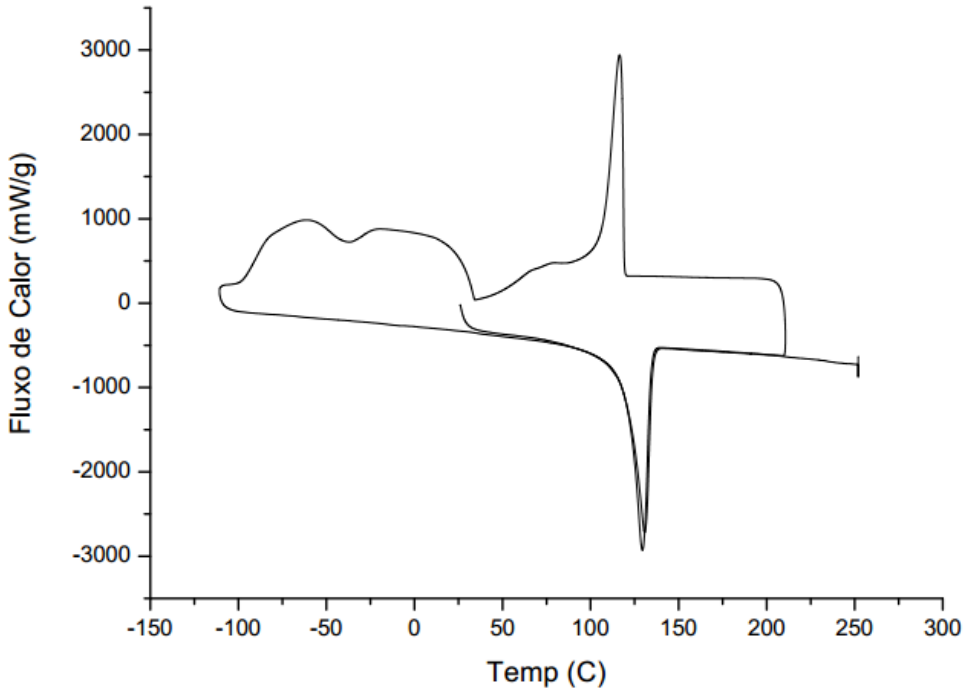
Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 23 – DSC Amostras de TC.



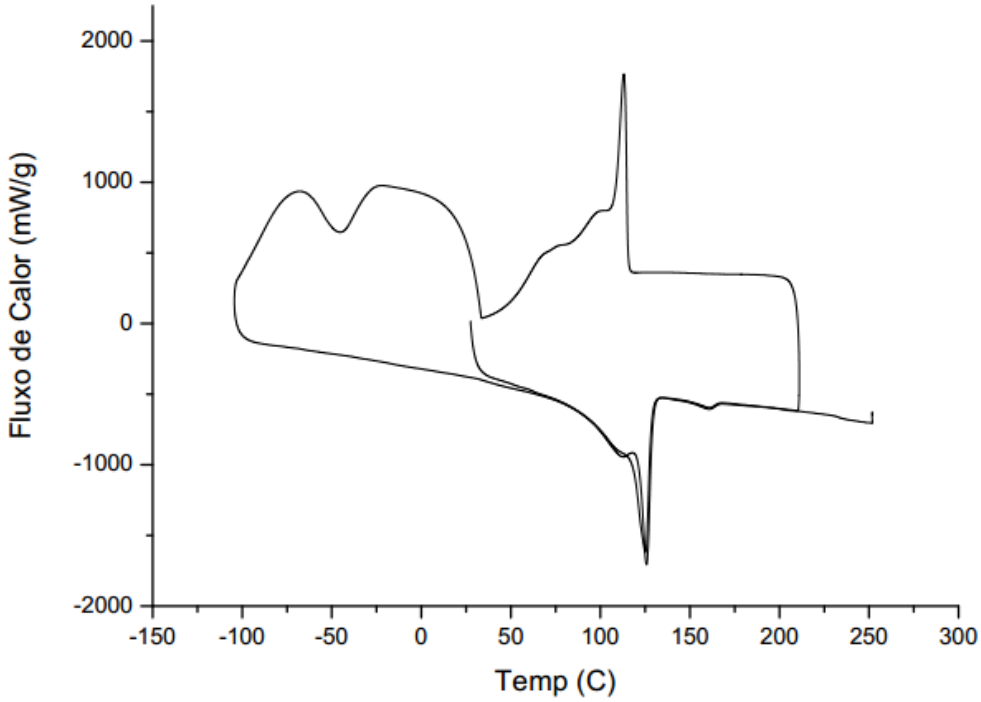
Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 24 – DSC Amostras de TB.



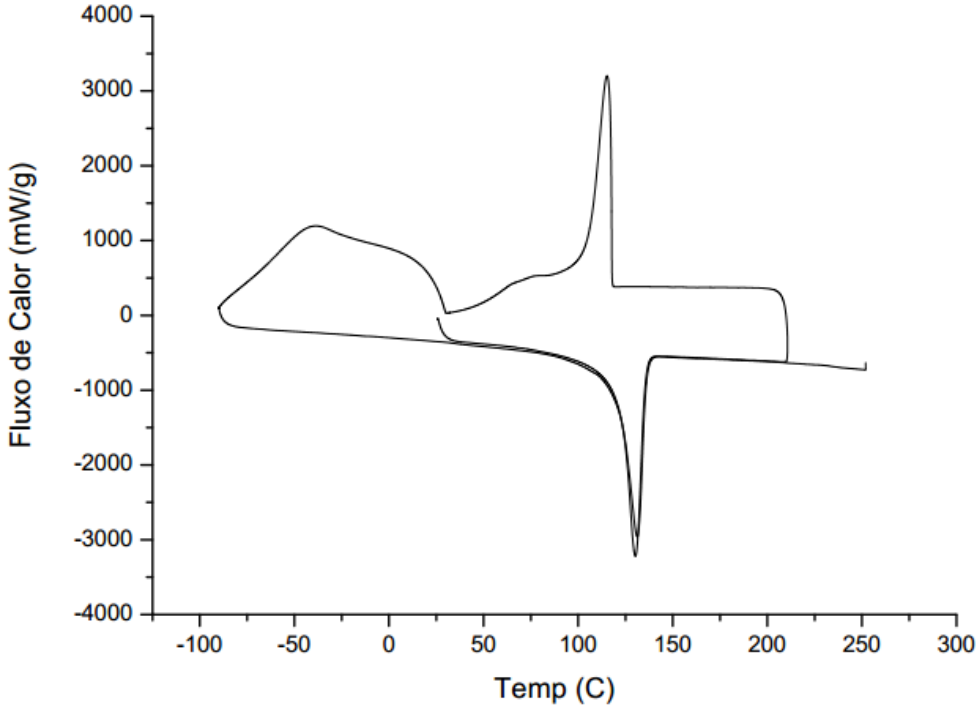
Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 25 – DSC Amostras de TE.



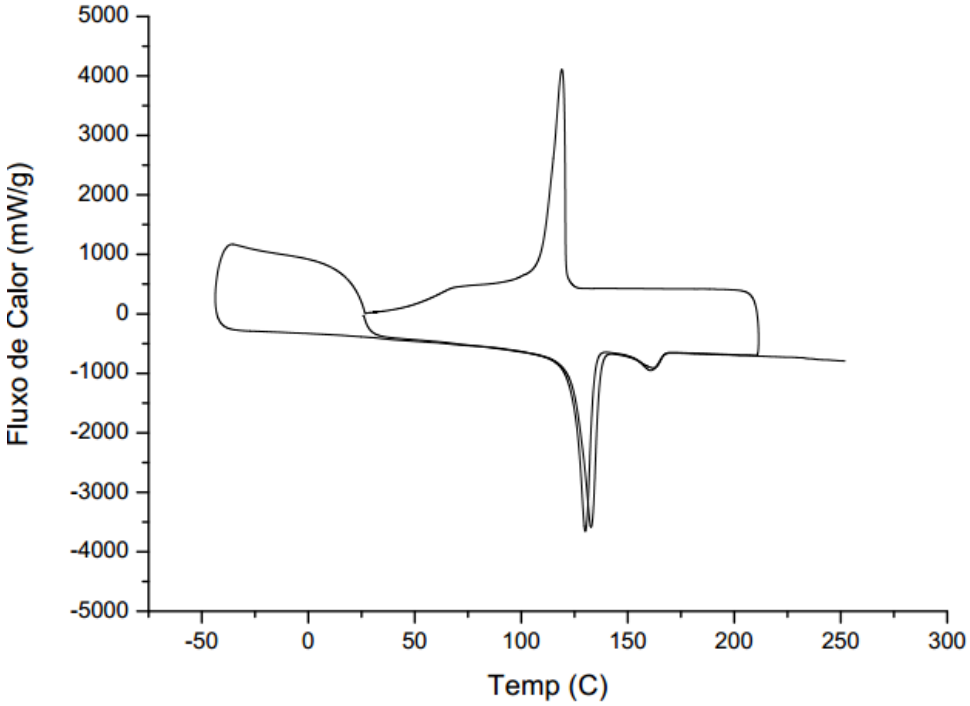
Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 26 – DSC Amostras de TE3.



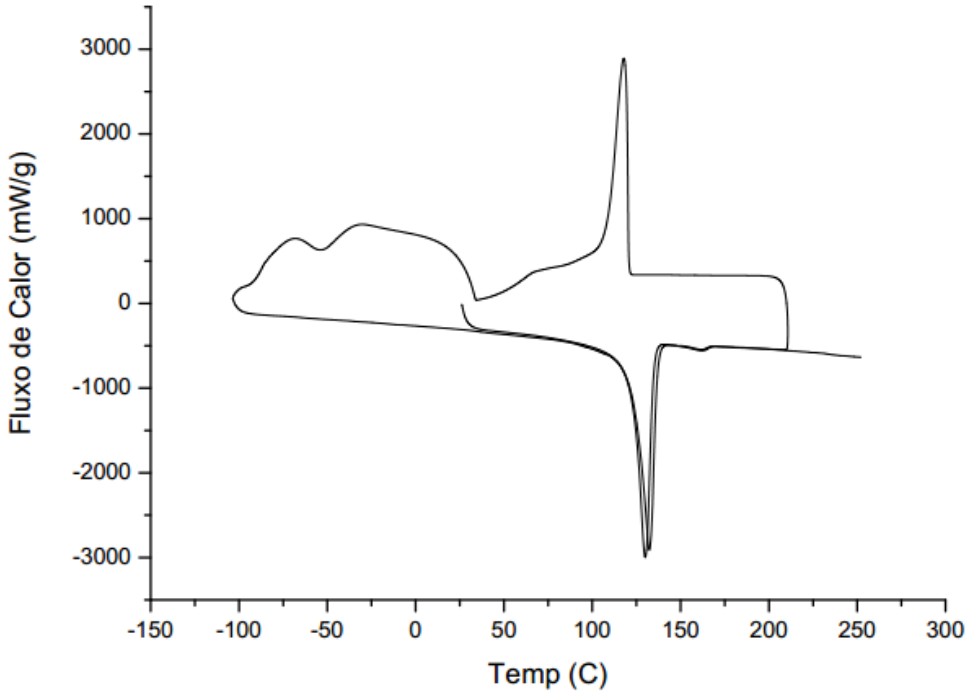
Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 27 – DSC Amostras de TEB.



Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 28 – DSC Amostras de TEA.

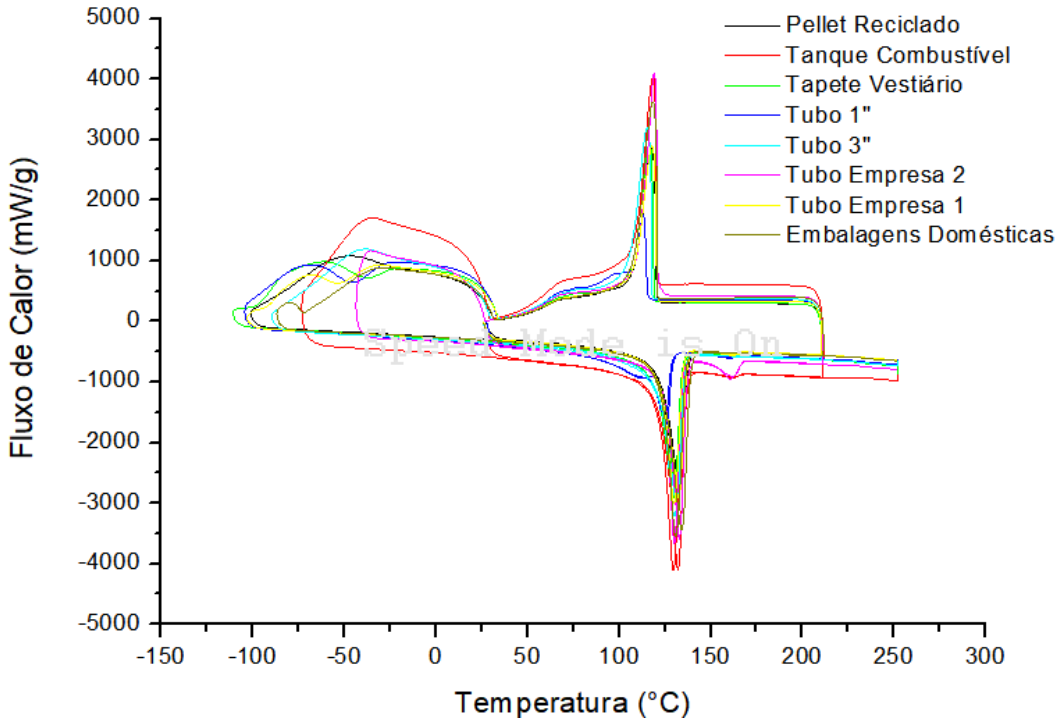


Fonte: Próprio autor (2019)

A partir da análise dos gráficos dos ensaios de DSC realizados nas amostras puras, percebe-se que as amostras dos materiais analisados não são resinas poliméricas com contaminação ou não se tratam de blendas de polímeros diferentes misturadas ao PEAD uma vez que apresentam apenas um pico endotérmico e um pico exotérmico. Caso estes materiais já tivessem sido misturados, ou houvesse contaminação com outros polímeros, nos gráficos acima seriam evidentes dois ou mais destes picos uma vez que estas temperaturas de transformação são características próprias de cada variedade de polímero.

Comparando-se os gráficos de DSC de todas as amostras analisadas, sobrepôs-se todos os resultados (Figura 21 a Figura 28) e plotou-se o gráfico representado pela Figura 29.

Figura 29 – Resumo comparativo ensaio DCS.



Fonte: Próprio autor (2019)

A partir da Figura 29, evidencia-se que todos os materiais ensaiados apresentaram picos endotérmicos e exotérmicos nos gráficos evidenciando que

a temperatura de fusão dos mesmos está próxima de 125ºC para fusão e temperatura de cristalização próxima de 115°C. Este comportamento analisado está coerente com os resultados apresentados de DSC, de Araújo (2016), onde há um estudo das propriedades de PEAD e degradação por múltiplos reprocessamentos.

5.3 Análise das blendas

A partir dos dados obtidos por meio do teste de MFI e levando-se em conta os custos dos materiais, buscou-se elaborar uma blenda com os materiais disponíveis para que se obtivesse um MFI próximo da atual matéria-prima empregada na fábrica Empresa A. Para isso elaborou-se duas blendas de PEAD. A primeira mistura de tubos de 1” e tubos de 3” (TE1 e TE3), pelo fato destes materiais apresentarem um custo e um sinalizarem uma potencial redução de custo. A segunda blenda formada foi feita com os seguintes materiais, tanque de combustível veicular e tapete de banheiro (TC e TB).

Para ambos os casos as proporções em massa dos materiais foram calculadas a fim de se obter o MFI de 0,28g/10 min como encontrado na atual matéria-prima empregada pela Empresa A que é o pellet reciclado (PR) considerando-se que o comportamento final das blendas fosse uma função linear em relação a proporção mássica.

Para se obter este MFI acima descrito as misturas foram realizadas nas seguintes proporções e os resultados se encontram conforme Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – MFI Blenda TB e TC.

Blenda TB 6,6%+ TC 93,4%

N	Pesos amostras máquina (g)	MFI (g/10min)
1		
2	0,0465	0,0930
3	0,0469	0,0938
4	0,0457	0,0914
5	0,0449	0,0898
6	0,0468	0,0936
7	0,0453	0,0906
8	0,0456	0,0912
	Media	0,092
	Erro %	4,45
	Maior valor	0,0938
	Menor valor	0,0898
	Medições Eliminadas	
1	0.0509	0.1018

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 11 – MFI TE1 e TE3.

Blenda TE1 36%+TE3 64%

N	Pesos amostras máquina (g)	MFI (g/10min)
1	0,0441	0,1470
2		
3	0,0453	0,1510
4	0,0474	0,1580
5	0,0443	0,1477
6	0,0452	0,1507
7	0,0459	0,1530
8	0,0449	0,1497
9	0,0441	0,1470
10	0,0463	0,1543
	Media	0,151
	Erro %	7,5
	Maior valor	0,1580
	Menor valor	0,1470
	Medições Eliminadas	
2	0,0415	0,1383

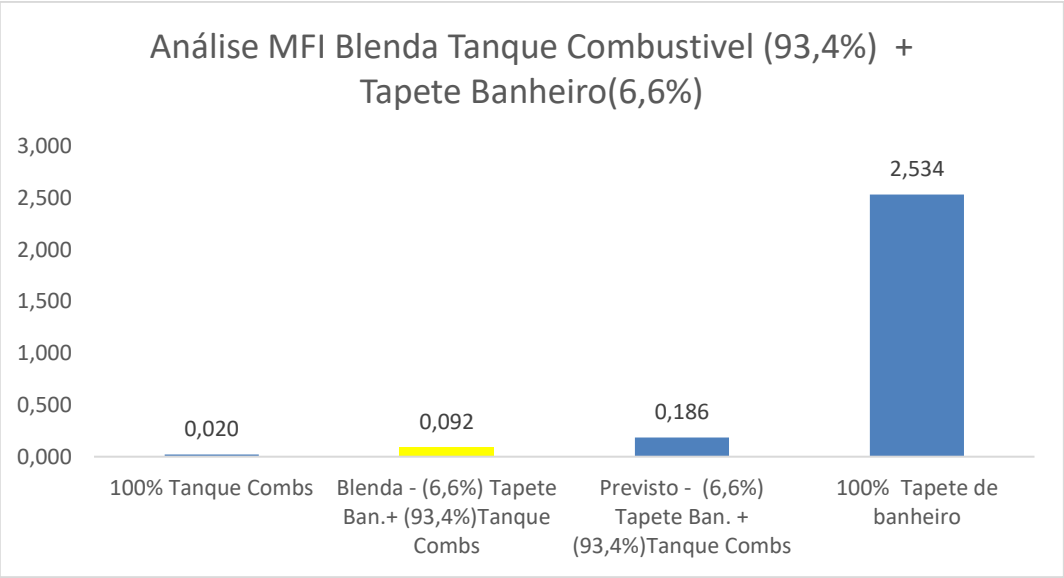
Fonte: Próprio autor (2019)

Como se pode observar, o MFI das blendas, obtido experimentalmente pela média ponderada das massas, apresentou um valor divergente do esperado conforme mostram as Tabelas 10 e Tabela 11. Em ambos os casos, considerando-se que o comportamento das misturas fosse linear, o MFI obtido foi divergente do previsto. Para a blenda TE1 (36%) + TE3 (64%) o MFI previsto era de 0,32g/10mins, sendo que o resultado experimental obtido foi de 0,151 g/10min.

Para a blenda composta por TC (6,6%) e TB (3,4%), o resultado esperado para MFI era de 0,186 g/10min, porém o resultado obtido experimentalmente foi de 0,0919 g/10min.

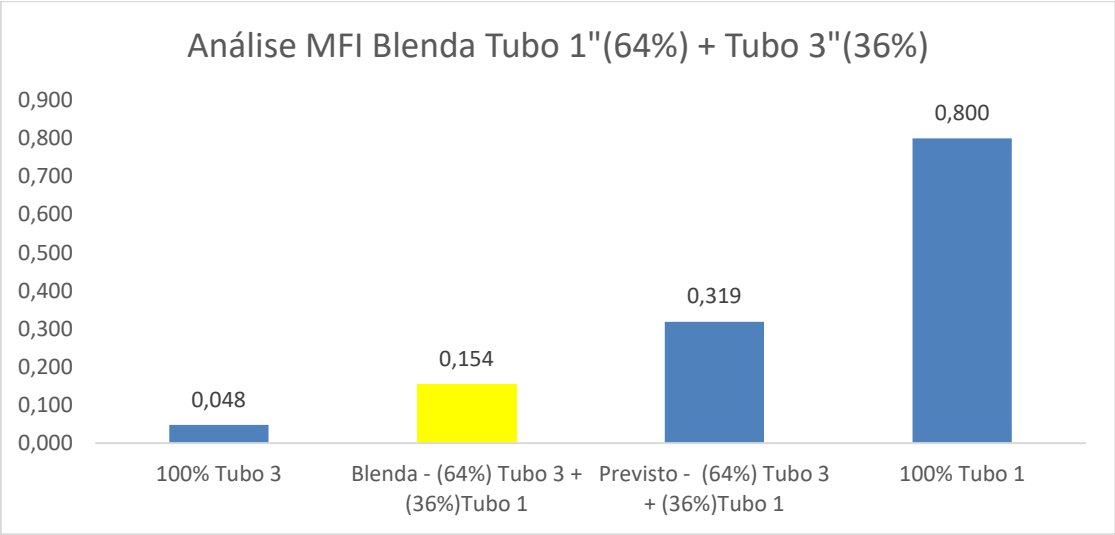
Como os valores obtidos experimentalmente foram divergentes dos esperados, conforme evidenciado nos gráficos das Figuras 20 e 21, assumindo-se que os materiais apresentariam um comportamento linear, acreditou-se que este resultado divergente do previsto estivesse associado a uma baixa homogeneidade do material extrudado.

Figura 30 – Previsto x realizado blenda TC e TB.



Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 31 – Previsto x realizado blenda TE1 e TE3.



Fonte: Próprio autor (2019)

Para avaliar se os resultados encontrados foram influenciados pela falta de homogeneidade das blendas analisadas sucessivos reprocessamentos foram realizados e avaliados conforme item 5.4 a seguir.

5.4 Análise da homogeneidade das blendas

Para verificar esta hipótese um novo teste de MFI foi realizado com sucessivas extrusões, as amostras foram extrudadas no equipamento marca Thermo eléctron modelo Rheomex 19/25 QC extruder situado no laboratório de polímeros do Campus VI do CEFET-MG por três vezes e os MFI's de cada extrusão foram medidos para analisar o efeito do número de reprocessamentos no material e verificar assim se o MFI encontrado nas blendas divergente do esperado era devido a uma possível falha de homogeneidade no material, conforme exibido nas Tabela 12 a 17.

Tabela 12 – Blenda TE1 e TE3 - 1º Reprocessamento.

N	Pesos amostras máquina	MFI
1		
2	0,0325	0,108
3	0,0316	0,105
4	0,0337	0,112
5	0,0326	0,109
6	0,0322	0,107
7	0,0315	0,105
8	0,0325	0,108
	Media	0,108
	Erro %	6,984
	Maior valor	0,112
	Menor valor	0,105
	Medições Eliminadas	
1	0,0305	0,102

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 13 – Blenda TE1 e TE3 - 2º Reprocessamento.

N	Pesos amostras máquina	MFI
1	0,0267	0,107
2	0,0280	0,112
3	0,0279	0,112
4	0,0280	0,112
5	0,0264	0,106
6	0,0264	0,106
7	0,0263	0,105
8	0,0258	0,103
	Media	0,108
	Erro %	8,527
	Maior valor	0,112
	Menor valor	0,103

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 14 – Blenda TE1 e TE3 - 3º Reprocessamento.

N	Pesos amostras máquina	MFI
1	0,0238	0,095
2	0,0238	0,095
3	0,0239	0,096
4	0,0230	0,092
5	0,0243	0,097
6	0,0249	0,100
7	0,0236	0,094
8	0,0231	0,092
	Media	0,095
	Erro %	8,261
	Maior valor	0,100
	Menor valor	0,092

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 15 – Blenda TB +TC - 1º Reprocessamento.

N	Pesos amostras máquina	MFI
1	0,0266	0,089
2	0,0259	0,086
3	0,0255	0,085
4		
5	0,0249	0,083
6	0,0249	0,083
7		
8		
	Media	0,085
	Erro %	6,827
	Maior valor	0,089
	Menor valor	0,083
	Medições Eliminadas	
7	0,0285	0,095
8	0,0221	0,074
4	0,0233	0,078

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 16 – Blenda TB +TC - 2º Reprocessamento.

N	Pesos amostras máquina	MFI
1		
2	0,0307	0,102
3	0,0292	0,097
4	0,0288	0,096
5	0,0304	0,101
6		
7		
8	0,0282	0,094
	Media	0,098
	Erro %	8,865
	Maior valor	0,102
	Menor valor	0,094
	Medições Eliminadas	
7	0,0243	0,081
1	0,0260	0,087
6	0,0318	0,106

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 17 – Blenda TB +TC - 3º Reprocessamento.

N	Pesos amostras máquina	MFI
1	0,0283	0,094
2	0,0298	0,099
3	0,0292	0,097
4	0,0290	0,097
5	0,0286	0,095
6	0,0291	0,097
7	0,0284	0,095
8	0,0289	0,096
	Média	0,096
	Erro %	5,300
	Maior valor	0,099
	Menor valor	0,094

Fonte: Próprio autor (2019)

Na Tabela 18 é mostrado um resumo do reprocessamento das blendas.

Tabela 18 – Resumo reprocessamento das blendas.

Amostra	**MFI 1º Reprocessamento**	**MFI 2º Reprocessamento**	**MFI 3º Reprocessamento**	**Erro %**
TE1 36% e TE3 64%	0,107	0,108	0,095	13,40
TC 93,4% e TB 6,6%	0,084	0,096	0,096	14,41

Fonte: Próprio autor (2019)

Conforme mostrado na Tabela 18, observa-se que não houve grande variação entre os valores de MFI medidos para sucessivos reprocessamentos, o que evidencia que a homogeneidade das amostras não oscilou significativamente como foi incialmente suposto para sucessivos reprocessamentos.

Pode-se verificar um erro da ordem de 13% e 15% para as amostras de blenda de tubo de 1 polegada e 3 polegadas e blenda de tanque de combustível e tapete de banheiro respectivamente. Essa variação nos valores apresentados pode ser atribuída às oscilações no procedimento de medição de MFI devido ao corte manual das amostras uma vez que o sistema de corte automático do equipamento não estava em pleno desempenho de suas funções.

Durante os ensaios e análises de MFI realizados anteriormente diversos pontos discrepantes foram eliminados, como a disponibilidade de material para realização deste teste era menor, isto pode ter sido um dos fatores de influência na oscilação acima encontrada nos resultados.

Sendo assim conclui-se que para efeitos de testes e análises apenas uma extrusão do material é suficiente para garantir a homogeneidade das amostras analisadas.

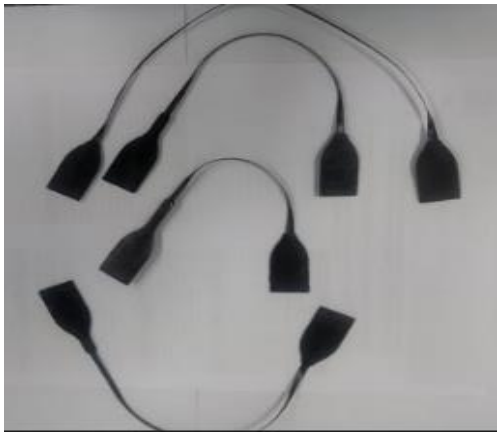
5.5 Análise das propriedades mecânicas

Para avaliação das propriedades mecânicas das amostras foram elaborados corpos de prova para ensaios de tração. Estes corpos de prova de cada uma das amostras puras e para as blendas de Tapete de Banheiro + Tanque de combustível e blenda de Tubos de 1 polegada com Tubo de 3 polegadas foram fabricadas conforme dimensões na Figura 15.

Figura 32 – Ensaio de tração – ED.

Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 33 – Ensaio de tração – TC.



Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 34 – Ensaio de tração – TEA.

Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 35 – Ensaio de tração – TE1.

Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 36 – Ensaio de tração – TE3.

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 19 – Propriedades mecânicas das amostras puras.

Amostras	**Tensão Média (σ ± S) (Mpa)**	**Deformação (%)**
ED	18,32 ± 2,67	19,14
TE1	11,96 ± 0,44	14,21
TE3	20,07 ± 0,57	14,93
TC	22,90 ± 4,56	12,31
TEA	23,29 ± 0,54	16,95

Fonte: Próprio autor (2019)

A partir das análises das imagens dos corpos de prova dos ensaios de tração e dos resultados encontrados conforme Tabela 19, pode-se perceber que as amostras apresentaram comportamentos bastante divergentes com relação às suas propriedades mecânicas. Enquanto as amostras do material proveniente dos tanques de combustíveis descartados apresentaram significativa deformação, os materiais das amostras obtidas dos tubos de uma polegada, três polegadas e do tubo da Empresa A apresentaram baixas deformações. O material proveniente de embalagens domésticas descartadas apresentou uma fratura frágil nos corpos de prova conforme mostrado acima. Este resultado observado nas amostras de embalagens domésticas pode ser atribuído à baixa homogeneidade das amostras obtidas no processo de fabricação dos corpos de prova pelo método de prensagem. Haja vista a diferença de coloração apresentada no corpo de prova da Figura 32. Para verificação do efeito da homogeneidade no resultado do ensaio de tração deste material, as amostras de embalagens domésticas foram extrudadas e submetidas a novos ensaios de tração e MFI conforme mostrado adiante.

Tabela 20 – Propriedades mecânicas das blendas.

Amostra	**Tensão Média (σ ± S)(Mpa)**	**Deformação (%)**
TE3 64% + TE1 36%	20,82 ± 0,25	14,70
TC 93,4% + TB 6,6%	18,99 ± 0,15	12,91

Fonte: Próprio autor (2019)

Pode-se perceber que no caso da blenda com TE1 + TE3 houve um aumento no valor da resistência mecânica obtida, sendo o resultado encontrado superior à resistência obtida para as amostras puras, conforme mostrado na Tabela 18. A blenda formada por TC + TB apresentou resultado intermediário em relação aos valores de resistência mecânica dos materiais puros.

Como o a resina de ED foi o que apresentou propriedades de processamento mais próximas do atual pellet utilizado pela Empresa A, uma atenção especial a este material foi dada e estas amostras foram extrudadas e novamente ensaiadas mecanicamente para verificar se o caso da ruptura frágil observado nos ensaios de tração realizados anteriormente foi devido à falha de homogeneização do material.

As amostras deste material mesmo após a extrusão apresentaram novamente ruptura frágil e perda acentuada em suas de propriedades mecânicas conforme mostrado na Tabela 21.

Tabela 21 – Ensaio de tração embalagens domésticas extrudadas.

Corpo de Prova	**Tensão Média (MPa)**	**Deformação (%)**	**Módulo de Elasticidade (GPa)**
ED	16,89 ± 3,49	19,14	0,88
ED Extrudadas	8,23 ± 4,97	2,61	0,31

Fonte: Próprio autor (2019)

Pelo comportamento frágil apresentado acima pelas amostras de PEAD de embalagens, acredita-se que este material apesar de apresentar as propriedades de processamento mais próximas do pellet reciclado, matéria-prima utilizada pela empresa A, este material não é viável na aplicação de substituição da matéria prima atual.

A partir de então, focou-se na análise das blendas de tapete de banheiro e tanque de combustível e blendas de tubos de 1” e tubos de 3” como alternativa para esta substituição.

5.6 Modelo matemático para predizer propriedades

Como os índices de fluidez das blendas não apresentaram um comportamento linear como era esperado inicialmente, foi realizada uma aproximação polinomial para prever matematicamente o resultado das misturas.

Para cada uma destas blendas analisadas foi feita a aproximação da proporção teórica ideal para que obtivesse o MFI de 0,28g/10min que é o parâmetro do material processado pela Empresa A.

Foram elaborados dois tipos de blendas nas seguintes proporções, 25% tapete de banheiro e 75% tanque de combustível, 50% tapete de banheiro e 50% tanque de combustível, 75% tapete de banheiro e 25% tanque de combustível, conforme exposta na Tabela 22 e para as blendas formadas com os materiais dos tubos elétricos , 25% tubo de 1” e 75% tubo de 3”, 50% tubo de 1” e 50% tubo de 3”, 75% tubo de 1” e 25% tubo de 3”, conforme Tabela 23, já sabendo os valores dos materiais puros como determinados na Tabela 5.

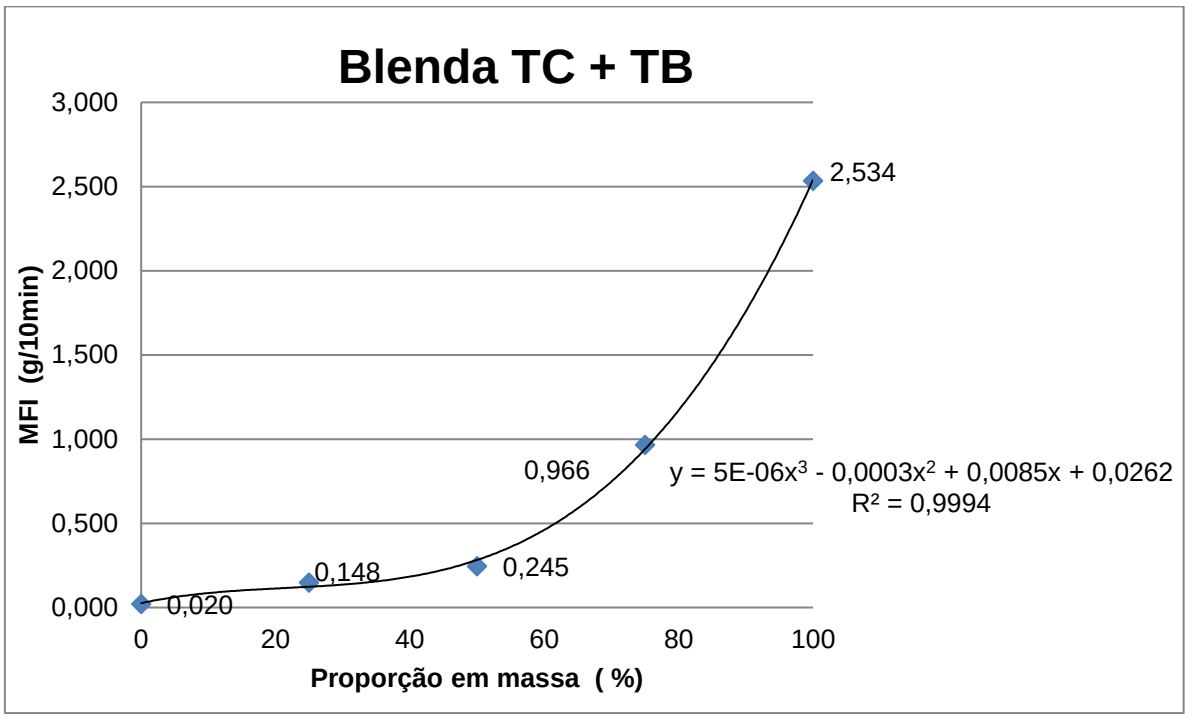
Estas blendas com estas novas composições foram inicialmente extrudadas para homogeneização das amostras. A partir disto partiu-se para uma análise buscando avaliar se o comportamento teórico seria obtido experimentalmente. Caso esta hipótese se comprove, será possível ter-se uma previsibilidade das propriedades desejadas a partir da mistura de duas amostras de materiais de propriedades conhecidas para se gerar uma blenda com propriedades controladas de acordo com os requisitos técnicos da aplicação final.

Tabela 22 – MFI das blendas TB e TC.

Amostras blendas % em massa	**MFI (g/10min)**
TC 100%	0,020
TB 20% e TC80 %	0,134
TB 25% e TC 75 %	0,148
TB 50% e TC 50 %	0,242
TB 75% e TC 25 %	0,960
TB 100%	2,534

Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 37 – MFI blendas TB e TC.



Fonte: Próprio autor (2019)

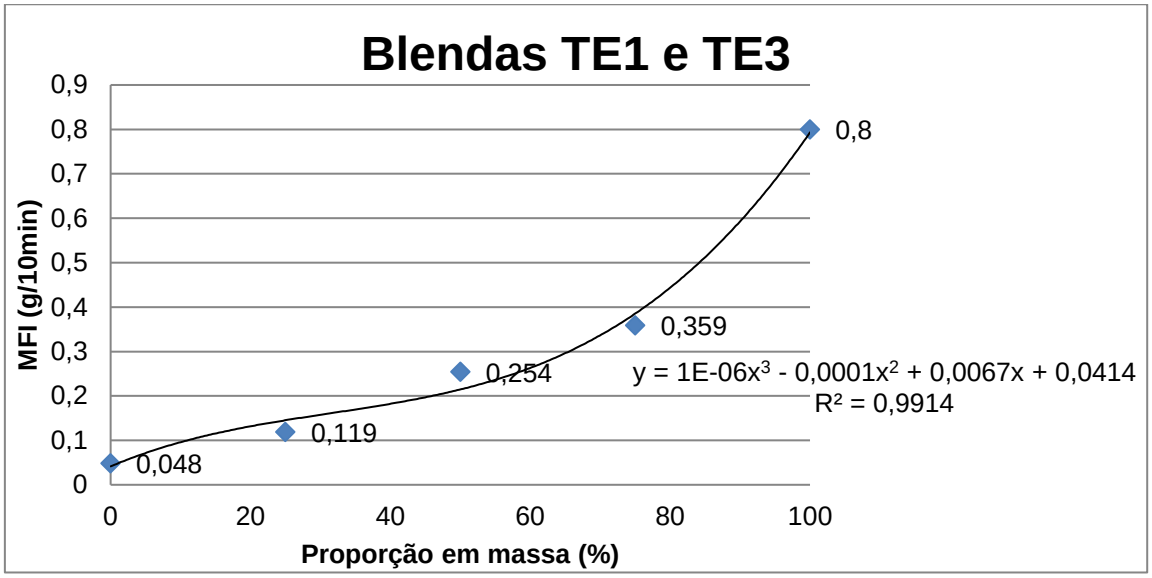
Analisando os dados obtidos experimentalmente, percebe-se que para o modelo proposto reflete com boa aproximação o comportamento do material encontrado experimentalmente. O coeficiente de correlação apresentou valor muito próximo de um para a curva polinomial de grau três. Conforme mostrado na Tabela 22, para a blenda formada com proporção de 20% em massa Tapete de banheiro/vestiário e 80% tanque de gasolina o MFI encontrado experimentalmente foi de 0,134 g/min, enquanto o modelo teórico conforme gráfico ilustrado na Figura 37 apresenta aproximadamente 0,113 g/min. Apontando uma variação aproximada de 16% entre o modelo matemático e o resultado prático.

Tabela 23 – MFI das blendas TE3 e TE1.

Amostras % em massa	MFI (g/10min)
TE3 100%	0,048
TE1 25% e TE3 75%	0,119
TE1 50% e TE3 50%	0,254
TE1 55% e TE3 45%	0,361
TE1 75% e TE3 25%	0,359
TE1 100%	0,800

Fonte: Próprio autor (2019)

Figura 38 – MFI Blenda TE1 e TE3.



Fonte: Próprio autor (2019)

Ao contrário da blenda formada por tanque de combustível e tapete de banheiro, no caso da blenda forma pelos tubos de 1 e tubos de 3 polegadas, pode-se perceber um certo distanciamento dos pontos analisados em relação a curva conforme mostrado na Figura 38.

Como observa-se na equação da aproximação polinomial exposta na Figura 38, para uma blenda teoricamente formada em uma proporção de TE1 55% TE3 45% o MFI final obtido era de 0,28g/10min.Ou seja, essa seria a proporção ideal para se obter o parâmetro de índice de fluidez atualmente obtido

com o material comprado reciclado pela Empresa A. Porém, experimentalmente o resultado obtido foi de 0,36g/10min, Tabela 21, resultado 28,5% maior, muito distante do previsto. Este resultado evidencia uma dificuldade de se controlar as propriedades das blendas formadas por polímeros.

Para a amostra formada com TE1 e TE3 pode-se observa que houve uma variação brusca nas propriedades da blenda na proporção de TE1 25 % TE3 75%. Nesta condição resultado obtido esteve abaixo das propriedades dos materiais puros. Apensar dos resultados experimentais não apresentarem grandes oscilações nos demais pontos obtidos, conforme mostrado na Tabela 24.

Se no caso da análise das propriedades de processamento das blendas, MFI, houve certa linearidade, no campo das propriedades mecânicas, os resultados dos testes de tração apresentaram grandes oscilações.

Tabela 24 – Ensaio de tração Blendas TE1 e TE3

Corpo de Prova	**Tensão Média (MPa)**	**Deformação (%)**	**Módulo de Elasticidade (GPa)**
TE3 100%	20,07	14,9	0,13
TE1 25 % TE3 75%	11,62	5,3	0,22
TE1 50% TE3 50%	8,94	3,2	0,29
TE1 55% TE3 45%	9,62	3,9	0,26
TE1 75% TE3 25%	10,08	4,8	0,23
TE1 100%	11,96	14,2	0,08

Fonte: Próprio autor (2019)

Apesar da blenda formada por TC 20% TB 80% apresentar MFI conforme a necessidade de processamento, mecanicamente este material apresentou queda em sua resistência, sendo a tensão máxima obtida em torno de 30% da resistência mecânica apresentada pelo do tubo produzido pela Empresa A, o que representa um gargalo a sua aplicação.

As amostras das blendas formadas com TC e TB apresentaram grandes oscilações evidenciando uma falha na repetibilidade dos ensaios mecânicos.

Neste caso, evidencia-se a dificuldade em se controlar e conciliar propriedades de processamento e propriedades mecânicas.

Tabela 25 – Ensaio de tração blendas TC e TB.

Corpo de Prova	**Tensão Média (MPa)**	**Deformação (%)**	**Módulo de Elasticidade (GPa)**
TB 100%	16,18	5,3	0,31
TC 20% e TB 80 %	8,96	4,0	0,24
TC 25% e TB 75%	10,75	3,5	0,32
TB 50% e TC 50%	18,87	13,0	0,15
TC 75% e TB25%	19,00	14,1	0,14
TC 100%	22,90	12,3	0,19

Fonte: Próprio autor (2019)

6.CONCLUSÕES

Analisando os resultados encontrados, percebe-se que apenas pelo índice de fluidez das resinas poliméricas, não se pode afirmar com precisão se um material é ou não PEAD haja vista que consultando o catálogo de Poliolefinas da Braskem, fornecedor de resinas poliméricas virgens, há uma variação grande nos índices de fluidez de PEAD, para a mesma norma utilizada, ASTM D1238-13. Esta variação de fluidez impacta diretamente no tipo de processamento do material de acordo com sua aplicação.

Conforme proposto inicialmente nos objetivos, após a análise das propriedades de processamento, índice de fluidez (MFI) e das propriedades mecânicas medidas por meio de ensaios de tração, conclui-se que de todas as amostras analisadas, nenhuma delas se mostra apta a substituir a atual matéria-prima utilizada pela empresa A, uma vez que nos ensaios realizados não foi possível conciliar propriedades de processamento e propriedades mecânicas. Como no caso da amostra de embalagens domésticas que apesar de ter um índice de fluidez próximo do material do tubo da empresa A, apresentou uma queda acentuada em suas propriedades mecânicas, de mais de 37%.

Após a produção das blendas percebeu-se a dificuldade do controle das propriedades finais das mesmas. Para as misturas formadas, percebe-se que a blenda formada do TC50%+TB50% se aproxima do índice de fluidez (MFI) e das propriedades mecânicas do atual tubo produzido pela empresa A, indicando que esta proporção está próxima da mistura ideal devendo ser realizados maiores estudos para validação desta mistura como substituta para a atual matéria-prima que é o pellet reciclado, utilizado pela empresa A.

Como no caso estudado das blendas formadas com tapete de banheiro e tanque de combustível e blenda formada com tubos de 1” e tubos de 3”, de onde se partiu dos casos extremos, de materiais com menores custos e propriedades mais divergentes, os resultados obtidos pela análise de MFI levam a crer que utilizando resinas com propriedades com valores menos discrepantes a aproximação e o controle dos resultados será obtido com maior facilidade.

Este trabalho serve de início para tantos outros que queiram analisar os mais variados tipos de polímeros, e visa mostrar o quão necessário se faz a

elaboração de maiores estudos neste sentido, de controlar e predizer as propriedades finais das blendas de materiais reciclados. Acredita-se que estudos como estes podem ser um estímulo ao uso destas matérias-primas reprocessadas com ganhos ambientais e econômicos sem que se prejudique as aplicações técnicas e de engenharia destes materiais. Sendo assim, pode-se dizer que este tipo de análise pode ser uma poderosa ferramenta para geração de emprego e renda na criação de empresas especializadas em consultoria e validação de matérias-primas e optimização de processos produtivos na indústria de polímeros.

Com relação ao processamento de polímeros, além do estudo focado nos materiais é importante que se façam maiores estudos focados em processamento e controle de produção, pois o uso de matérias-primas reprocessadas é apenas uma das alternativas de redução de custos e ganhos de resultados. Pode-se dizer que ainda há perspectivas de ganhos adicionais com estudos focados no acompanhamento e impacto gerado na alteração da temperatura de processamento e análise sobre o isolamento térmico no canhão da extrusora, garantindo maior eficiência e redução de custos com energia elétrica.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1238 - 13**: standard test method for melt flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer. West Conshohocken – USA. 2013. 16 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638 - 14**: standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken – USA. 2014. 17 p.

ARAÚJO, A. V. C.; MARTINS, V.; SCIENZA, L. C. Propriedades reológicas do PEAD verde submetido a múltiplos reprocessamentos. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECiMat), 22., 2016, Natal/RN. **Anais**... Natal, 2016, p. 9646-9655.

ARAÚJO, A. V. C.; SCIENZA, L. C.; SOARES, A. L. A.; MARTINS, V. Avaliação do efeito do reprocessamento nas propriedades térmicas do polietileno de alta densidade (PEAD) verde por calorimetria exploratória diferencial (DSC). In**:** Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 5., 2016, Bento Gonçalves/RS. **Anais**... Bento Gonçalves, 2016, p. 1-8.

BRASKEM. **Poliolefinas**: tabelas de propriedades. São Paulo - BR. 2015. 28 p.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 620 p.

COLTRO, L. ; GASPARINO, B. F.; QUEIROZ, G. C. Reciclagem de materiais plásticos: a importância da identificação correta. **Polímeros**, [S.l.], v. 18, n. 2, p.119-125, jun. 2008.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO I. L.; MARIA, L. C. S. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros**, [S.l.], v. 13, n. 1, p.01-13, jan. 2003.

FENABRAVE. **Anuário 2016**: o desempenho da distribuição automotiva no Brasil. São Paulo – BR. 2017. 92 p.

FERNANDES, B. L.; DOMINGUES, A. J. Caracterização mecânica de polipropileno reciclado para a indústria automotiva. Polímeros, [S.l.], v. 17, n. 2, p.85-87, jun. 2007.

MEDINA, H. V.; GOMES, D. E. B. **Gestão ambiental na indústria automobilística:** O caso da reciclagem de materiais, Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), maio 2002.

MEDINA, H. V.; GOMES, D. E. B. **Reciclagem de automóveis**: estratégias, práticas e perspectivas. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM)/Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), 2003, 60 p.

NAVEIRO, R. M.; MEDINA, H. V. D. **Estudo sobre tendências tecnológicas da reciclagem de veículos em fim de vida**: um setor em formação. Estudos tecnológicos e organizacionais. CNI SENAI, Brasília, 2009.

QUADRA, R. G. F. **Análise comparativa das tecnologias de tratamento de resíduos poliméricos aplicadas ao polipropileno proveniente da reciclagem de veículos**. 2015. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Energia – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

QUATRO RODAS. **Os carros mais vendidos no Brasil no acumulado de 2017**. Disponível em: <https://quatrorodas.abril.com.br/os-mais-vendidos-em-2017/> Acesso em: 15 jun. de 2017.

SILVA, J. R. B. **Tratamento de veículos em fim de vida**: modelos de gestão internacionais e brasileiro. 2016. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Ambiental - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Quimica Nova**, [S.l.], v. 28, n. 1, p.65-72, fev. 2005.

SUZUKI, C. E. T. **Estudo comparativo de alternativas para o desenvolvimento, projeto e fabricação de tanques de combustível para automóveis de passageiros dentro da General Motors do Brasil**. 2007. XX f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante) – Engenharia Automotiva, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

APÊNDICE

Com relação à análise de viabilidade da alteração de matéria-prima pelo uso da blenda de materiais reciclados, uma análise detalhada deve ser realizada.

Partindo para o caso específico da empresa A, verifica-se que caso a alteração da matéria-prima possa ser efetivada, aliando-se a adequação das propriedades mecânicas com o índice de fluidez desejado ao processo, pode-se obter uma significativa redução de custos com matéria-prima. Esta redução, além de se tornar uma vantagem competitiva pelo aumento da margem de lucratividade nas vendas, pode se destacar como uma vantagem estratégica de mercado, influenciando as condições de pagamento dos clientes, tais como o aumento de prazo de pagamento e fidelizando-os a empresa, por impactar diretamente de forma positiva em seu fluxo de caixa.

Segue a seguir algumas simulações de consumo e redução de custos

Tabela 26 – Simulação de custos com matéria-prima Empresa A.

SIMULAÇÃO CUSTOS MATÉRIA-PRIMA - ATUAL	
Consumo diário (Kg)	500
Dias produzidos por mês	22
Eficiência do processo (%)	90
Consumo mensal de matéria-prima(kg)	9.900
Custo matéria-prima/Kg	R$ 3,50
Custo mensal de matéria-prima (R$)	R$ 34.650,00

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 27 – Simulação de redução de custos com uso de blenda de PEAD

SIMULAÇÃO CUSTOS BLENDA COM MATERIAL RECICLADO	
Consumo diário (Kg)	500
Dias produzidos por mês	22
Eficiência do processo (%)	90
Consumo mensal de matéria-prima(kg)	9.900
Custo matéria-prima/Kg	R$1,00
Custo mensal de matéria-prima	R$9.900,00

Fonte: Próprio autor (2019)

Tabela 28 – Resumo previsão alteração material

SIMULAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	
Redução % custos com matéria-prima	71%
Estimativa de redução de custo mensal	R$ 24.750,00
Estimativa de redução de custo anual	R$ 297.000,00
Consumo anual de PEAD (Kg)	118.800

Fonte: Próprio autor (2019)

Vale ressaltar que esta análise é apenas uma visão preliminar dos benefícios da alteração da matéria-prima, devendo ser realizado um estudo mais aprofundado que abarque questões como investimento para implementação da estrutura para produção das blendas, custos operacionais com mão de obra e energia, impactos tributários, dentre outros aspectos. Porém esta análise mesmo que preliminar indica que há possibilidade de grandes ganhos com esta alteração e maior atenção deve ser dada ao referido assunto.