



DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO PARA A RECICLAGEM DE EMBALAGENS MULTICAMADAS TIPO SACHÊ

Bruna Carvalho Dalmacio

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheira.

Orientadoras: Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco
e Viviane Alves Escócio

Rio de Janeiro

Dezembro de 2020

DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO PARA A RECICLAGEM DE EMBALAGENS
MULTICAMADAS TIPO SACHÊ

Bruna Carvalho Dalmacio

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL

Examinado por:

Prof.^a Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco, D.Sc.-
orientadora

Viviane Alves Escócio, D.Sc. - orientadora

Prof.^a Monica Pertel, D.Sc.

Teresa Maria Dias Fernandes, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

Dezembro de 2020

Dalmacio, Bruna Carvalho

Desenvolvimento de processo para a reciclagem de embalagens multicamadas tipo sachê / Bruna Carvalho Dalmacio. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2020.

x, 58 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadoras: Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco e Viviane Alves Escócio.

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Ambiental, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 55-58.

1. embalagens. 2. multicamadas. 3. reciclagem. 4. placas. I. Pacheco, Elen Beatriz Acordi Vasques, orient. II. Escócio, Viviane Alves, coorient. III. Universidade Federal do Rio de Janeiro. IV. Título.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO PARA A RECICLAGEM DE EMBALAGENS MULTICAMADAS TIPO SACHÊ

Bruna Carvalho Dalmacio

Dezembro/2020

Orientadoras: Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco e Viviane Alves Escócio.

Curso: Engenharia Ambiental

As embalagens mistas, que apresentam em sua composição diferentes materiais, são consideradas, equivocadamente, como não recicláveis. A embalagem mista estudada foi a *Stand Up Pouch* (SUP), que é capaz de substituir aquelas mais rígidas e cartonadas que já se encontram no mercado. O SUP tem menor necessidade de matéria-prima para sua fabricação, menor necessidade de utilização de máquinas em seu processo produtivo e maior economia no custo de armazenamento e transporte e, além disso, é um tipo de embalagem que deve ser reciclada. Desta forma, o objetivo deste trabalho de conclusão de curso foi estudar a reciclagem dessas embalagens, compostas de plástico e alumínio, e avaliar as propriedades de seus constituintes reciclados em conjunto. Foram desenvolvidos quatro processos para a reciclagem dessas embalagens mistas, para fins comparativos, nos quais a moldagem por compressão foi avaliada e foram verificadas duas formas de prensagem da embalagem para formação de placas, com possibilidade de moagem e de aglutinação. Para isso, os materiais das embalagens foram identificados e caracterizados através dos ensaios de termogravimetria (TGA), espectrometria no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e calorimetria diferencial de varredura (DSC) e, ainda, buscou-se obter, a partir dos processos de reciclagem, a confecção de placas que foram avaliadas quanto ao seu índice de fluidez e de resistência à tração. De acordo com os resultados obtidos, foi possível concluir, através das análises de TGA, FTIR e DSC, que as embalagens estudadas são compostas em 79% por poli(tereftalato de etileno) (PET) e polipropileno (PP), que constituem as camadas externa e interna, respectivamente, e em 21% por alumínio. Após a confecção das placas, obtidas de cada um dos quatro processos propostos, foi possível concluir que a realização da moagem e aglutinação nas etapas de reciclagem das embalagens tipo SUP foram fundamentais para se ter uma placa uniforme, mais resistente e sem delaminação. Contudo, a adição dessas etapas conduz a um maior gasto energético no processo.

Palavras-chave: Embalagem; Stand Up Pouch (SUP); Reciclagem; PET; Poli(tereftalato de etileno); PP; Polipropileno; Placas.

Abstract of Undergraduate Project presented to Poli/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Environment Engineer.

DEVELOPMENT OF RECYCLING PROCESS FOR SACHET MULTILAYER PACKAGING

Bruna Carvalho Dalmacio

December/2020

Advisors: Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco and Viviane Alves Escócio

Course: Environmental Engineering

Multilayer packaging, which contains different materials in its composition, is mistakenly considered as non-recyclable. The mixed packaging studied was the *Stand Up Pouch* (SUP), which is able to replace more rigid and carton packs that are already on the market. SUP has less need for raw material for its manufacture, less need for the use of machines in its production process and greater savings in storage and transportation costs, and, in addition, it is a type of packaging that must be recycled. The objective of this project was to study the recycling of these packages, composed of plastic and aluminum, and evaluate the properties of their recycled constituents. For comparative purposes, four processes were developed for the recycling of these mixed packages, in which the compression molding was evaluated and two ways of pressing the packaging to form plates were verified, with the possibility of grinding and agglutination. For that, the packaging materials were identified and characterized through the thermogravimetric analysis (TGA), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and differential scanning calorimetry (DSC) tests, and it was obtained plates from the recycling processes that were evaluated for their fluidity and tensile strength index. According to the results acquired it was possible to conclude, through TGA, FTIR and DSC analyzes, that the studied packages are 79% composed of poly(ethylene terephthalate) (PET) and polypropylene (PP), which constitute the outer and inner layers, respectively, and 21% by aluminum. After making the plates, obtained from each of the four proposed processes, it was possible to conclude that grinding and agglutination in the recycling stages of SUP-type packaging were essential to have a uniform, more resistant and non-delamination plate. However, the addition of these steps leads to greater energy expenses in the process.

Keywords: Packaging; Stand Up Pouch (SUP); Recycling; PET; Poly (ethylene terephthalate); PP; Polypropylene; Plates.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1. EMBALAGENS FLEXÍVEIS	3
3.2. PRINCIPAIS MATERIAIS PLÁSTICOS PARA EMBALAGENS FLEXÍVEIS	4
3.3. EMBALAGENS MISTAS FLEXÍVEIS DO TIPO <i>STAND UP POUCH</i> (SUP)	7
3.4. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DAS EMBALAGENS FLEXÍVEIS	8
3.5. RECICLAGEM DAS EMBALAGENS FLEXÍVEIS	11
4. METODOLOGIA.....	17
4.1. MATERIAL	18
4.2. EQUIPAMENTOS	19
4.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DAS EMBALAGENS	20
4.3.1. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	20
4.3.2. ENSAIO POR ESPECTROMETRIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER.....	21
4.3.3. CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA	21
4.4. PROCESSOS DE RECICLAGEM E SUAS ETAPAS	22
4.4.1. COLETA E LAVAGEM – BENEFICIAMENTO.....	23
4.4.2. MOAGEM	23
4.4.3. AGLUTINAÇÃO	24
4.4.4. COMPRESSÃO	25
4.5. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS RECICLADOS	27
4.5.1. ÍNDICE DE FLUIDEZ (MFI)	27
4.5.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	28

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DAS EMBALAGENS	28
5.1.1. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA).....	28
5.1.2. ENSAIO POR ESPECTROMETRIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	31
5.1.3. CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC).....	34
5.2. PROCESSOS DE RECICLAGEM E SUAS ETAPAS	37
5.2.1. MOAGEM	37
5.2.2. AGLUTINAÇÃO	38
5.2.3. COMPRESSÃO	40
5.2.3.1. Processo nº 1: placas prensadas a partir de embalagem inteira – como recebida	41
5.2.3.2. Processo nº 2: placas prensadas a partir de embalagem inteira – invertida.	42
5.2.3.3. Processo nº 3: placas prensadas a partir de embalagem moída	44
5.2.3.4. Processo nº 4: placas prensadas a partir de embalagem aglutinada....	45
5.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS RECICLADOS	47
5.3.1. ÍNDICE DE FLUIDEZ (MFI)	47
5.3.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	48
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
7. RECOMENDAÇÕES.....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema completo da etapa prévia de reciclagem de embalagens multicamadas	14
Figura 2 – Processo de reciclagem de embalagens SUP e de resinas mistas de SUP com PEAD, PEBD e PP	16
Figura 3 – Esquema da metodologia utilizada para o estudo da reciclagem de embalagens mistas flexíveis compostas de plásticos e alumínio.....	18
Figura 4 – Esquema das quatro diferentes formas estudadas da reciclagem de embalagens mistas flexíveis compostas de plásticos e alumínio.....	22
Figura 5 – Moinho de facas utilizado para a moagem do material.	24
Figura 6 – Fotografias de a) Vista geral do equipamento aglutinador utilizado para aglutinar as embalagens moídas; b) Vista dos rotores do equipamento e c) Vista do material sendo aglutinado dentro do equipamento	25
Figura 7 – Fotografias de a) Prensa quente com aplicação de pressão manual; b) Prensa refrigerada à água e c) Molde metálico com material aglutinado disposto, antes de ser prensado.....	26
Figura 8 – Curvas obtidas por análise termogravimétrica para: a) Embalagem 1; b) Embalagem 2 e c) Embalagem 3	30
Figura 9 – Espectro por FTIR dos filmes plásticos externos das embalagens do tipo sachê estudadas: a) Da embalagem 1; b) Da embalagem 2 e c) Da embalagem 3	32
Figura 10 – Espectro por FTIR dos filmes plásticos internos das embalagens do tipo sachê estudadas: a) Da embalagem 1; b) Da embalagem 2 e c) Da embalagem 3	33
Figura 11 – Análise de calorimetria diferencial de varredura das três amostras de Stand Up Pouch: a) Da embalagem 1; b) Da embalagem 2 e c) Da embalagem 3	35
Figura 12 – a) Fragmentos de embalagem pós-consumo moídos em moinho de facas e b) Fragmentos da embalagem moídos e acondicionados em um saco transparente	37

Figura 13 – a) Fragmentos do material aglutinado no equipamento aglutinador após passar pelo moinho e b) Fragmentos do material aglutinado acondicionado em saco transparente.....	39
Figura 14 – Comparação entre um saco de material moído e outro de material aglutinado, contendo o mesmo peso em cada	39
Figura 15 – Placa fabricada a partir do processo 2, à temperatura de 240°C, apresentando delaminação e pouca aderência entre as camadas.	40
Figura 16 – a) Placa prensada a partir de duas placas confeccionadas com embalagem inteira pós-consumo após sua retirada da prensa e ainda no molde metálico e b) Placa reprensada de embalagem inteira pós-consumo com os excessos removidos.....	41
Figura 17 – a) Placa prensada a partir de duas placas confeccionadas com embalagem inteira pós-consumo invertida (com a parte de alumínio externa), após retirada da prensa e ainda no molde metálico e b) Placa reprensada de embalagem inteira pós-consumo com a parte de alumínio externa, com os excessos removidos	43
Figura 18 – a) Placa prensada a partir de duas placas confeccionadas de embalagem pós-consumo moída após retirada da prensa e ainda no molde metálico e b) Placa reprensada de embalagem pós-consumo moída, com os excessos removidos.	44
Figura 19 – a) Placa prensada a partir de duas placas confeccionadas de material aglutinado após retirada da prensa e ainda no molde metálico e b) Placa reprensada de material aglutinado, com os excessos removidos	46
Figura 20 – Exemplo das placa reprensadas em cada processo de reciclagem estudado: a) A partir de embalagem inteira – como recebida; b) A partir de embalagem inteira – cortada e invertida; c) A partir de embalagem moída e d) A partir de embalagem moída e aglutinada.....	47
Figura 21 – Placa danificada após tentativa de corte de corpos de prova com a fresa automática.....	48
Figura 22 – Corpos de prova cortados em placa confeccionada de embalagens a) Inteiras e com plástico na parte externa; b) Inteiras e com alumínio na parte externa; c) Moídas e d) Moídas e aglutinadas	49

Figura 23 – Resultados dos ensaios de tração realizados para cada um dos quatro processos..... 50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais características dos termoplásticos mais utilizados em embalagens	6
Quadro 2 – Códigos aplicados às embalagens plásticas para identificar e indicar o tipo de material e sua reciclabilidade.....	12

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados das análises termogravimétricas para cada amostra.....	30
Tabela 2 – Picos por FTIR dos filmes plásticos externos da embalagem tipo sachê. ...	32
Tabela 3 – Picos por FTIR dos filmes plásticos internos da embalagem tipo Stand Up Pouch.	34
Tabela 4 – Resultados da análise de calorimetria diferencial de varredura para as três amostras de embalagem.....	36
Tabela 5 – Temperatura de fusão ou de amolecimento (T_f) dos principais polímeros ..	36
Tabela 6 – Resultados do processo de moagem.	37
Tabela 7 – Resultados do processo de aglutinação.....	38
Tabela 8 – Resultados das três etapas do processo de aglutinação.....	38
Tabela 9 – Resultado das placas moldadas sob compressão a partir das embalagens inteiras	42
Tabela 10 – Resultado das placas moldadas sob compressão a partir das embalagens inteiras com a parte de alumínio externa	43
Tabela 11 – Resultado das placas moldadas sob compressão a partir das embalagens moídas.....	45
Tabela 12 – Resultado das placas moldadas sob compressão a partir de material aglutinado	46
Tabela 13 – Resultados do ensaio de tração para os corpos de prova obtidos pelos 4 processos realizados e estudados	50

LISTA DE SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABIEF	Associação Brasileira da Indústria de Embalagens Plásticas Flexíveis
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRE	Associação Brasileira de Embalagem
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ASTM	Em inglês <i>American Society for Testing and Materials</i>
BOPP	Polipropileno Biorientado
BOPA	Náilon Biorientado
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DSC	Em inglês <i>Differential Scanning Calorimetry</i>
EPI	Equipamento de Proteção Individual
EVOH	Copolímero de Etileno e Álcool Vinílico
FPE	Em inglês <i>Flexible Packaging Europe</i>
FTIR	Em inglês <i>Fourier-Transform Infrared Spectroscopy</i>
IMA	Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano
ISO	Em inglês <i>International Organization for Standardization</i>
KBr	Brometo de Potássio
MFI	Em inglês <i>Melt Flow Index</i>
N ₂	Nitrogênio
NaOH	Hidróxido de Sódio
NBR	Norma Técnica Brasileira
PA	Poliamida
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEBDL	Polietileno de Baixa Densidade Linear
PET	Poli(Tereftalato de Etileno)
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PO	Poliiolefina
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Poli(Cloreto de Vinila)
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SUASA	Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária
SUP	Em inglês <i>Stand Up Pouch</i>
TGA	Em inglês <i>Thermogravimetric Analysis</i>
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a adoção de padrões de consumo excessivo são responsáveis pelo aumento da geração de resíduos sólidos urbanos (DIAS et al., 2012; NEVES&CASTRO, 2012). De acordo com o estudo realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (2019), no ano de 2018, foram geradas 79 x 10⁶ toneladas de resíduos no Brasil.

Segundo Neves e Castro (2012), as embalagens representam cerca de um terço dos resíduos sólidos urbanos gerados e, de acordo com Dantas (2000), o descarte destes materiais no meio ambiente causa impactos ambientais negativos. Dessa forma, se fazem necessários estudos para estimular a reciclagem destes produtos.

As embalagens foram criadas para acondicionar um produto durante o seu armazenamento e transporte, além de protegê-lo de eventuais quedas e/ou contaminação por qualquer espécie de impureza (DANTAS, 2000). Entre as embalagens, têm-se as flexíveis que podem ser feitas a partir de um único material, mais conhecidas como monocamadas, ou podem ser embalagens com diferentes materiais (mistas ou multicamadas). A utilização de apenas um único material pode ser eficiente para determinadas aplicações, entretanto, existem algumas limitações que devem ser levadas em consideração, por exemplo: o vidro é um recurso frágil e pesado, já o metal não é transparente, dificultando a visibilidade do conteúdo e o plástico, como o exemplo do PET, não apresenta uma barreira de oxigênio suficiente para alguns produtos serem comercializados com segurança (KAISER; SCHMID; SCHLUMMER, 2017).

O crescimento da demanda por embalagens flexíveis no mundo tem exigido um acelerado desenvolvimento de técnicas avançadas para um melhor acondicionamento de produtos, levando em consideração questões econômicas e ambientais. Dessa maneira, os filmes de camada única presentes nas embalagens têm sido substituídos por filmes multicamadas (TARTAKOWSKI, 2010).

Segundo a Associação Brasileira de Embalagem (ABRE) e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (2016), embalagens multicamadas combinam dois ou mais materiais e, em alguns casos, até materiais reciclados. Alguns exemplos são: plástico com metal, plástico com vidro, vidro com metal, metal com madeira e metal com papel.

A possibilidade de se combinar diversos materiais permite a formação e construção de embalagens mais flexíveis, que são moldadas de acordo com o produto a ser acondicionado e que atendam às condições de resistência e proteção necessárias para o envase e a distribuição adequada do item a ser comercializado (SARANTÓPOULOS et al., 2002; TEIXEIRA, 2013; ABIEF, 2015). De acordo com Lima (2015), o principal modelo de embalagem flexível multicamada em destaque atualmente é o *Stand Up Pouch* (SUP), uma embalagem tipo sachê que vem ganhando espaço no mercado global por necessitar de menos recursos naturais para sua fabricação e por permitir a criação de diversos formatos e projetos. Entretanto, pelo fato de muitas embalagens do tipo SUP apresentarem diferentes materiais em sua composição, torna-se mais difícil a reciclagem desse produto quando comparado com os confeccionados de um único material, sendo considerado por alguns setores, de forma equivocada, como uma embalagem não reciclável (REZENDE, 2014). Tal dificuldade, no entanto, não pode ser um impeditivo para o aprimoramento desse tipo de reciclagem, uma vez que possui grande potencial a ser desenvolvido.

Com base no exposto, são necessários estudos e esforços a fim de fomentar a reciclagem dessas embalagens. Este trabalho buscou, portanto, desenvolver processos de reciclagem mecânica para as embalagens pós consumo flexíveis multicamadas do tipo *Stand Up Pouch*, obtendo um produto final com boas propriedades, prolongando sua vida útil e evitando seu descarte em aterros sanitários.

2. OBJETIVO

O objetivo geral do presente trabalho foi desenvolver e avaliar processos de reciclagem de embalagens mistas flexíveis de sachê do tipo *Stand Up Pouch*, caracterizar e comparar os seus produtos reciclados.

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram buscados:

- Identificar os diferentes componentes presentes nas embalagens do tipo *Stand Up Pouch*.
- Realizar a reciclagem das embalagens a partir de quatro processos, para aplicação do produto final como placa de sinalização.

- Comparar e avaliar qualitativamente os processos de reciclagem realizados em busca do processo mais sustentável dentro das características e qualidades almejadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Embalagens flexíveis

As embalagens flexíveis possuem este nome justamente pela sua capacidade de se adaptar a diferentes formatos dos produtos aos quais devem ser acondicionados (ABIEF, 2015). De acordo com Lima (2015), devido a sua flexibilidade, este tipo de embalagem permite uma redução de custos referentes à armazenagem da respectiva mercadoria, visto que esta se adequa perfeitamente em espaços físicos menores.

A principal vantagem das embalagens flexíveis é que elas podem ser compostas por diferentes materiais, unindo as propriedades de cada um destes. Cada camada possui uma função específica, como por exemplo, resistência mecânica e selabilidade. Essa possibilidade de mesclar matérias-primas em uma única embalagem permite que o acondicionamento do produto atenda às exigências de conservação, resistência e comercialização segura da mercadoria (ABIEF, 2015).

Outra vantagem das embalagens flexíveis é que necessitam de menores quantidades de matéria-prima para a sua fabricação. Dessa forma, é possível afirmar que otimizam a relação da massa necessária para a criação da embalagem em relação ao produto acondicionado (LIMA, 2015; TEIXEIRA, 2013; SARANTÓPOULOS et al., 2002).

Para as empresas fabricantes, também é uma vantagem utilizar as embalagens flexíveis para acondicionar os seus produtos, pois, geralmente, este tipo de embalagem permite que o produto seja exposto em pé nas gôndolas dos supermercados, divulgando de forma mais direta a sua marca aos consumidores finais (LIMA, 2015).

Segundo Sarantópoulos et al. (2002), um dos principais motivos para a combinação de polímeros e outros materiais na fabricação de uma embalagem é a obtenção de boas propriedades, como as relacionadas à barreira a gases e aromas, ao desempenho mecânico, à temperatura de processamento ou de acondicionamento do produto embalado, à temperatura de estocagem e de uso do produto pelo consumidor, à

processabilidade dos polímeros, à sua rigidez, à resistência química, aos requisitos da legislação e impacto ambiental, a um custo de mercado viável, entre outros.

No entanto, o uso de polímeros e outros materiais na composição de uma embalagem flexível podem apresentar algumas dificuldades em sua produção ou até mesmo durante sua estocagem e comercialização, devido à possibilidade de ocorrer a delaminação, isto é, descolamento entre as camadas, danificando a embalagem. Nesse sentido, foram desenvolvidos diversos sistemas e resinas poliméricas com função adesiva para as camadas com o objetivo de conferir apropriada adesão entre os polímeros e os materiais que formam as multicamadas. Os sistemas e resinas poliméricas adesivas também devem apresentar propriedades compatíveis com a utilização e manuseio da embalagem e seu produto acondicionado, e devem resistir ao produto envasado, que pode permear a camada interna da estrutura e interagir com o adesivo (SARANTÓPOULOS et al., 2002).

3.2. Principais materiais plásticos para embalagens flexíveis

Os principais materiais das embalagens plásticas flexíveis são os polímeros, tais como: polietileno (PE), polipropileno (PP), polipropileno biorientado (BOPP), poli(tereftalato de etileno) (PET), poliamida (PA ou náilon) e náilon biorientado (BOPA). Nesse tipo de embalagem encontra-se também papel, folha de alumínio, adesivos, metalização, aditivos, antioxidantes, estabilizantes, lubrificantes e etc. A combinação desses materiais deve ser economicamente viável e precisa garantir a proteção do produto durante o seu ciclo de vida (LIMA, 2015).

Os plásticos são polímeros orgânicos de alta massa molar, que podem ser de origem fóssil ou derivados de compostos orgânicos naturais. Além disso, os polímeros apresentam longas moléculas conectadas por ligações químicas, formadas a partir de uma estrutura de repetição de pequenas unidades, conhecidas como monômeros. As estruturas que os plásticos assumem podem vir diferentes de acordo com o monômero que se repete na cadeia e a forma como as cadeias são ligadas. Com base no último, uma distinção pode ser feita entre termofixos, termoplásticos e elastômeros. Os plásticos termofixos são formados quando suas cadeias macromoleculares são reticuladas entre si, não permitindo nenhuma deformação ou conformação adicional; em termoplásticos, as cadeias macromoleculares não são reticuladas, mas mantidas juntas por forças químicas relativamente fracas (*Van der Waals*), o que significa que podem ser fundidas

reversivelmente por aquecimento e ressolidificadas por resfriamento, sem alterar muito suas propriedades mecânicas. Os elastômeros também são formados por correntes reticuladas, mas podem ser deformados elasticamente e retornar à sua forma original após a exposição à carga. Os termoplásticos podem ser subdivididos em amorfos e semicristalinos em função de terem uma estrutura aleatória ou ordenada, respectivamente, o que afeta suas propriedades e cor, resistência química, solubilidade, estabilidade térmica, densidade, firmeza e resistência (SARANTÓPOULOS et al., 2002; HAHLADAKIS; IACOVIDOU, 2018).

As propriedades e as aplicações dos plásticos dependem da natureza química e física do polímero, que, por sua vez, são determinadas pela natureza química dos monômeros, pela estrutura e massa molar das cadeias poliméricas, pelo grau de cristalinidade e pelo nível de interação entre as suas cadeias. Todos esses fatores afetam a densidade e as temperaturas de transição física do polímero (SARANTÓPOULOS et al., 2002).

De acordo com Sarantópoulos et al. (2002), quanto maior é a massa molar média do polímero, maior é a sua viscosidade, resistência ao *stress cracking* (falha sob tensão), resistência ao impacto, resistência à abrasão e à tração. Porém, menor é a sua processabilidade. Em contrapartida, quanto maior é a distribuição da massa molar do polímero, maior é a sua processabilidade e menor é a sua viscosidade, resistência ao *stress cracking*, resistência ao impacto e à tração.

Já em relação à cristalinidade dos polímeros, quanto maior for o seu grau de cristalinidade, maior é a sua densidade, rigidez, resistência à tração, resistência à compressão, opacidade e temperatura de selagem. Por outro lado, menor é a sua permeabilidade, transparência, resistência ao rasgamento, resistência ao impacto, alongamento e faixa de selagem (SARANTÓPOULOS et al., 2002).

Os polímeros não apresentam temperaturas de mudança de estados físicos bem definidas, como o que ocorre com a água. Além disso, a sua evaporação não é possível, pois a temperatura necessária para esta mudança de estado seria tão alta que causaria a decomposição térmica do material (SARANTÓPOULOS et al., 2002).

As embalagens de plástico são geralmente feitas de resinas termoplásticas. O conjunto de propriedades reológicas, mecânicas e estruturais dos materiais de embalagens plásticas produzidos pode variar amplamente, dependendo do tipo de polímero utilizado.

O **Quadro 1** apresenta as principais características dos termoplásticos mais utilizados na produção de embalagens plásticas (HAHLADAKIS; IACOVIDOU, 2018).

Quadro 1 – Principais características dos termoplásticos mais utilizados em embalagens.
Fonte: Adaptado de HAHLADAKIS; IACOVIDOU, 2018.

<i>Tipo de plástico</i>	<i>Características e propriedades</i>	<i>Aplicações</i>
PET	Material semicristalino, de alta densidade, muito duro, muito resistente, forte, e rígido, tem propriedades de fricção de deslizamento muito boas, boa estabilidade, altamente rígido com comportamento quebradiço em temperaturas abaixo de zero, com boa estabilidade térmica, expansão térmica mínima, sensibilidade à água quente e vapor, condutividade térmica relativamente alta, baixa condutividade elétrica, boas propriedades de isolamento, resistência alta ao desgaste e baixa absorção de umidade.	Muito conhecido como substituto do vidro em garrafas de bebidas, devido à sua estabilidade dimensional, força e resistência a produtos químicos; amplamente utilizado em aplicações de embalagens de alimentos e cuidados pessoais, pois possui excelente barreira aos sabores e geralmente é transparente.
PEAD	Características semicristalinas, translúcidas, de baixa densidade e dureza, com propriedades de resistência e rigidez baixas, baixa estabilidade térmica e alta expansão térmica, alta condutividade térmica, baixa condutividade elétrica, propriedades de isolamento relativamente boas e resistência ao desgaste e absorção de umidade muito baixa.	Pode ser uma barreira ruim para oxigênio e outros gases, odores e sabores, mas é normalmente usado em sacolas de consumo e bandejas para embalagens de alimentos congelados, além de filmes para uma extensa variedade de usos.
PVC	Material amorfo, opticamente transparente, de alta densidade, duro e quebradiço que é resistente, relativamente forte e rígido com propriedades de fricção e de deslizamento muito boas, estabilidade dimensional muito boa, baixa estabilidade, condutividade e expansão térmicas, baixa condutividade elétrica, boas propriedades de isolamento, boa resistência ao desgaste e absorção de umidade muito baixa.	Utilizado em embalagens para produtos farmacêuticos e cápsulas.
PEBD	Semicristalino, translúcido, com características de baixa densidade e dureza, muito resistente (sem rupturas), mas de baixa resistência, rigidez e estabilidade térmica, sem condutividade térmica, alta expansão térmica, baixa condutividade elétrica, propriedades de isolamento relativamente boas, baixa absorção de umidade, fraca resistência química e ao desgaste.	Não é prático para recipientes rígidos e embalagens flexíveis, além de não ser recomendado para produtos oleosos. Utilizado em tubos e garrafas compressíveis, embalagens e sacolas, recipientes para alimentos congelados, material de revestimento para garrafas.
PP	Semicristalino, baixa densidade, material com melhor resistência, dureza, rigidez, com sensibilidade em temperaturas abaixo de zero, baixa condutividade térmica e elétrica, propriedades de isolamento relativamente boas, alta resistência ao desgaste e absorção de umidade baixa.	Possui a menor densidade de todos os termoplásticos, além de excelente resistência à fadiga, o que o torna atraente em aplicações de recipientes de alimentos expostos a altos níveis de temperatura e estresse químico e em fechos de embalagens diversas.
PS	Amorfo, opticamente transparente, material de alta densidade, duro, quebradiço, muito resistente, relativamente forte e rígido, baixa estabilidade e condutividades térmica e elétrica, boas propriedades de isolamento, baixa resistência ao desgaste e absorção de umidade relativamente baixa.	É muito utilizado em recipientes de iogurte, garrafas para comprimidos e cápsulas farmacêuticas e embalagens de produtos frágeis.

3.3. Embalagens mistas flexíveis do tipo *Stand Up Pouch* (SUP)

O *Stand Up Pouch* é uma embalagem flexível que fica em pé na gôndola do supermercado. Além de proteger a qualidade e a vida útil dos produtos, esse tipo de embalagem é atrativo, facilitando a exposição da marca fabricante; também é versátil, possibilitando acondicionar todo tipo de alimento: pós, perecíveis, pastosos e líquidos. Sua utilidade é muito comum principalmente nas indústrias alimentícia, farmacêutica, de cosméticos, higiene e limpeza e de comida de animais (ABAL, 2018). Desta forma, a embalagem *Stand Up Pouch* é utilizada para acondicionar diversos produtos como: molhos, patês, frutas secas, pães, sopas, amaciantes, detergente, entre outros (LIMA, 2015; REZENDE, 2014).

De acordo com Lima (2015) e Rezende (2014), o *Stand Up Pouch* foi capaz de substituir embalagens multicamadas mais rígidas e cartonadas, que já se encontravam no mercado, devido a menor necessidade de matéria-prima em sua fabricação (em torno de 70% a 90% menos), menor necessidade de máquinas no processo e de empregados no manuseio da fabricação, maior economia no custo de armazenamento e transporte (economia de aproximadamente 25%). Tais fatores possibilitaram o barateamento do produto para o consumidor final.

O uso disseminado das embalagens tipo SUP ganhou mercado também pelo fato de gerar menos resíduo após seu descarte, e apresentar melhor segurança no transporte e acondicionamento da mercadoria, além de reduzir o espaço de armazenamento (MESTRINER, 2019; REZENDE, 2014). O desenvolvimento da embalagem com o uso de zíperes, tampas, válvulas e “bicos” também facilitou acondicionar qualquer tipo de produto e se popularizar no mercado (LIMA, 2015).

O modelo de embalagens tipo SUP pode ser adquirido pelas empresas na forma pré-formada (*Fill-Seal*) ou em bobinas (*Form-Fill-Seal*). No primeiro caso, o material já chega ao cliente no formato solicitado, restando apenas o seu carregamento com o respectivo produto e a sua selagem final. Já no segundo, faz-se necessário que o usuário tenha uma máquina para a formação, enchimento e selagem da embalagem de forma contínua (LIMA, 2015).

Existe maior vantagem na obtenção da embalagem *Stand Up Pouch* pré-formada devido à maior flexibilidade para atender os diversos produtos demandados pelas empresas.

Quando a embalagem é adquirida na forma de bobinas, há um aumento na produtividade e menor custo por embalagem. Entretanto, neste caso, há menor flexibilidade de troca de tamanhos e formatos e há maiores perdas do material ao se tratar de pequenas produções (LIMA, 2015).

3.4. Avaliação do ciclo de vida das embalagens flexíveis

A avaliação do ciclo de vida é uma técnica que estuda tanto os aspectos ambientais quanto os impactos potenciais positivos e negativos associados à vida de um produto, desde a extração da matéria-prima para fabricá-lo até a sua destinação final. Essa avaliação pode ser aplicada com as seguintes finalidades: desenvolvimento e melhoria de um produto; marketing ecológico responsável; indicadores de sustentabilidade; definição de planejamento estratégico; e gestão de impactos ambientais (ISO 14040, 1997).

Desde antes de sua fabricação até a destinação final, o produto passa por diversas etapas, como o processamento da matéria-prima, a produção do produto, a sua distribuição (que envolve a embalagem, transporte e estocagem), a utilização pelo consumidor e o seu descarte. Nesta última etapa, há variadas opções acerca do seu destino, de maneira que é possível realizar a restauração da funcionalidade do produto (em sua totalidade ou parcialmente), utilizá-lo de maneira a recuperar sua energia, seja através da reciclagem, compostagem ou incineração, e, por fim, há a possibilidade de descartá-lo em aterros, não recuperando ou explorando seu potencial (RIBEIRO, 2014).

No âmbito do desenvolvimento e melhoria do produto, uma das finalidades da avaliação do ciclo de vida o *“life cycle design”* ou projeto de ciclo de vida objetiva modificar ou melhorar o processo do ciclo de vida dos produtos de maneira racional, integrando a orientação ambiental no projeto e no processo produtivo. Pode-se afirmar, portanto, que as prioridades no projeto de ciclo de vida de um produto devem ser a minimização de recursos, a extensão da vida do produto (quando aplicável), a escolha de materiais de baixo impacto ambiental e o menor gasto energético na fabricação (RIBEIRO, 2014).

A economia circular visa alcançar uma mudança em direção às práticas mais sistematizadas, com o auxílio de certificações em prol da sustentabilidade, de maneira que seja possível o fechamento do ciclo ou círculo dos produtos e dos processos produtivos. Aspectos técnicos, como padrões de estilo de vida e comportamentos,

barreiras organizacionais e de infraestrutura, composição e funcionalidade, frequentemente não são considerados ao planejar a mudança. No entanto, são esses aspectos técnicos que controlam, em grande parte, a transição bem-sucedida de uma economia linear para uma circular, como a capacidade de materiais, componentes e produtos serem adequadamente recuperados e redistribuídos para reutilização, reciclagem ou recuperação (HAHLADAKIS; IACOVIDOU, 2018).

A reciclagem de um produto é uma maneira de reaproveitar o seu potencial e estender a sua vida, dando origem a novos produtos, mesmo que de qualidade um pouco inferior. Apesar de produzir impactos ao meio ambiente, a reciclagem também traz grandes benefícios ao evitar o descarte em aterros de produtos sem antes reaproveitá-los (RIBEIRO, 2014).

Vidro, metais, papel e plásticos são materiais que possibilitam uma forma circular de gestão devido ao seu alto potencial de reciclabilidade. Devido à sua natureza leve, flexibilidade e durabilidade, os plásticos são muito eficazes como embalagens. No entanto, a curta vida das embalagens plásticas cria uma grande demanda na coleta e reciclagem desse material, tanto para sua recuperação e redistribuição na cadeia produtiva, quanto para proteger o meio ambiente de seu descarte inadequado (HAHLADAKIS; IACOVIDOU, 2018).

Apesar do alto potencial de reciclabilidade dos plásticos, apenas uma pequena porcentagem (aproximadamente 14%) é reciclada, atualmente, em escala global. Essa pequena taxa está associada, principalmente, aos aspectos de qualidade, que podem mudar em diferentes estágios do ciclo de vida dos materiais plásticos. No entanto, essas mudanças podem não estar associadas apenas às alterações nas propriedades dos materiais, mas, também, na forma como são coletados, manuseados e segregados, podendo existir a contaminação por outros materiais quando acondicionados juntos. Além da contaminação, a perda de qualidade dos materiais pode ser ocasionada pela mudança das propriedades reológicas, mecânicas e estruturais no reprocessamento, que condicionam na degradação (HAHLADAKIS; IACOVIDOU, 2018).

A reciclagem em cascata (reciclagem do produto até o ponto de degradação ou inutilização) de embalagens de plástico reciclado para produtos de menor qualidade é frequentemente promovida como a opção ideal para recuperar seu valor, especialmente quando ocorre contaminação ou degradação do produto em si ou de seus componentes.

No entanto, se houver uma maneira mais sistematizada de capturar e manusear embalagens de plástico pós-consumo, pode ser possível aumentar a qualidade do produto reciclado, possibilitando tanto a extensão do ciclo de vida quanto o fechamento do ciclo. Ainda que não seja viável a reciclagem de todos os tipos de plástico, para os quais essa opção seja possível, a reciclagem em circuito fechado apresenta uma oportunidade para recuperar seu valor e possibilitar o manejo sustentável. (HAHLADAKIS; IACOVIDOU, 2018).

Apesar da reciclagem das embalagens plásticas flexíveis ainda ser pouco explorada, a busca pelo maior uso dessa categoria de embalagens é motivada pelo fato de a avaliação do seu ciclo de vida apresentar uma eficiência muito maior quando comparada à de embalagens mais rígidas (de plástico, papel, metal ou vidro), resultando em menor potencial de aquecimento global, menor uso de energia e espaço ocupado em aterros sanitários (NIAOUNAKIS, 2020).

O autor Niaounakis (2020) ressalta que foram realizados seis estudos com embalagens flexíveis do tipo *Stand Up Pouch* que acondicionam diferentes produtos alimentícios, a fim de compará-las com embalagens rígidas, em outros formatos e materiais, tais como latas de metal, garrafas de PET, PEAD (polietileno de alta densidade) e de vidro, recipientes rígidos de PET, papel cartão, entre outras. Em suma, as embalagens flexíveis apresentaram melhores atributos ambientais ao se tratar das emissões dos gases do efeito estufa, do uso de combustíveis fósseis e água, da relação de material-produto e da quantidade de material que se destina aos aterros sanitários.

Outro estudo, realizado pela empresa *Flexible Packaging Europe* (FPE) (2020), afirmou que as embalagens de *Stand Up Pouch* feitas de um laminado de plástico flexível e filme de metal são mais sustentáveis em termos de emissões gerais de gases de efeito estufa, quando comparadas com copos e latas de metal para acondicionamento de produtos deatum. No geral, de acordo com Niaounakis (2020), estudos de ciclos de vida de embalagens flexíveis mostraram que estas apresentam uma performance no quesito de características ambientais tão boa quanto, ou até melhor, que alternativas rígidas de plástico, fibra, vidro ou metal, o que mostra o potencial a ser explorado no sentido de recuperar tais embalagens de maneira a fechar o ciclo corretamente, evitando o seu descarte incorreto.








3.5. Reciclagem das embalagens flexíveis

De acordo com a lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), seus principais objetivos são: “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”. Dessa forma, as embalagens do tipo *Stand Up Pouch*, como todas as embalagens, devem atender vários requisitos nessa legislação, entre eles, a exigência da redução de recursos naturais, como energia, água e matéria-prima para a fabricação dos produtos, e ter uma logística reversa implantada (REZENDE, 2014).

De acordo com o Art. 3º do Capítulo II da PNRS, “reciclagem é o processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e, se couber, do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS) e do Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária (SUASA)”.

Para que seja possível realizar a reciclagem, é necessário que os produtos sejam devidamente identificados e separados por tipo de material. A norma NBR 13.320 de 2008 (Simbologias Indicadas na Reciclabilidade e Identificação de Plásticos) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) criou uma série de códigos que são aplicados nas embalagens plásticas dos produtos para facilitar a identificação e sua separação, conforme o **Quadro 2**.

Quadro 2 – Códigos aplicados às embalagens plásticas para identificar e indicar o tipo de material e sua reciclabilidade. Fonte: Adaptado de ABRE, 2013 e PIVA; WIEBECK, 2004.

 <p>PET</p>	<p>Poli(tereftalato de etileno) – é utilizado em garrafas e recipientes de bebidas e óleos; fibras sintéticas; filmes metalizados; chapas de raio-x; peças injetadas, entre outros.</p>
 <p>PEAD</p>	<p>Polietileno de alta densidade – é utilizado em engradados de bebidas; produtos químicos e utensílios domésticos; garrafas de álcool; tubos e bombonas; e em embalagens diversas.</p>
 <p>PVC</p>	<p>Poli(cloreto de Vinila) – muito utilizado em tubulações e conexões para água; em bolsas de sangue; calçados e bolsas; brinquedos como bolas e bonecas; lonas, entre outros.</p>
 <p>PEBD</p>	<p>Polietileno de baixa densidade – utilizado com frequência em embalagens para alimentos; sacos industriais e de lixo; filmes no geral.</p>
 <p>PP</p>	<p>Polipropileno – muito utilizado em embalagens e potes para margarinas, massas e biscoitos; utilidades domésticas em geral; seringas descartáveis; fibras e tecidos, etc.</p>
 <p>PS</p>	<p>Poliestireno – utilizado em copos descartáveis; cabines de aparelhos eletrônicos; e embalagens em geral.</p>
 <p>OUTROS</p>	<p>Polímero não indicado anteriormente – outro tipo de polímero ou a combinação de dois ou mais polímeros na mesma composição.</p>

As principais resinas termoplásticas que compõe as embalagens plásticas são o poli(tereftalato de etileno) (PET) (conhecido como tipo 1); o polietileno de alta densidade (PEAD) (conhecido como tipo 2); o cloreto de polivinila (PVC) (conhecido como tipo 3); o polietileno de baixa densidade (PEBD) (conhecido como tipo 4); o polipropileno (PP) (conhecido como tipo 5); o poliestireno (PS) (conhecido como tipo 6); e outros (conhecidos como tipo 7). A última categoria inclui as multicamadas (mais de um tipo de componente plástico) e outros plásticos que geralmente não são coletados para reciclagem. O resto dos tipos de plástico podem ser coletados, separados e, então, mecanicamente ou quimicamente reprocessados e utilizados como matéria-prima na fabricação de novos produtos (HAHLADAKIS; IACOVIDOU, 2018).

De acordo com Rezende (2014), para as embalagens flexíveis multicamadas, isto é, que são compostas por mais de um tipo de plástico, as empresas podem colocar o símbolo do plástico predominante da composição da embalagem ou do plástico que se inicia o processo da reciclagem. No entanto, o que ocorre, muitas vezes, é que a simbologia utilizada é a de “outros” (tipo 7), o que não permite uma fácil e rápida identificação de sua composição.

A reciclagem pode ocorrer de forma mecânica, química, biológica ou energética. Na reciclagem mecânica, processos físicos estão envolvidos e, na química, tem-se a degradação do plástico e obtenção de oligômeros ou monômeros. Já a reciclagem biológica consiste na degradação enzimática, com temperaturas baixas e uniformes para a degradação do plástico e, na energética, o resultado é a recuperação de energia (NIAOUNAKIS, 2020; REZENDE, 2014; MANO et al., 2005).

Um dos principais benefícios da reciclagem de plásticos é a redução da necessidade de produção de novos plásticos. A recuperação energética tem o potencial de recuperar a energia da molécula polimérica, correspondente ao valor calórico. Contudo, deve-se notar que a energia de processamento necessária para produzir itens de plástico não pode ser recuperada pela reciclagem energética. Já a reciclagem mecânica tem o potencial de economizar tanto a energia de processamento quanto a energia do polímero. O benefício ecológico da reciclagem mecânica é em função da economia de energia de processamento e da energia usada para coletar, transportar e reprocessar o plástico (KAISER; SCHMID; SCHLUMMER, 2017).

A reciclagem de embalagens monocamadas, como filmes de PE, PP, PVC, entre outros, já é conhecida e tecnicamente mais solucionada, visto que várias empresas já processam estes tipos de filmes (TARTAKOWSKI, 2010). No que se refere às embalagens multicamadas, entretanto, de acordo com Toensmeier (2019) e Tartakowski (2010), apesar do seu uso estar crescendo no mundo, há um grande desafio na reciclagem deste material, em virtude de sua estrutura ser composta por uma grande variedade de materiais.

Para Tartakowski (2010) e Niaounakis (2020), os fatores que dificultam a reciclagem das embalagens multicamadas são: a ampla diferença nas propriedades dos diferentes materiais que compõem a embalagem, o que implica em condições de processamento diferenciados; a falta de sistemas de identificação de embalagens multicamadas (por exemplo, PET/PE ou PVC/PE); a inexistência de sistemas de soluções para a coleta desses materiais, o que resulta no armazenamento com outros materiais cujas características são similares; a ausência de padrões de propriedades, dificuldade de processamento e aplicações de compósitos baseados em materiais reciclados provenientes das embalagens multicamadas; e a falta de um sistema economicamente viável de segregação dos diversos materiais.

No geral, pode-se dizer que existem duas maneiras de realizar o processo prévio à reciclagem de embalagens multicamadas: a primeira é separar os diferentes componentes através de uma dissolução seletiva ou por delaminação e, a segunda, é processá-los juntos em uma única etapa. Dependendo da estrutura da multicamada, esta etapa de separação funciona de forma mais ou menos eficiente. Uma constituição de alumínio relativamente baixa em combinação com alto teor de polímero pode evitar que o alumínio seja separado, realizando a reciclagem de todas as camadas da embalagem juntas, como, por exemplo, quando a composição da embalagem é 19% de alumínio e 81% de outros plásticos (KAISER; SCHMID; SCHLUMMER, 2017). A **Figura 1** apresenta o esquema completo da etapa prévia à reciclagem.

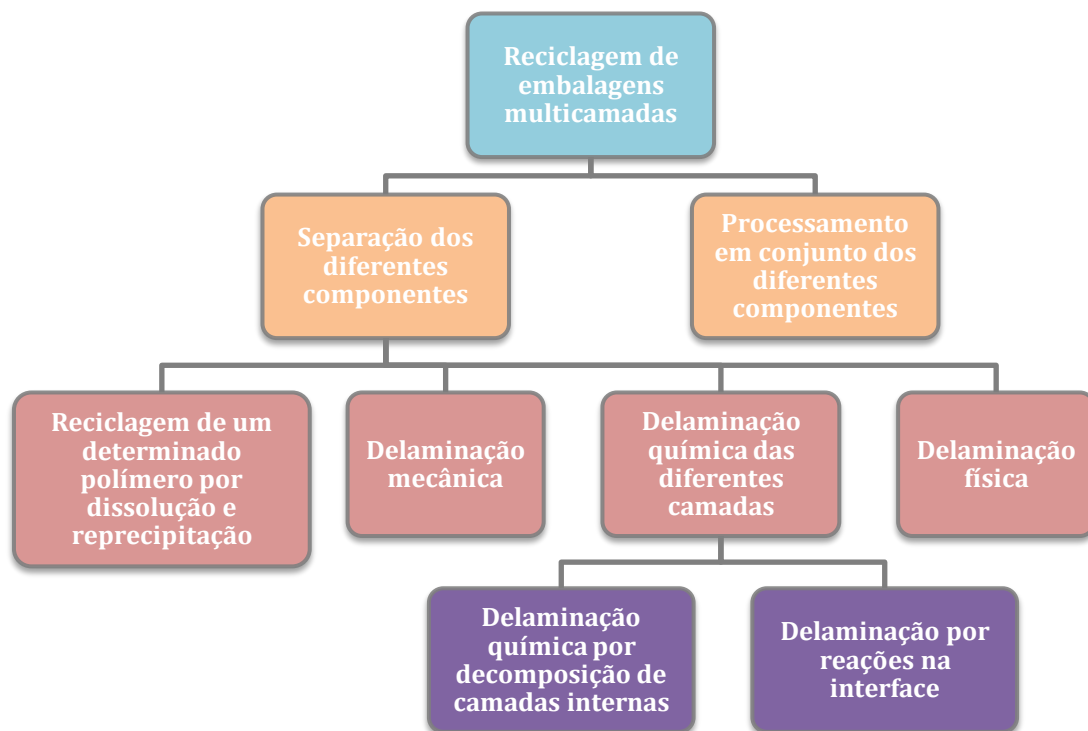


Figura 1 – Esquema completo da etapa prévia de reciclagem de embalagens multicamadas. Fonte: Adaptado de KAISER; SCHMID; SCHLUMMER, 2017.

De acordo com Toensmeier (2019), os resíduos plásticos podem ser recuperados, tratados e misturados com outros polímeros ou outro produto químico para poderem ser reutilizados. Nesse contexto, Tartakowski (2010) dedicou-se a encontrar uma solução

para a recuperação de embalagens multicamadas e atestou que é possível obter um novo compósito de materiais, fabricado a partir de filmes reciclados de múltiplas camadas. Para obter este compósito, Tartakowski (2010) realizou a reciclagem de um filme com cinco camadas de poliamida-polietileno, denominado *PAPE*. Na sequência, foi adicionada a esse material poliolefina (PO) reciclada, obtida pela mistura de polietilenos de alta e baixa densidade, PEAD e PEBD, respectivamente, e cinzas residuais provenientes da combustão de carvão em usinas. Posteriormente, os produtos compostos de *PAPE* com a poliolefina reciclada e as cinzas foram encaminhados para a extrusora e, em seguida, moldados no formato de pastilhas.

Ao término do processo, Tartakowski (2010) concluiu que as propriedades do novo material puderam ser adequadamente controladas e que o compósito modificado com polietileno apresentou boa propriedade elétrica e tribológica (resposta ao atrito entre superfícies). Já o compósito modificado com o resíduo de carvão proporcionou estabilidade em sua dimensão, o que é importante para garantir a precisão na fabricação de um produto.

Já em 2013, de acordo com Toensmeier (2019), foi desenvolvida e comercializada uma embalagem com um único material (monocamada) para facilitar a reciclagem: o *PE Stand Up Pouch*. Essa embalagem consiste em uma estrutura totalmente de polietileno que protege alimentos congelados e pode ser facilmente coletada para reciclagem nos pontos de entrega dos supermercados locais, quase inteiramente dedicados a embalagens e filmes de polietileno (PE, PEBD, PEBDL e PEAD).

Foi estudada por Teixeira (2013) a reciclagem de embalagens SUP multimateriais em comparação com outros três tipos de materiais: resinas utilizadas na confecção da embalagem SUP com adição de PEAD, PEBD e PP. Assim, o processo iniciou-se com a coleta de embalagens SUP pós-consumo e pós-industriais. Para descontaminá-las, foi realizada a etapa de lavagem e moagem do material. Em seguida, o material foi encaminhado para uma centrífuga e, desse processo, destinou-se a um tanque de decantação, no qual o material sobrenadante seguiu para a centrifugação a seco.

Após a obtenção do material seco, no caso do SUP, este foi prensado e obteve-se placas para serem utilizadas como separadores de *pallets* ou na construção civil. Já as resinas mistas (SUP com PEAD, PEBD e PP) sofreram o processo de granulação, aglutinação e extrusão (no caso de SUP com PEAD e SUP com PEBD) ou injeção (SUP com PP). Na

sequência, o material que saiu da extrusora foi imerso em uma banheira com água ambiente, a fim de endurecer a matéria-prima plástica através de um choque térmico. Por fim, o plástico resfriado foi cortado em *pellets* ou grãos para ser submetido a testes (TEIXEIRA, 2013), conforme ilustrado na **Figura 2**.

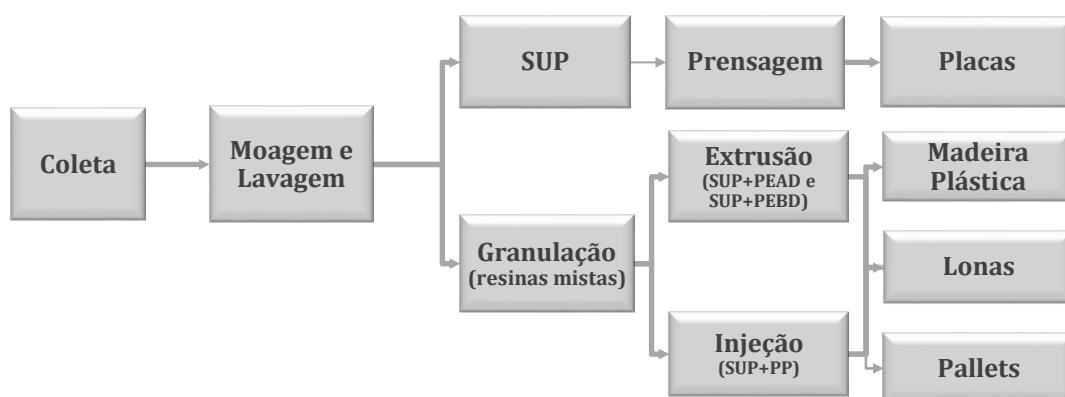


Figura 2 – Processo de reciclagem de embalagens SUP e de resinas mistas de SUP com PEAD, PEBD e PP. Fonte: Adaptado de TEIXEIRA, 2013.

Foi possível concluir que usando somente SUP podem ser produzidas placas por prensagem; já com relação às resinas mistas, a de SUP com PEAD apresentou grande aplicação na fabricação de madeira plástica, a de SUP com PEBD na produção de lonas plásticas e a de SUP com PP na obtenção de *pallets* plásticos. Dessa maneira, Teixeira (2013) comprovou que é possível realizar a reciclagem de embalagens do tipo SUP sem qualquer restrição se forem adicionados até 20% de PEAD, PEBD ou PP.

Em 2016, a empresa privada *TerraCycle*, sediada nos Estados Unidos, reciclou sacos multicamadas de batata chips, compostos por uma mistura polimérica de polipropileno e polietileno e uma fina camada de alumínio, para serem utilizados como matéria-prima para impressoras 3-D. A reciclagem dos sacos teve início com a sua coleta através do programa de reciclagem da própria empresa. Posteriormente, foram removidos os contaminantes e os sacos limpos foram triturados, comprimidos e, por fim, sofreram o processo de extrusão em *pellets* plásticos de PP com PE. Esses *pellets* foram encaminhados para a empresa parceira, *3D Brooklyn*, a qual moldou o material para obtenção de filamentos plásticos para imprimir seus próprios produtos ou vender e doar para escolas. Além disso, a *TerraCycle* utilizou parte desses *pellets* para moldar bancos

para parques, mesas de piqueniques e lixeiras plásticas recicladas (LAMONTAGNE, 2016).

Continuamente, esforços vêm sendo feitos para aumentar a reciclagem de embalagens multicamadas. O caso da empresa *Esprix Technologies of Sarasota*, descrito por Toensmeier (2019), retrata essa busca para tornar este material mais reciclável. A companhia sugeriu a adição do filme de policetona alifática em estruturas multicamadas para substituir barreiras de poliamida 6 e copolímero de etileno e álcool vinílico (EVOH). Essa resina pode ser reciclada com grande quantidade de polietileno e quanto menor a espessura do filme de polietileno na estrutura, mais reciclável é a policetona alifática.

Outro caso importante é a produção de novos *Stand Up Pouches* recicláveis, que irão substituir as embalagens laminadas com PET tradicional por estrutura de polietileno linear de baixa densidade. Esta nova embalagem traz consigo uma estrutura de fonte única, com substrato homogêneo, o que estimula sua reciclagem e reaproveitamento (LAMONTAGNE, 2016).

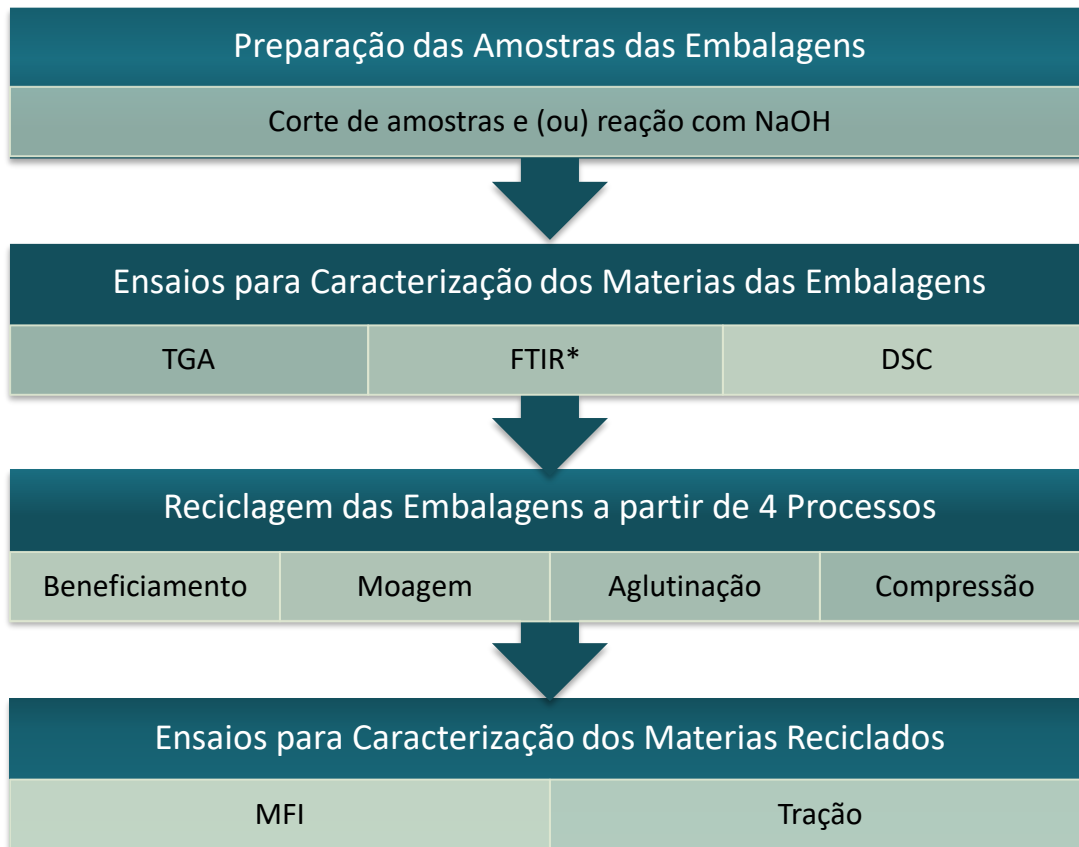
4. METODOLOGIA

Foram realizados quatro diferentes processos de reciclagem de embalagem do tipo *Stand Up Pouch*, cujos produtos foram avaliados e suas propriedades comparadas.

O trabalho constou da realização das seguintes etapas: pesquisa bibliográfica, coleta e higienização das embalagens pós-consumo, caracterização do material das embalagens, execução dos processos de moagem, aglutinação e moldagem por compressão e avaliação das propriedades das embalagens recicladas.

A revisão bibliográfica foi realizada no portal Periódicos da Capes (<http://www-periodicos-capes-gov-br.ez29.periodicos.capes.gov.br/index.php?>). Foram utilizadas as palavras-chaves embalagens mistas, embalagens multicamadas, embalagens *Stand Up Pouch*, reciclagem de embalagens mistas e/ou multicamadas, reciclagem de embalagens sachê e/ou *Stand Up Pouch*. A pesquisa foi realizada no período de janeiro de 2019 até setembro de 2020.

A metodologia das análises e processos realizados para a reciclagem da embalagem está esquematizada na **Figura 3**.



* O ensaio de FTIR foi realizado com as amostras de embalagem cortadas e submetidas à reação com NaOH, enquanto os ensaios de TGA e DSC foram realizados com as amostras cortadas diretamente das embalagens.

Figura 3 – Esquema da metodologia utilizada para o estudo da reciclagem de embalagens mistas flexíveis compostas de plásticos e alumínio. Fonte: Elaboração própria, 2020.

4.1. Material

Os materiais utilizados foram embalagens multicamadas do tipo *Stand Up Pouch* oriundas de quatro marcas diferentes, usadas especificamente para o acondicionamento de ração úmida para animais. Essas embalagens são compostas de filmes plásticos e de alumínio.

O estudo foi realizado com uma quantidade de, aproximadamente, 900 embalagens, resultando em um peso total de 2,8kg. Com a finalidade de se obter a massa média com desvio padrão, foram pesadas no total quarenta embalagens e utilizadas as Equações (1) e (2), respectivamente.

$$M_m = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n} \quad (1)$$

$$D_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - M_m)^2}{n - 1}} \quad (2)$$

Em que: M_m é a massa média; \sum é a soma de todos os termos, desde a primeira posição $i = 1$ até a posição n ; M_i é a massa da embalagem na posição i no conjunto de dados; n é o número total de embalagens pesadas; e D_p é o desvio padrão.

Após a conclusão dessa etapa, procurou-se encontrar as dimensões (altura, largura e profundidade) médias das embalagens, com seus respectivos desvios padrões. Dessa forma, as Equações (1) e (2) também foram aplicadas para a obtenção destes valores.

4.2. Equipamentos

Os equipamentos utilizados nesse trabalho encontram-se nas dependências do Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IMA-UFRJ). São eles:

- Aglutinadora da marca WEG, potência de 5,5 KW com 20 cm de diâmetro interno, 35 cm de diâmetro externo e 60 cm de altura;
- Analisador termogravimétrico (TGA) *TA Instruments*, modelo Q500;
- Balança eletrônica de precisão automática da marca GEHAKA, modelo BG-200 e erro de 0,1g;
- Béquer de plástico de 1000 ml;
- Béquer de plástico de 4000 ml;
- Bisturi de metal de cabo número 3 e lâmina tamanho 11;
- Calorímetro diferencial de varredura (DSC) *TA Instruments*, modelo Q100;
- Espectrômetro de absorção do infravermelho Nicolet Magna, modelo 750;
- Máquina de ensaios universais EMIC, modelo DL 3000;
- Máquina MFI para análise do índice de fluidez da marca DYNISCO modelo LMI4000, operando em uma faixa de temperatura de 23°C a 350°C e uma faixa de peso de 2,06 kg a 20,06 kg, segundo a norma ASTM D 1238-10;

- Moinho de facas cortantes da marca PRIMOTÉCNICA, modelo LP1003, potência de 4 kW;
- Molde quadrado metálico com 12x12 cm de largura externa e 10x10 cm de largura interna e 2 mm de espessura;
- Pressas hidráulicas de bancada da marca CARVER, operando em uma faixa de temperatura entre 23°C a 280°C; Modelo B & C, 10900 kg (24000 lb), prato 15x15 cm².

Foram utilizados também em todo o procedimento laboratorial os equipamentos de proteção individual (EPIs), tais como jaleco, óculos de proteção, protetor auricular e luvas.

4.3. Caracterização dos materiais das embalagens

Na preparação para a etapa de caracterização dos materiais das embalagens *Stand Up Pouch*, foram selecionadas três embalagens de diferentes marcas, denominadas de Embalagem 1, 2 e 3. Para cada uma, foi retirada uma amostra na dimensão de 1x1 cm. Posteriormente, as amostras foram introduzidas em solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 4% (COSTA *et al.*, 2006), durante aproximadamente 8 dias, até realizar a separação dos filmes plásticos e do alumínio, presentes nas amostras. Após a reação da camada de alumínio com o NaOH, obtiveram-se dois tipos de filmes plásticos para cada amostra: um com a impressão da embalagem (filme externo) e outro mais interno (filme interno), totalizando seis amostras de filmes plásticos, que foram lavados em água corrente, secos e encaminhados para as análises de caracterização do material.

Para a realização da caracterização das amostras plásticas, foram realizadas: a análise termogravimétrica (TGA), espectrometria no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e análise térmica de varredura (DSC). Nesse trabalho, procurou-se compilar os resultados da análise termogravimétrica com a FTIR e DSC a fim de identificar as características do material estudado.

4.3.1. Análise termogravimétrica

De acordo com Canevarolo Junior (2007), Ionashiro (1980), Wendlandt (1986) e Haines (1995), a análise termogravimétrica (TGA) é uma técnica, cuja função é avaliar as propriedades físicas de uma substância em função da temperatura sob um ambiente específico e controlado. A análise TGA teve como objetivo avaliar a variação da massa

das amostras de três embalagens SUP distintas com o aumento da temperatura para determinação da decomposição térmica do material. As condições deste ensaio foram: atmosfera de nitrogênio (N₂) e temperatura inicial ambiente até cerca de 680 °C. Basicamente, o teste iniciou com o aquecimento na taxa de 10 °C/min. As transformações do material foram computadas pelo transdutor, que foi responsável por enviar um sinal elétrico à unidade controladora por meio de um amplificador de sinais. Esta unidade, além de estar conectada diretamente com a célula de medida e receber os seus dados, possui uma interface a um computador que fez as análises dos dados e registrou a curva termoanalítica gerada (CANEVAROLO JUNIOR, 2007).

4.3.2. Ensaio por espectrometria no infravermelho por transformada de Fourier

Foram caracterizadas as três embalagens tipo *Stand Up Pouch*, cujos filmes plásticos da parte externa e interna da embalagem foram analisados por Espectrometria no Infravermelho por Transformada de Fourier. As seis amostras foram analisadas em um espectrômetro de absorção na região do infravermelho da marca Nicolet Magna 750 com transformada de Fourier e com varredura de 4000 a 400 cm⁻¹. As amostras foram prensadas na forma de pastilhas, misturadas com brometo de potássio (KBr).

A análise por FTIR permite a caracterização química dos grupos funcionais das amostras e, conseqüentemente, a identificação de sua estrutura química. Os grupos funcionais foram obtidos a partir de bandas características de absorção com diferentes modos vibracionais (CANEVAROLO JUNIOR, 2007).

4.3.3. Calorimetria diferencial de varredura

O ensaio de calorimetria diferencial de varredura (DSC) teve como objetivo verificar as temperaturas de fusão (T_f) das amostras de plásticos. Vale mencionar que cada plástico tem sua T_f característica. As condições desse ensaio foram: atmosfera de nitrogênio (N₂), faixa de temperatura de 30 °C a 200 °C e taxa de aquecimento e resfriamento de 10 °C/min.

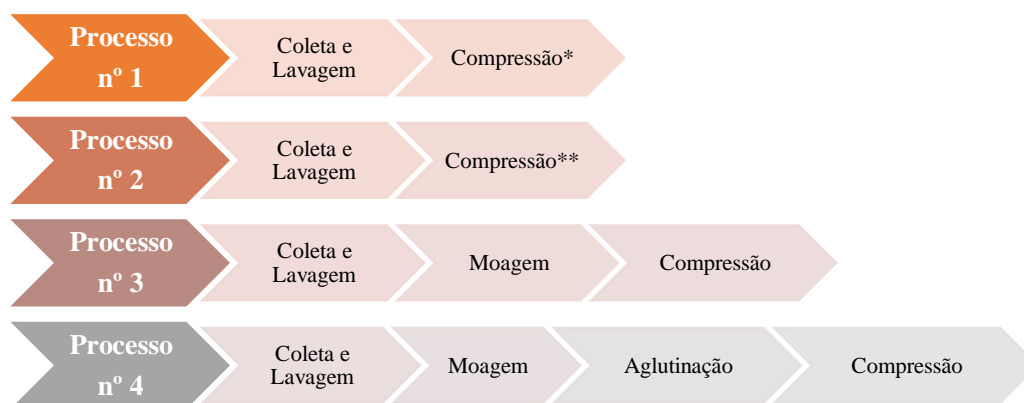
No procedimento de DSC, a amostra a ser analisada e a amostra de referência foram aquecidas pela mesma fonte de calor sob uma temperatura controlada. O calor é transferido para as amostras via disco termoelétrico e a diferença de temperatura entre

ambas é verificada através de termopares ligados à fonte de calor (CANEVAROLO JUNIOR, 2007).

No presente trabalho, as amostras sofreram, primeiramente, um aquecimento seguido de resfriamento e, por fim, novamente um aquecimento final. Os resultados foram compilados a partir das duas últimas etapas do processo.

4.4. Processos de reciclagem e suas etapas

Para fins comparativos, a reciclagem do material foi realizada a partir de quatro processos. A **Figura 4** mostra a descrição das etapas que foram desenvolvidas para cada processo estudado neste Trabalho de Conclusão de Curso.



* Neste processo, a compressão da embalagem foi realizada na embalagem como recebida.

** Neste processo, primeiramente, a embalagem foi invertida e a camada interna foi colocada para fora para a realização da compressão.

Figura 4 – Esquema das quatro diferentes formas estudadas da reciclagem de embalagens mistas flexíveis compostas de plásticos e alumínio. Fonte: Elaboração própria, 2020.

Todos os processos possuem duas etapas em comum: o beneficiamento, que consiste na coleta e lavagem do material, e a moldagem, que foi realizada por compressão sob temperaturas quente e fria para a conformação de placas.

No primeiro processo estudado, foi realizada a compressão direta das embalagens beneficiadas: as embalagens inteiras de sachês foram colocadas diretamente nas placas metálicas com espaçador de 2 mm e prensadas.

O segundo processo foi realizado de maneira semelhante ao primeiro, mas as embalagens foram dispostas ao avesso na placa metálica, com o lado de alumínio virado para fora, e foram prensadas.

No terceiro processo, após o beneficiamento, foi realizada a moagem das embalagens, com o objetivo de adquirir um tamanho menor para serem, posteriormente, moldadas sob compressão.

No quarto e último processo, após o beneficiamento e moagem, as embalagens sofreram o processo de aglutinação, a fim de aumentar a sua densidade aparente e diminuir o volume do material, para serem encaminhadas ao processo de compressão.

Após a realização da etapa de compressão em todos os processos, foram obtidas placas com dimensões aproximadas de 10x10 cm e 2 mm de espessura e foram cortados de cinco a sete corpos de prova para a avaliação das propriedades mecânicas através da realização de ensaio sob tração.

4.4.1. Coleta e lavagem – beneficiamento

Foram coletadas embalagens multicamadas tipo *Stand Up Pouch* pós-consumo durante quatro meses, de outubro de 2018 até janeiro de 2019, resultando em, aproximadamente, 2,8 kg totais de material. As embalagens foram lavadas com água à temperatura ambiente e detergente, à medida que foram coletadas.

4.4.2. Moagem

Para os processos 1 e 2, nos quais as embalagens não foram moídas e, sim, diretamente prensadas, foram separados, aproximadamente, 0,9 kg do material total. Portanto, para o terceiro e o quarto processos, foram moídos, aproximadamente, 1,9 kg do material total. A **Figura 5** mostra o moinho de facas que foi utilizado nesta etapa.

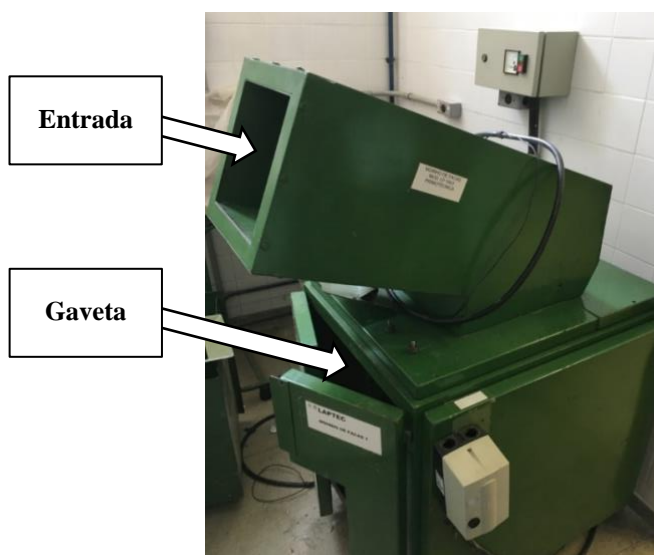


Figura 5 – Moinho de facas utilizado para a moagem do material. Fonte: Fotografia realizada por Bruna Dalmacio, 2019.

As embalagens foram depositadas na entrada do moinho, que tem três lâminas cortantes, tendo por objetivo obter pedaços menores. O material moído foi direcionado para um coletor, localizado na gaveta abaixo das lâminas, e recolhido ao término desta etapa.

4.4.3. Aglutinação

Parte do material moído foi então encaminhado para a etapa de aglutinação do processo 4 e o equipamento utilizado está apresentado na **Figura 6**. O processo de aglutinação consiste no tratamento termomecânico com a finalidade de aumentar a densidade aparente, facilitando processos posteriores do material.

Por não ser possível adicionar todo o material de uma única vez na máquina, a aglutinação foi realizada em três vezes, utilizando, aproximadamente, 0,4 kg em cada uma.



Figura 6 – Fotografias de a) Vista geral do equipamento aglutinador utilizado para aglutinar as embalagens moídas; b) Vista dos rotores do equipamento e c) Vista do material sendo aglutinado dentro do equipamento. Fonte: Fotografias realizadas por Bruna Dalmacio, 2019.

O material moído foi depositado na entrada do aglutinador e, após ser fechado com uma tampa e acionado, o rotor girou, provocando a rotação das embalagens moídas que, em contato com a parte metálica (rotor e paredes) do equipamento, promoveram um aumento da temperatura do material devido ao cisalhamento. O aglutinador operou nas três vezes em torno de 35 minutos em cada. O tempo de operação foi definido pelo contato com a máquina, de modo a sentir o aumento da temperatura pelo tato. Ao final, o material aglutinado foi removido com auxílio de ar comprimido pela saída lateral na parte de baixo do equipamento.

4.4.4. Compressão

A compressão consiste em dispor o material em um molde metálico e prensá-lo, obtendo placas para o corte de corpos de prova a serem submetidos a ensaios mecânicos. Dessa

forma, essa etapa foi realizada para obter placas a partir dos quatro processos de reciclagem das embalagens.

A prensagem sob compressão do material foi realizada em dois procedimentos, em prensa sob aquecimento e, posteriormente, em prensa resfriada por água a temperatura ambiente (**Figura 7**).



(a)



(b)



(c)

Figura 7 – Fotografias de a) Prensa quente com aplicação de pressão manual; b) Prensa refrigerada à água e c) Molde metálico com material aglutinado disposto, antes de ser prensado. Fonte: Fotografias realizadas por Bruna Dalmacio, 2019.

Primeiramente, as embalagens pós-consumo inteiras (processos 1 e 2), moídas (processo 3) ou aglutinadas (processo 4), foram dispostas em moldes metálicos, sob a forma de placa, de 10 cm de comprimento por 10 cm de largura e espaçador de 2 mm de espessura. Em seguida, os moldes foram submetidos à prensa aquecida a uma temperatura de 260°C

sob pressão de 3500 Psi, durante 5 a 6 minutos. Foi realizada a compressão, depois descompressão e, então, compressão novamente. Esse processo foi realizado visando comprimir e retirar eventuais bolhas de ar presentes nos moldes.

Posteriormente, as placas foram rapidamente retiradas do equipamento, com o auxílio de luvas, e colocadas na prensa resfriada à água, na qual foi aplicada manualmente a mesma pressão. A água em temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) resfriou as placas metálicas e o material contido nos moldes metálicos, por, aproximadamente, 3 minutos.

Após este procedimento, foi verificado que, ainda assim, algumas placas apresentavam bolhas e fendas. Por esta razão, foi realizada a remoldagem para todos os processos, que consistiu em dispor duas placas de mesmo material já confeccionadas juntas em apenas um molde, submetendo-o a compressão novamente, a fim de se obter um produto mais homogêneo e sem falhas.

4.5. Caracterização dos materiais reciclados

As embalagens pós-consumo, processadas de quatro maneiras, foram avaliadas quanto ao índice de fluidez e quanto as suas propriedades mecânicas, possibilitando a comparação entre os processos estudados.

4.5.1. Índice de fluidez (MFI)

O índice de fluidez (em inglês *Melt Flow Index*, MFI) pode ser definido como a taxa de fluxo mássico do polímero através de um capilar específico em condições controladas de temperatura e pressão, sendo determinado através de medidas da massa do material fundido, que escoar pelo capilar em determinado intervalo de tempo (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2010).

O ensaio foi realizado com amostras de, aproximadamente, 3g de material moído e de material aglutinado, segundo a norma ASTM D 1238-10. As condições para a realização deste procedimento foram temperatura de 190 °C e massa de 2,16 kg. Também foram testadas outras condições para verificar a fluidez dos materiais estudados. O tempo estimado pela máquina de plastificação para essas condições foi de 240 segundos.

4.5.2. Ensaio de resistência à tração

As placas obtidas ao final de cada um dos quatro processos foram cortadas em corpos de prova, para serem submetidos ao ensaio de resistência à tração com a finalidade de conhecer as respectivas tensões máxima (ou a resistência à tração) e na ruptura, a deformação máxima e o módulo de elasticidade. Foram realizadas tentativas de corte para obtenção de amostras dos corpos de prova segundo a norma ASTM D638-10, que não foram satisfatórias. Optou-se, portanto, por atender à norma ASTM D882-12 e os corpos de prova foram cortados manualmente, com o auxílio de bisturi e tesoura, em tiras de 1 cm de largura e 10 cm de comprimento. No total, foram obtidos de cinco a sete corpos de prova para cada placa.

Os parâmetros do ensaio de tração utilizados, segundo a norma ASTM D882-12, foram: velocidade de ensaio de 10 mm/min, célula de carga de 500 kgf (o equivalente a aproximadamente 5 kN), distância entre as garras de 50 mm, tempo mínimo de ensaio de 30 segundos e tempo máximo de 4 minutos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes de iniciar a caracterização dos materiais das embalagens, foram calculadas as médias aritméticas das massas e das medidas das embalagens com seus respectivos desvios padrão. Utilizando as Equações (1) e (2), descritas anteriormente, foram obtidos os valores de 3,1 g de massa média com desvio padrão de 0,2 g e 9,0 cm x 14,0 cm de dimensões médias com desvio padrão de 0,3 cm.

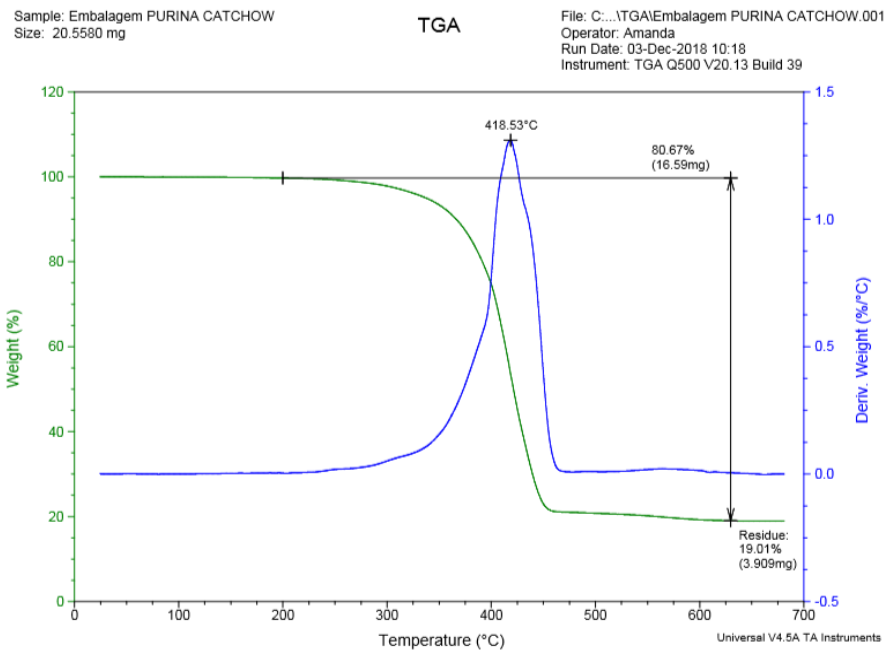
5.1. Caracterização dos materiais das embalagens

A caracterização dos materiais foi realizada com o objetivo de especificar a composição das embalagens *Stand Up Pouch* estudadas, visto que continham o código de identificação e reciclabilidade de número 7 (outros – polímero não indicado). Dessa forma, foi necessário realizar os ensaios de TGA, FTIR e DSC.

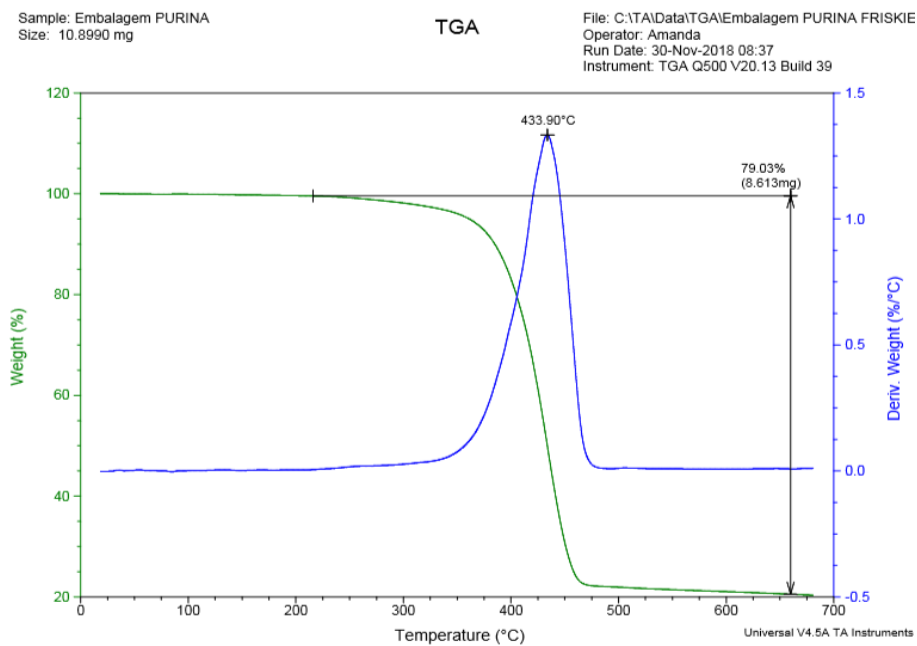
5.1.1. Análise termogravimétrica (TGA)

Foram realizadas análises termogravimétricas em três amostras de embalagens *Stand Up Pouch*, considerando todas as suas camadas, para a identificação dos plásticos que as

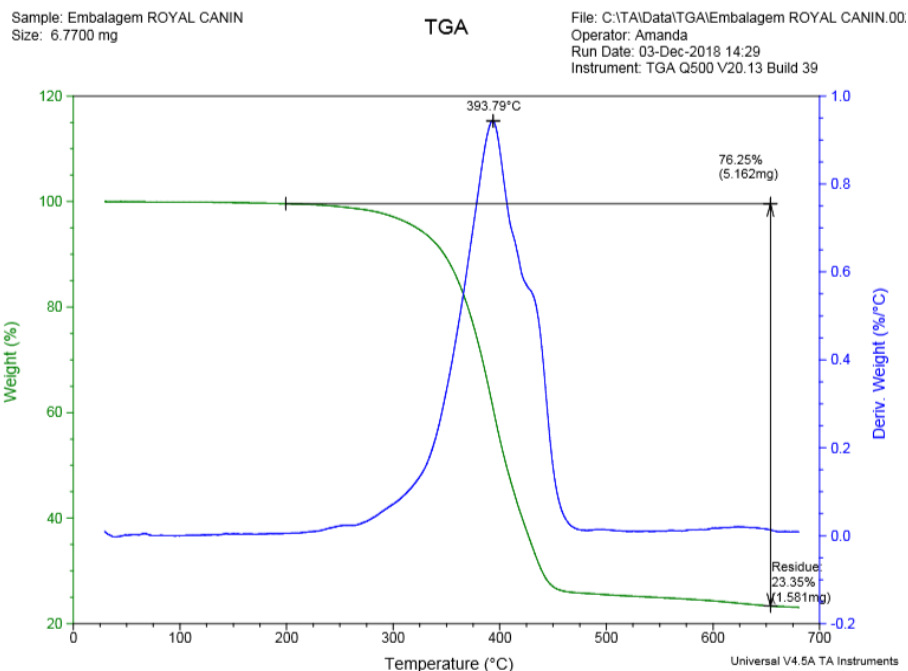
compõe. A **Figura 8** e a **Tabela 1** apresentam os resultados para as três amostras de embalagens analisadas: Embalagem 1, Embalagem 2 e Embalagem 3.



(a)



(b)



(c)

Figura 8 – Curvas obtidas por análise termogravimétrica para: a) Embalagem 1; b) Embalagem 2 e c) Embalagem 3.

Tabela 1 – Resultados das análises termogravimétricas para cada amostra. Fonte: Elaboração própria, 2020.

Amostra de embalagem	Temperatura máxima de degradação térmica (1º pico)	Temperatura máxima de degradação térmica (2º pico)	Porcentagem de plástico presente na embalagem	Porcentagem residual presente na embalagem
1	418,5 °C	440 °C	81,0 %	19,0 %
2	433,9 °C	-	80,0 %	20,0 %
3	393,8 °C	445 °C	76,6 %	23,4 %
Média			79,2 %	20,8 %

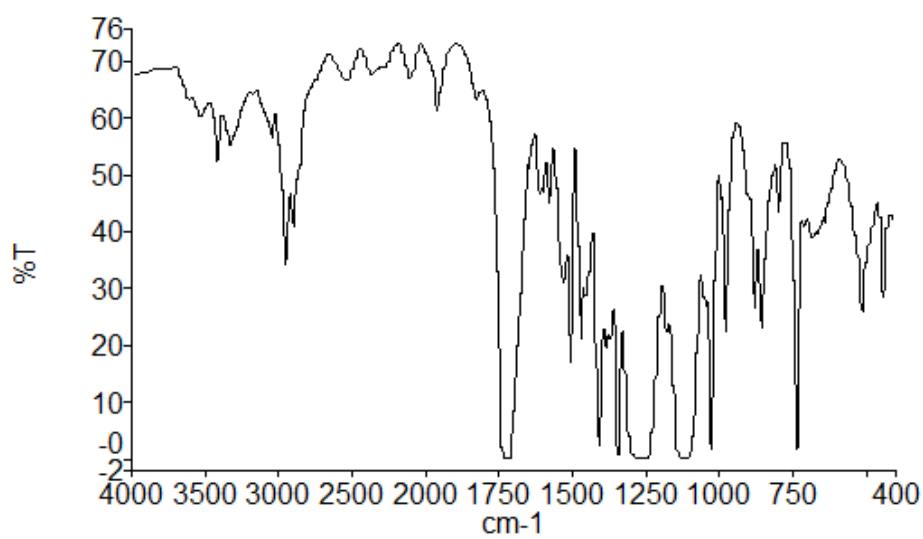
As amostras das Embalagens 1 e 3 apresentaram mais de um pico (ombro) de degradação além do pico principal, o que indica a presença de mais de um tipo de plástico em sua composição.

De acordo com a literatura, o PET geralmente tem pico de degradação por TGA em torno de 390°C a 430°C (BANNACH *et al.*, 2011), e o PP em torno de 430°C a 470°C (GRISA

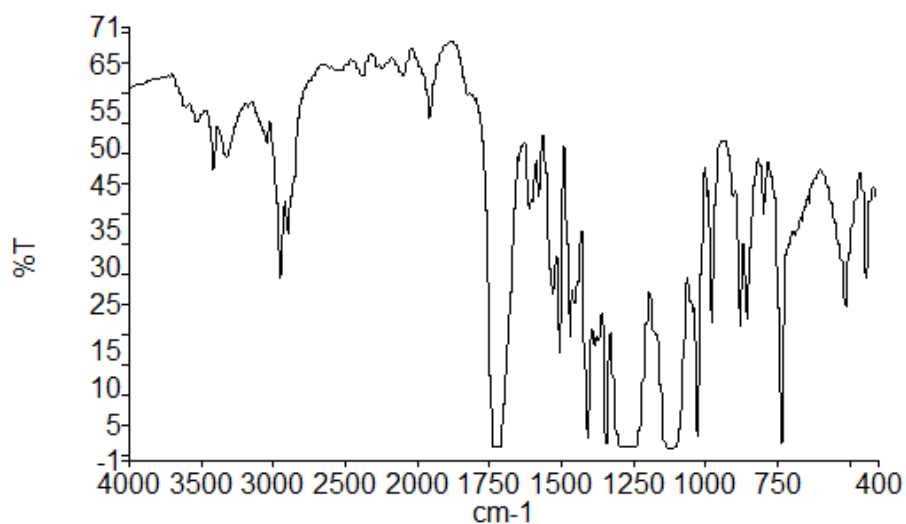
et al., 2005). Dessa forma, sugere-se que esses dois materiais, PET e PP, possam estar presentes nessas embalagens estudadas.

5.1.2. Ensaio por Espectrometria no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Neste ensaio, os filmes plásticos foram analisados separadamente após separação com a solução de hidróxido de sódio (NaOH), como comentado no capítulo de metodologia. A **Figura 9** mostra as análises por FTIR dos filmes que compõem a parte externa das três amostras de embalagens estudadas (Embalagem 1, Embalagem 2 e Embalagem 3).



(a)



(b)

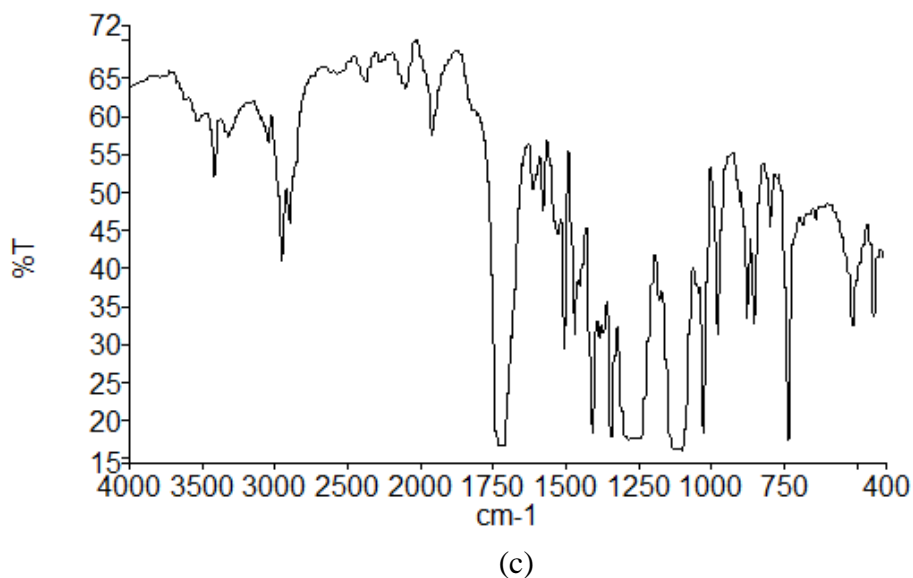


Figura 9 – Espectro por FTIR dos filmes plásticos externos das embalagens do tipo sachê estudadas: a) Da embalagem 1; b) Da embalagem 2 e c) Da embalagem 3.

Os filmes externos das três amostras, que receberam a impressão da embalagem, mostraram ter a mesma constituição química, pois seus espectros são semelhantes. Os principais picos estão apresentados na **Tabela 2**. Os filmes mostraram resultados análogos aos encontrados por Pereira *et al.* (2017), semelhantes ao espectro do poli(tereftalato) de etileno (PET).

Tabela 2 – Picos por FTIR dos filmes plásticos externos da embalagem tipo sachê. Fonte: Elaboração própria, 2020.

Comprimento de onda (cm^{-1})	Especificação
2900 – 3100	Estiramento C – H
1700 – 1800	C = O, éster
1500 – 1600	C = C, aromático
1450 – 1500	CH ₂
1300 – 1370	CH ₂
1240 – 1250	C – O, éster
800 – 900	CH, aromático

A **Figura 10** mostra as análises por FTIR das amostras de embalagens (Embalagem 1, Embalagem 2 e Embalagem 3) dos três filmes plásticos que compõem a parte interna das embalagens estudadas. Os filmes internos das amostras, que são transparentes, mostraram ter a mesma constituição química, pois seus espectros são semelhantes.

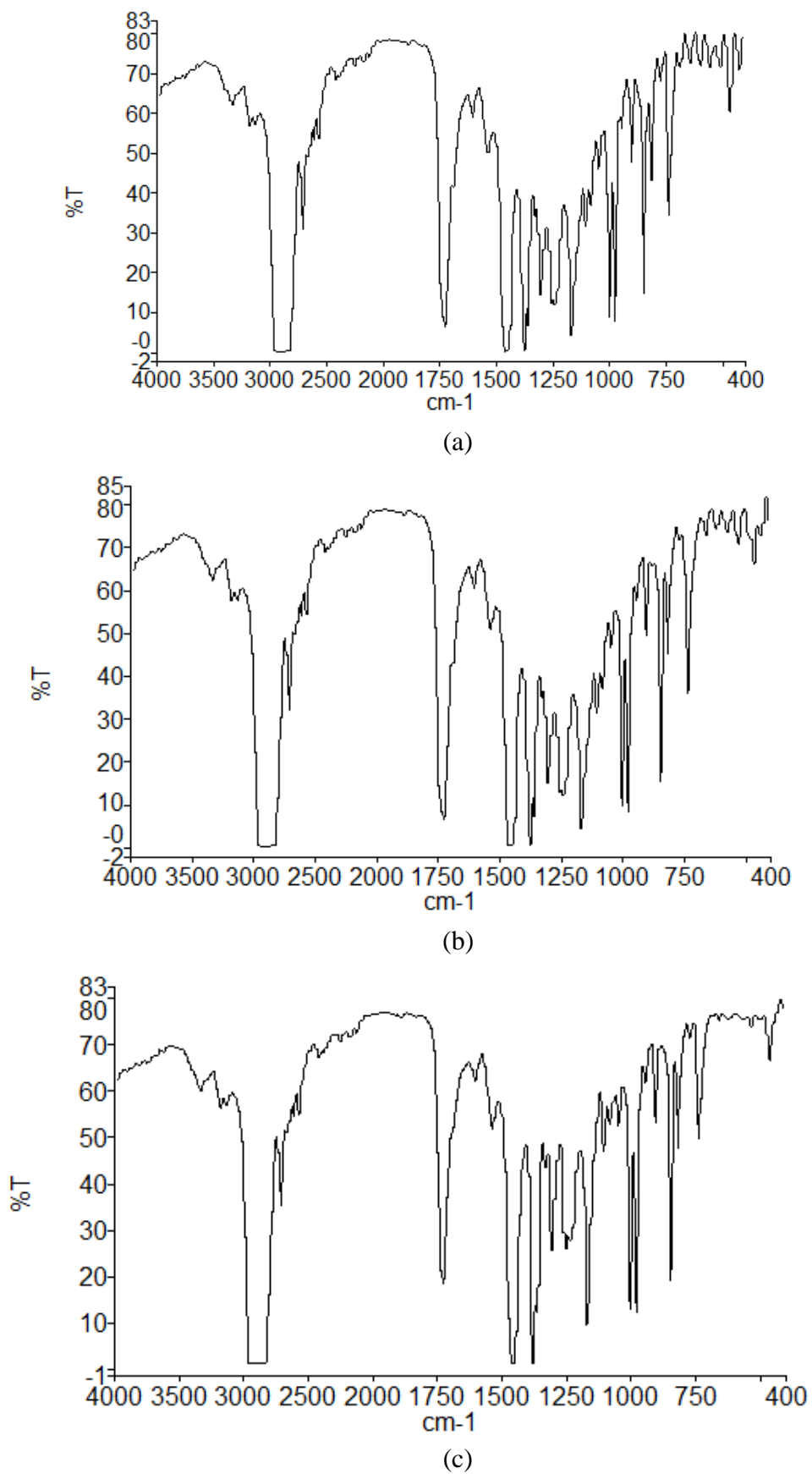


Figura 10 – Espectro por FTIR dos filmes plásticos internos das embalagens do tipo sachê estudadas:
a) Da embalagem 1; b) Da embalagem 2 e c) Da embalagem 3.

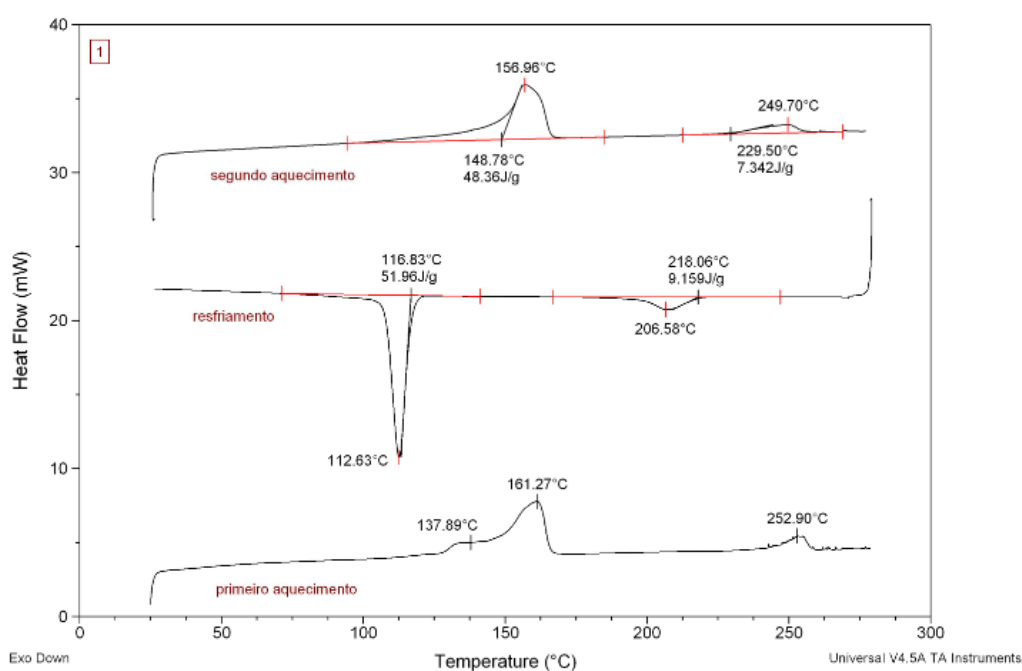
Os principais picos estão apresentados na **Tabela 3**. Os filmes mostraram resultados semelhantes aos encontrados por Petrovich (2017), característicos do polipropileno (PP). Além disso, é possível observar, também, na altura do comprimento de onda em 1750 cm^{-1} , a representação da presença do grupo carbonila, o que pode indicar a existência de uma pequena quantidade de outras substâncias misturadas na composição das embalagens.

Tabela 3 – Picos por FTIR dos filmes plásticos internos da embalagem tipo Stand Up Pouch. Fonte: Elaboração própria, 2020.

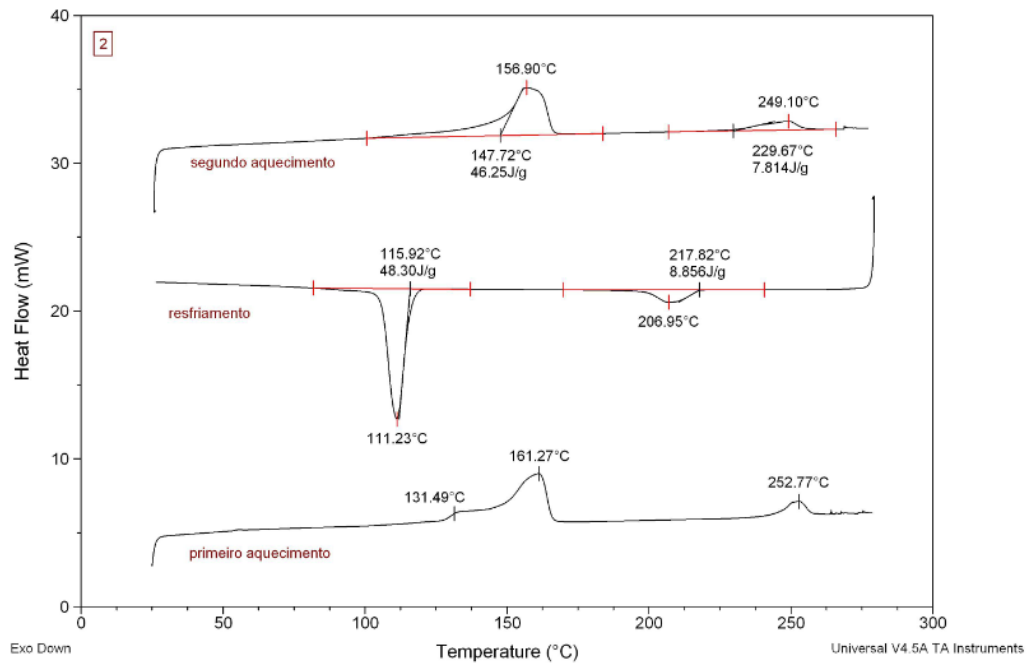
Comprimento de onda (cm^{-1})	Especificação
2800 – 2900	Estiramento C – H (CH_2 e CH_3)
1350 – 1450	Deformações angulares simétrica e assimétrica dos grupos CH_3
1750	Presença de carbonila
970 – 1000	Estiramento C – C do grupo CH_2 e CH_3
840 – 1200	Estiramento C – C do grupo ($-\text{HC}(\text{CH}_3) - \text{CH}_2$)

5.1.3. Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

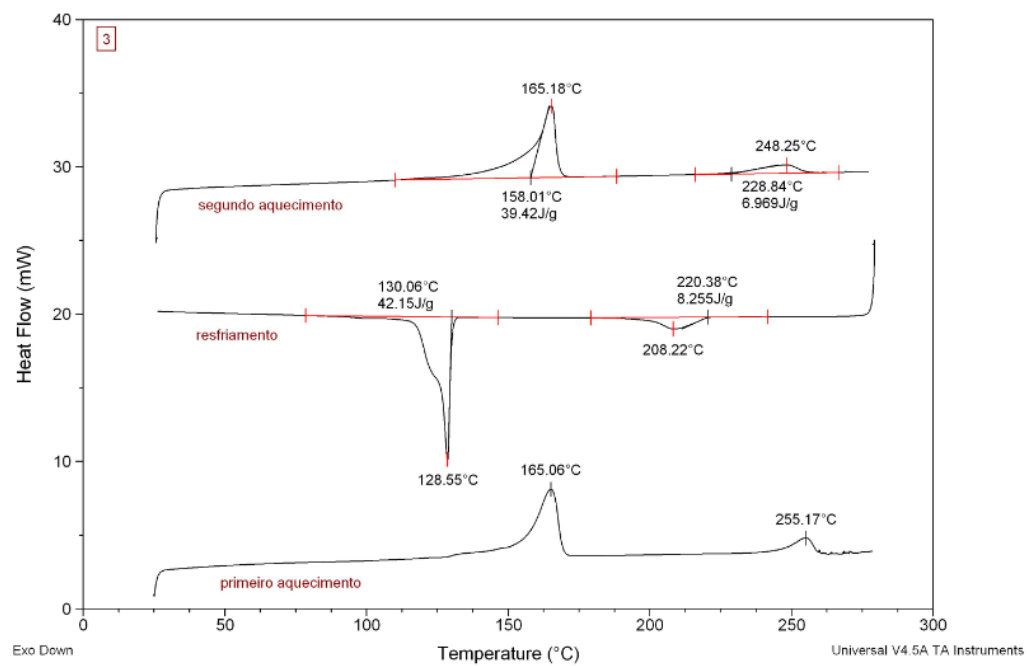
Os ensaios de calorimetria diferencial de varredura foram realizados nas amostras de embalagens multicamadas: Embalagem 1, Embalagem 2 e Embalagem 3. Os resultados podem ser observados na **Figura 11**.



(a)



(b)



(c)

Figura 11 – Análise de calorimetria diferencial de varredura das três amostras de Stand Up Pouch: a) Da embalagem 1; b) Da embalagem 2 e c) Da embalagem 3.

A **Tabela 4** mostra, resumidamente, os resultados dos ensaios realizados e, na **Tabela 5**, estão apresentadas as faixas de temperatura de fusão existentes para os principais

polímeros utilizados na fabricação das embalagens plásticas flexíveis, de acordo com a literatura, para efeitos de comparação.

Tabela 4 – Resultados da análise de calorimetria diferencial de varredura para as três amostras de embalagem. Fonte: Elaboração própria, 2020.

<i>Amostra de embalagem</i>	<i>Temperatura de cristalização 1º pico (°C)</i>	<i>Temperatura de cristalização 2º pico (°C)</i>	<i>Temperatura de fusão 1º pico (°C)</i>	<i>Temperatura de fusão 2º pico (°C)</i>
1	116,8	218,1	157,0	249,7
2	115,9	217,8	156,9	249,1
3	130,1	220,4	165,2	248,3

Tabela 5 – Temperatura de fusão ou de amolecimento (T_f) dos principais polímeros. Fonte: Adaptado de CANEVAROLO JUNIOR, 2007; HERNANDEZ; SELKE; CULTER, 2000; SARANTÓPOULOS et al., 2002.

<i>Tipo de plástico</i>	<i>Abreviatura</i>	<i>Faixa de temperatura de fusão (°C)</i>	<i>Temperatura de fusão usual (°C)</i>
Polietileno de baixa densidade	PEBD	83-130/105-115	98
Polietileno de alta densidade	PEAD	130-141	141
Polipropileno	PP	112-208	165
Poliestireno	PS	225-250	243
Poli(tereftalato de etileno)	PET	250-285/245-265	255
Poli(hexametileno adipamida)	Náilon 6,6	240-290	269

A partir da análise da **Figura 11**, é possível verificar a existência de dois picos bastante nítidos, referentes à fusão cristalina nas três amostras de embalagens analisadas. Conforme disposto na **Tabela 4**, os valores das temperaturas de fusão são de 160°C e 250°C e, de acordo com a **Tabela 5**, encontram-se na faixa de temperatura de fusão usual para o PP e o PET, respectivamente.

O estudo realizado por Araujo e Morales (2018) apresentou resultados de ensaios de DSC com temperaturas de fusão de 163°C e 247°C para o PP e o PET, respectivamente, e

curvas para os ensaios muito similares às obtidas. Verifica-se, portanto, que os plásticos constituintes das embalagens *Stand Up Pouch* estudadas são PP e PET.

5.2. Processos de reciclagem e suas etapas

5.2.1. Moagem

Após a coleta e lavagem, parte das embalagens pós consumo foi direcionada ao moinho de facas. O material foi pesado antes e após ser moído. Os valores da massa inicial, final e perdas encontram-se na **Tabela 6**.

Tabela 6 – Resultados do processo de moagem. Fonte: Elaboração própria, 2020.

Máquina	Tempo (min)	Massa inicial (g) \pm desvio padrão (g)	Massa final (g) \pm desvio padrão (g)	Perdas (g)	Perdas (%)	Potência do moinho (kW)	Observações
Moinho de facas cortantes	100	1915,4 \pm 0,1	1881,1 \pm 0,1	34,3	1,8	4,0	Auxílio de ar comprimido

Para a moagem, foi utilizado um moinho de facas cortantes e este operou durante 100 minutos (1 hora e 40 minutos) para moer todo o material. A faca do moinho não estava muito amolada, o que dificultou e prolongou um pouco o processo, deixando algumas embalagens cortadas em pedaços maiores ou até inteiras. A **Figura 12** mostra os resultados do material moído.



(a)



(b)

Figura 12 – a) Fragmentos de embalagem pós-consumo moídos em moinho de facas e b) Fragmentos da embalagem moídos e acondicionados em um saco transparente. Fonte: Fotografias realizadas por Bruna Dalmacio, 2019.

5.2.2. Aglutinação

Após a moagem, parte do material foi levado à aglutinadora, sendo pesado antes e após ser aglutinado. Os resultados de pesagem e das respectivas perdas encontram-se na **Tabela 7**.

Tabela 7 – Resultados do processo de aglutinação. Fonte: Elaboração própria, 2020.

Máquina	Capacidade da Máquina	Tempo (min)	Massa inicial (g) \pm desvio padrão (g)	Massa final (g) \pm desvio padrão (g)	Perdas (g)	Perdas (%)	Observações
Aglutinadora	300 – 500 g	92	1201,5 \pm 0,1	1177,2 \pm 0,1	24,3	2,0	Auxílio de ar comprimido

Como a capacidade do equipamento era entre 300 a 500 g de material, optou-se por realizar a aglutinação em três bateladas, cada uma alimentando a máquina com aproximadamente 400g de material e com duração média de 30 minutos. Os resultados deste procedimento encontram-se na **Tabela 8**.

Tabela 8 – Resultados das três etapas do processo de aglutinação. Fonte: Elaboração própria, 2020.

Etapa	Tempo (min)	Massa inicial (g) \pm desvio padrão (g)	Massa final (g) \pm desvio padrão (g)	Perdas (g)	Perdas (%)
1	34	400,5 \pm 0,1	389,2 \pm 0,1	11,3	2,8
2	24	400,5 \pm 0,1	396,2 \pm 0,1	4,3	1,1
3	34	400,5 \pm 0,1	391,7 \pm 0,1	8,8	2,2
<i>Média</i>	31	400,5 \pm 0,1	392,4 \pm 0,1	8,1	2,0
Total	92	1201,5	1177,2	24,3	6,1

O material aglutinado obteve um resultado satisfatório, tornando pedaços moídos que estavam ainda grandes em partículas com aspecto menor e mais compacto. É possível observar nas imagens da **Figura 13** o resultado obtido na etapa de aglutinação.



a)



b)

Figura 13 – a) Fragmentos do material aglutinado no equipamento aglutinador após passar pelo moinho e b) Fragmentos do material aglutinado acondicionado em saco transparente. Fonte: Fotografias realizadas por Bruna Dalmacio, 2019.

A **Figura 14** apresenta a mesma quantidade (400g) de material moído e de material aglutinado dispostos em sacos plásticos transparentes, um ao lado do outro, para efeitos de comparação. Observa-se que há uma redução considerável do volume do material após ter sido aglutinado, obtendo-se resultados satisfatórios com a etapa de aglutinação.



Figura 14 – Comparação entre um saco de material moído e outro de material aglutinado, contendo o mesmo peso em cada. Fonte: Fotografia realizada por Bruna Dalmacio, 2019.

5.2.3. Compressão

Foi realizada a compressão do material para a moldagem de pequenas placas de embalagem pós-consumo de 10 x 10 cm e aproximadamente 2 mm de espessura, e delas foram retirados os corpos de prova para análise do ensaio de tração.

Inicialmente, este procedimento foi realizado nas temperaturas de 220°C e 240°C, com duração de, aproximadamente, 12 minutos para a confecção de cada unidade de placa. No entanto, os resultados não foram satisfatórios para a retirada de corpos de prova, pois as placas apresentaram irregularidades como fendas e delaminação (**Figura 15**), sem ter ocorrido uma boa adesão entre as camadas de material. Desta forma, por não resultar em uma placa homogênea, optou-se por realizar a compressão à temperatura de 260°C.



Figura 15 – Placa fabricada a partir do processo 2, à temperatura de 240°C, apresentando delaminação e pouca aderência entre as camadas. Fonte: Fotografia realizada por Bruna Dalmacio, 2019.

A partir da compressão das placas realizada à temperatura de 260°C, foi possível alcançar resultados mais satisfatórios em relação à adesão entre as camadas. No entanto, a existência de pequenos orifícios em algumas das placas prensadas persistiu, devido à utilização do material moído e/ou aglutinado, ou seja, mais fragmentado. Então, optou-se por realizar a prensagem de duas placas juntas em todos os processos, de forma a obter uma placa mais rígida e homogênea. Foram confeccionadas ao final duas placas reprensadas para cada um dos quatro processos estudados.

5.2.3.1. *Processo nº 1: placas prensadas a partir de embalagem inteira – como recebida*

Para o processo 1, foram utilizados aproximadamente 40g de embalagens inteiras. O material foi disposto no molde metálico e destinado à compressão. Após a conclusão da etapa de compressão, as placas foram retiradas do molde metálico e o excesso de material foi cortado com o auxílio de uma tesoura.

Inicialmente, foram fabricadas quatro placas e, para obter placas mais rígidas e uniformes, optou-se por realizar, posteriormente, a repsensagem, dispondo no molde metálico duas placas juntas. Ao final deste processo, foram obtidas duas placas repsensadas. Na **Figura 16**, é possível observar o resultado de uma das placas confeccionadas.



Figura 16 – a) Placa prensada a partir de duas placas confeccionadas com embalagem inteira pós-consumo após sua retirada da prensa e ainda no molde metálico e b) Placa repsensada de embalagem inteira pós-consumo com os excessos removidos. Fonte: Fotografias realizadas por Bruna Dalmacio, 2019.

A **Tabela 9** apresenta o resultado de pesagem e perdas das placas obtidas.

Tabela 9 – Resultado das placas moldadas sob compressão a partir das embalagens inteiras. Fonte: Elaboração própria, 2020.

Número da placa	Massa inicial (g) ± desvio padrão (g)	Massa final (g) ± desvio padrão (g)	Perdas (g)	Perdas (%)
1	9,9 ± 0,1	9,1 ± 0,1	0,8	8,1
2	10,0 ± 0,1	8,7 ± 0,1	1,3	13,0
3	9,9 ± 0,1	9,2 ± 0,1	0,7	7,1
4	10,0 ± 0,1	8,9 ± 0,1	1,1	11,0
5	17,8 ± 0,1	17,4 ± 0,1	0,4	2,2
6	18,1 ± 0,1	17,6 ± 0,1	0,5	2,8

Na **Tabela 9**, as placas 5 e 6 correspondem àquelas que foram reprensadas a partir das duas placas anteriormente confeccionadas de material inteiro (como recebido). Pode-se observar, também, que as perdas diminuem consideravelmente quando são prensadas duas placas juntas ao mesmo tempo.

5.2.3.2. Processo nº 2: placas prensadas a partir de embalagem inteira – invertida

Para a confecção das placas feitas de embalagens inteiras invertidas, com a parte de alumínio externa, também foram utilizados aproximadamente 40g de material. Inicialmente, as embalagens foram abertas e cortadas para que a parte interna de alumínio fosse disposta de maneira a ser a parte externa da placa. Depois, o material foi disposto no molde metálico e destinado à moldagem por compressão. Após a conclusão do processo de compressão, as placas foram retiradas do molde metálico e o excesso de material foi cortado com o auxílio de uma tesoura.

Vale ressaltar que foram fabricadas quatro placas neste processo e, posteriormente, foi realizada a prensagem dispondo no molde duas placas ao mesmo tempo, obtendo-se, ao final, um total de duas placas reprensadas. A **Figura 17** apresenta uma das placas resultante nesse processo.



Figura 17 – a) Placa prensada a partir de duas placas confeccionadas com embalagem inteira pós-consumo invertida (com a parte de alumínio externa), após retirada da prensa e ainda no molde metálico e b) Placa reprensada de embalagem inteira pós-consumo com a parte de alumínio externa, com os excessos removidos. Fonte: Fotografias realizadas por Bruna Dalmacio, 2019.

A **Tabela 10** dispõe os resultados de pesagem e perdas das placas confeccionadas.

Tabela 10 – Resultado das placas moldadas sob compressão a partir das embalagens inteiras com a parte de alumínio externa. Fonte: Elaboração própria, 2020.

Número da placa	Massa inicial (g) \pm desvio padrão (g)	Massa final (g) \pm desvio padrão (g)	Perdas (g)	Perdas (%)
1	9,5 \pm 0,1	7,6 \pm 0,1	1,9	20,0
2	10,0 \pm 0,1	7,0 \pm 0,1	3,0	29,8
3	10,1 \pm 0,1	8,1 \pm 0,1	2,0	19,8
4	10,0 \pm 0,1	7,9 \pm 0,1	2,1	21,0
5	14,6 \pm 0,1	14,4 \pm 0,1	0,2	1,4
6	16,0 \pm 0,1	15,9 \pm 0,1	0,1	0,6

Na **Tabela 10**, as placas 5 e 6 correspondem àquelas que foram reprensadas a partir das duas placas anteriormente confeccionadas de material inteiro invertido. Pode-se observar, também, que a confecção de placas a partir do segundo processo gera um alto índice de perdas quando comparado com as placas obtidas no primeiro processo (a partir do material inteiro com a parte plástica externa), mas essas perdas diminuem consideravelmente quando são prensadas, ao mesmo tempo, duas placas juntas.

5.2.3.3. *Processo nº 3: placas prensadas a partir de embalagem moída*

No processo 3, em que as placas foram fabricadas a partir das embalagens moídas, foram utilizados aproximadamente 40g de material moído no total. Para a confecção de cada placa, o material foi disposto no molde metálico e destinado à compressão. Após a conclusão da etapa de compressão, as placas foram retiradas do molde metálico e o excesso de material foi cortado com o auxílio de uma tesoura.

Assim como nos demais processos, inicialmente foram fabricadas quatro placas e, para obter placas mais rígidas e uniformes, optou-se por realizar, posteriormente, a reprensagem, dispondo no molde metálico duas placas juntas. Ao final deste processo, foram obtidas duas placas reprensadas. A **Figura 18** ilustra uma das placas confeccionadas neste processo e a **Tabela 11** apresenta o resultado de pesagem e perdas das placas confeccionadas.



a)



b)

Figura 18 – a) Placa prensada a partir de duas placas confeccionadas de embalagem pós-consumo moída após retirada da prensa e ainda no molde metálico e b) Placa reprensada de embalagem pós-consumo moída, com os excessos removidos. Fonte: Fotografias realizadas por Bruna Dalmacio, 2019.

Tabela 11 – Resultado das placas moldadas sob compressão a partir das embalagens moídas. Fonte: Elaboração própria, 2020.

Número da placa	Massa inicial (g) ± desvio padrão (g)	Massa final (g) ± desvio padrão (g)	Perdas (g)	Perdas (%)
1	10,0 ± 0,1	8,3 ± 0,1	1,7	17,0
2	10,5 ± 0,1	9,9 ± 0,1	0,6	5,7
3	10,0 ± 0,1	8,5 ± 0,1	1,5	15,0
4	10,1 ± 0,1	9,2 ± 0,1	0,9	8,9
5	18,2 ± 0,1	18,1 ± 0,1	0,1	0,7
6	17,7 ± 0,1	17,5 ± 0,1	0,2	1,1

Na **Tabela 11**, as placas 5 e 6 correspondem àquelas que foram reprensadas a partir de duas placas anteriormente confeccionadas de material moído. Pode-se observar, também, que as perdas diminuem consideravelmente quando são prensadas duas placas ao mesmo tempo.

5.2.3.4. Processo nº 4: placas prensadas a partir de embalagem aglutinada

No processo 4, em que as placas foram fabricadas a partir das embalagens aglutinadas, foram utilizados aproximadamente 40 g de material aglutinado no total. Na confecção de cada placa, o material foi disposto no molde e submetido à compressão. Após a conclusão da etapa de compressão, as placas foram retiradas do molde metálico e o excesso de material foi cortado com o auxílio de uma tesoura.

Da mesma forma que o ocorrido nos demais processos, inicialmente foram fabricadas quatro placas e, para obter placas mais homogêneas, optou-se por realizar, posteriormente, a reprensagem, dispondo no molde metálico duas placas juntas. Ao final deste processo, foram obtidas duas placas reprensadas. A **Figura 19** ilustra uma das placas obtidas neste processo.

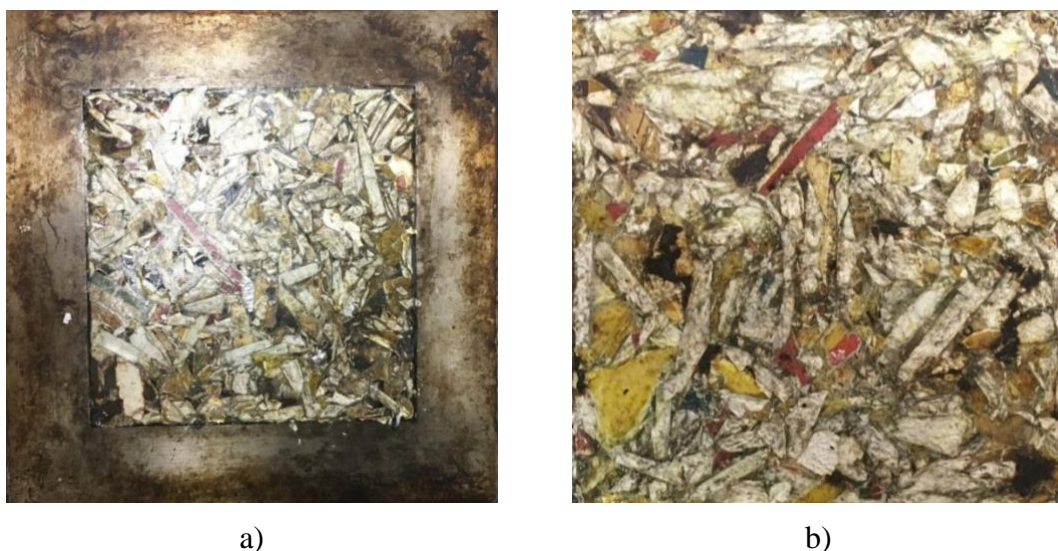


Figura 19 – a) Placa prensada a partir de duas placas confeccionadas de material aglutinado após retirada da prensa e ainda no molde metálico e b) Placa repsensada de material aglutinado, com os excessos removidos. Fonte: Fotografias realizadas por Bruna Dalmacio, 2019.

A **Tabela 12** mostra o resultado de pesagem e perdas das placas fabricadas no processo 4.

Tabela 12 – Resultado das placas moldadas sob compressão a partir de material aglutinado. Fonte: Elaboração própria, 2020.

Número da placa	Massa inicial (g) ± desvio padrão (g)	Massa final (g) ± desvio padrão (g)	Perdas (g)	Perdas (%)
1	10,0 ± 0,1	9,3 ± 0,1	0,7	7,0
2	10,2 ± 0,1	9,9 ± 0,1	0,3	2,9
3	10,4 ± 0,1	10,2 ± 0,1	0,2	1,9
4	10,6 ± 0,1	10,3 ± 0,1	0,3	2,8
5	19,2 ± 0,1	19,1 ± 0,1	0,1	0,4
6	20,5 ± 0,1	20,3 ± 0,1	0,2	1,2

Na **Tabela 12**, as placas 5 e 6 são aquelas que foram repsensadas a partir de duas placas anteriormente confeccionadas de material aglutinado. Pode-se observar, também, que as perdas diminuem quando são prensadas duas placas ao mesmo tempo.

O resultado das placas repsensadas em todos os processos foi satisfatório, possuindo uma maior homogeneidade, regularidade e uniformidade em toda a superfície e apresentando a ausência de falhas e fendas. Ao final de todos os processos, foram dispostas lado a lado

uma placa de cada processo realizado, para efeito de comparação visual, conforme apresentado na **Figura 20**.

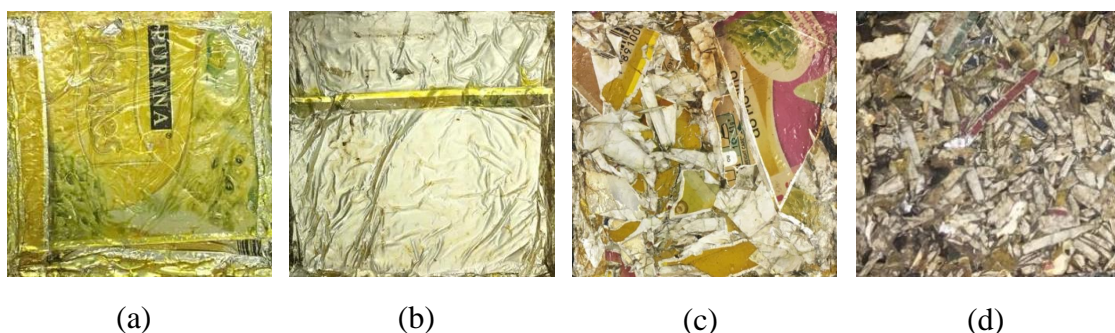


Figura 20 – Exemplo das placa prensadas em cada processo de reciclagem estudado: a) A partir de embalagem inteira – como recebida; b) A partir de embalagem inteira – cortada e invertida; c) A partir de embalagem moída e d) A partir de embalagem moída e aglutinada. Fonte: Fotografias realizadas por Bruna Dalmacio, 2019.

5.3. Caracterização dos materiais reciclados

5.3.1. Índice de fluidez (MFI)

Após colocar a amostra de material moído no equipamento, configurar as propriedades de operação e finalizar o processo de amolecimento, deveria ocorrer o escoamento do material pelo seu capilar. Contudo, observou-se que não houve fluxo de material saindo do capilar. Diante desse resultado, o teste foi refeito com o ajuste da temperatura e da massa. A máquina de MFI passou então a operar a 240°C, com 5kg e, ainda assim, continuou sem sair material pelo capilar.

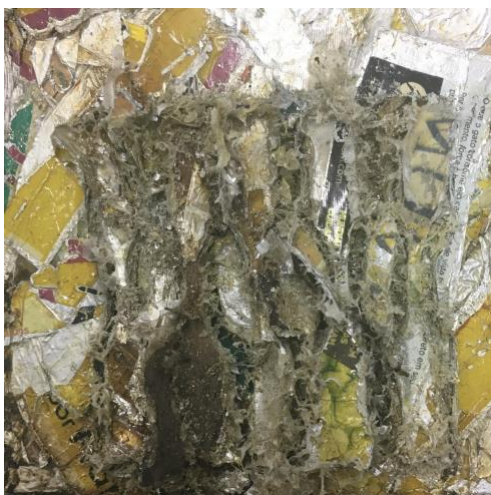
A amostra de material moído foi, então, retirada e substituída pela amostra de material aglutinado e o equipamento continuou operando nas mesmas condições. Entretanto, não foi possível observar nenhuma saída de massa pelo capilar.

O teste, portanto, não foi conclusivo e o único resultado que este ensaio pôde possibilitar foi que o material é muito viscoso, em função da sua camada de alumínio, uma vez que, mesmo aumentando a temperatura para a realização dos testes, o material não fluía pela máquina.

5.3.2. Ensaio de resistência à tração

A partir das placas confeccionadas nos quatro processos, foram obtidos os corpos de prova para serem submetidos ao ensaio de tração. A primeira opção para o corte dos corpos de prova seria o cunho, seguindo o formato do corte de acordo com a norma ASTM D638 - 10. No entanto, não foi possível utilizar o equipamento, pois o material poderia danificá-lo em função de sua composição.

Então, foi realizada a tentativa de corte com uma fresa automática, na qual os corpos de prova são cortados de acordo com um desenho projetado no computador. Este equipamento molda o objeto com uma broca giratória que, à medida que entra em contato com a superfície da placa, corta-a conforme o desenho pré-selecionado. Entretanto, essa tentativa não foi bem-sucedida, pois a broca do equipamento encontrou certa resistência ao penetrar as camadas do material, danificando-o. A placa cortada e danificada está apresentada na **Figura 21**.



*Figura 21 – Placa danificada após tentativa de corte de corpos de prova com a fresa automática.
Fonte: Fotografia realizada por Bruna Dalmacio, 2019.*

A solução, portanto, foi basear-se na norma ASTM D882-12 e adaptá-la para o corte dos corpos de prova sob a forma de tiras com largura de 1 cm. Com auxílio de tesoura e de bisturi foram cortados sete corpos de prova para cada placa moldada. Segundo esta norma, o corte em tiras de corpos de prova só poderia ser realizado para espessuras menores que 1 mm. No caso deste trabalho, as placas confeccionadas resultaram tiras com espessura entre 1 e 2 mm aproximadamente. A **Figura 22** ilustra os corpos de prova obtidos a partir das placas resultantes em cada um dos quatro processos realizados.

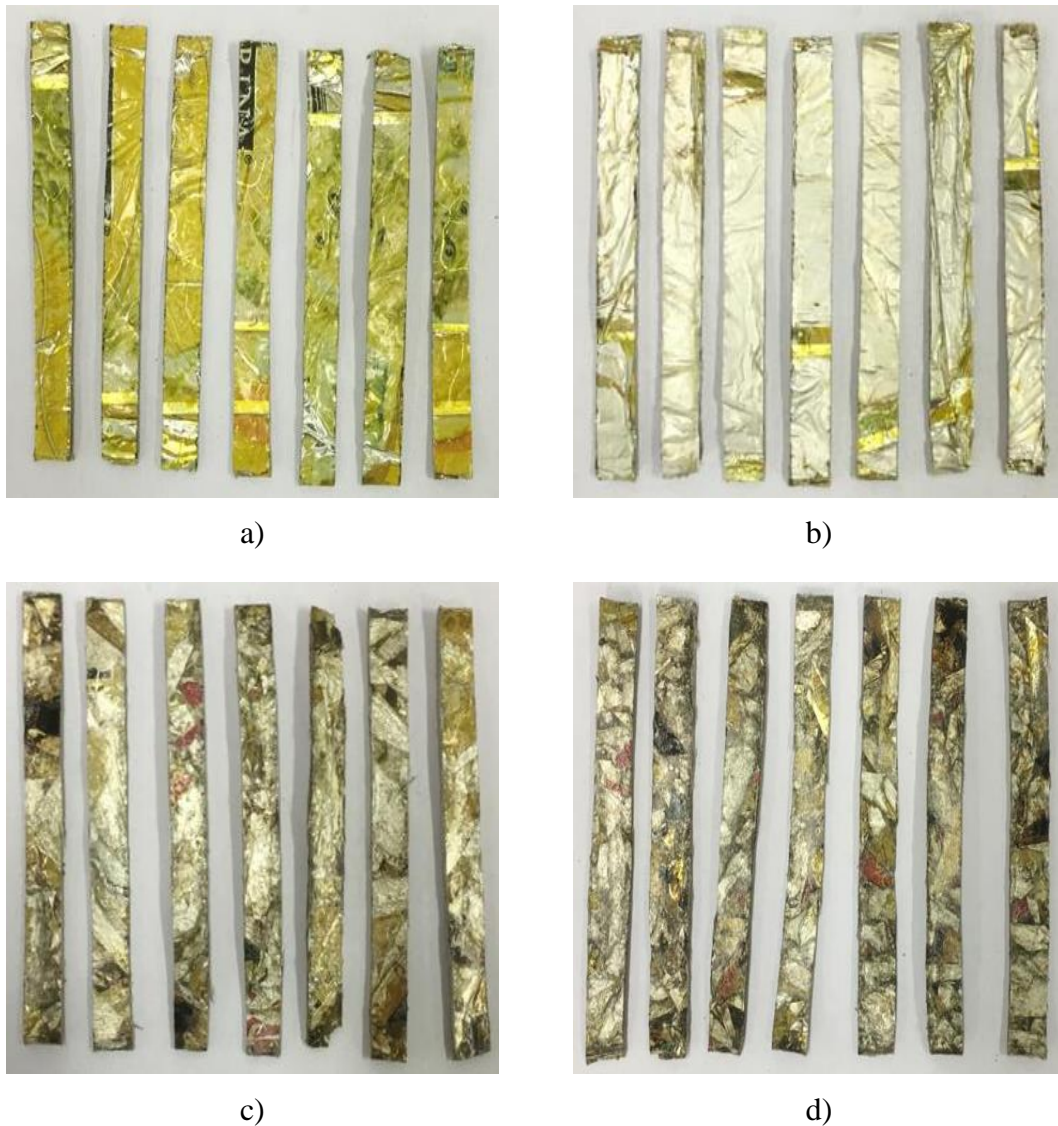


Figura 22 – Corpos de prova cortados em placa confeccionada de embalagens a) Inteiras e com plástico na parte externa; b) Inteiras e com alumínio na parte externa; c) Moídas e d) Moídas e aglutinadas. Fonte: Fotografias realizadas por Bruna Dalmacio, 2019.

Os sete corpos de prova de cada placa foram então submetidos ao ensaio de tração na máquina universal de ensaios e foi realizada uma média dos resultados.

Os resultados dos ensaios podem ser observados na **Figura 23**, que apresenta o gráfico de tensão (MPa) *versus* deformação (%) para cada um dos quatro processos.

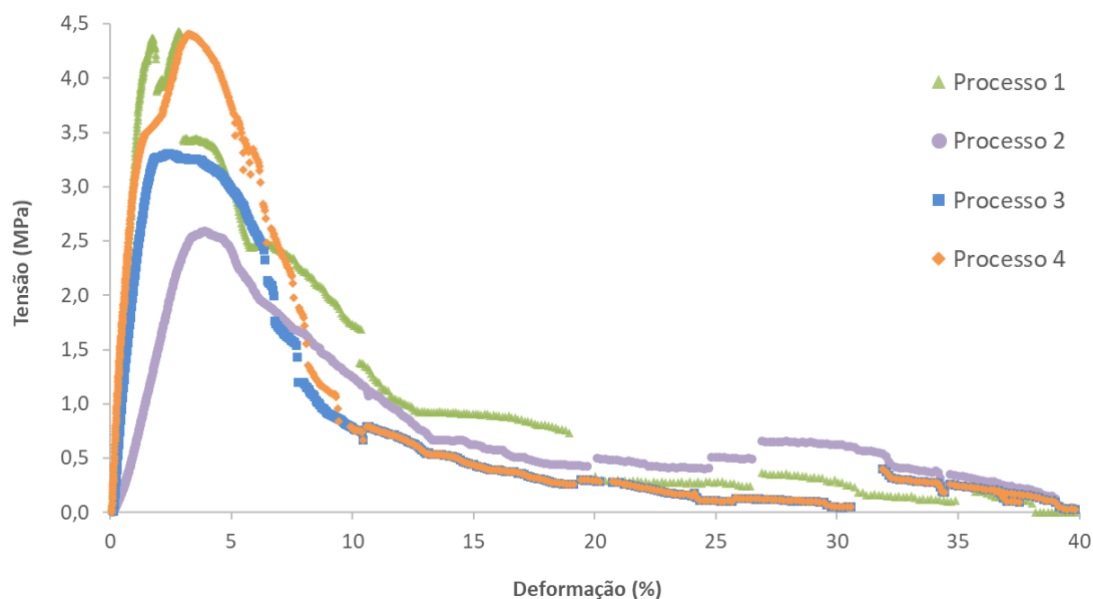


Figura 23 – Resultados dos ensaios de tração realizados para cada um dos quatro processos.
 Fonte: Elaboração própria, 2020.

Na **Tabela 13**, estão apresentados os valores para a tensão máxima, tensão na ruptura, deformação máxima e módulo de elasticidade obtidos nos ensaios para cada um dos processos.

Tabela 13 – Resultados do ensaio de tração para os corpos de prova obtidos pelos 4 processos realizados e estudados. Fonte: Elaboração própria, 2020.

Corpos de prova analisados segundo cada Processo	Tensão máxima (MPa) \pm desvio padrão (MPa)	Tensão na ruptura (MPa) \pm desvio padrão (MPa)	Deformação máxima (%) \pm desvio padrão (%)	Módulo de Elasticidade (MPa) \pm desvio padrão (MPa)
Processo 1	4,3 \pm 1,3	4,3 \pm 1,3	2,8 \pm 0,8	2,6 \pm 0,8
Processo 2	2,6 \pm 0,9	0,4 \pm 0,9	19,7 \pm 5,1	0,4 \pm 0,2
Processo 3	3,3 \pm 1,2	2,3 \pm 1,2	6,4 \pm 1,7	1,9 \pm 0,7
Processo 4	4,4 \pm 1,3	3,1 \pm 1,4	6,2 \pm 1,7	3,3 \pm 0,8

Com a análise da **Figura 23** e dos valores apresentados na **Tabela 13**, é possível observar que os corpos de prova obtidos através do Processo 1 apresentaram maior fragilidade, pois a tensão máxima e a tensão na ruptura são as mesmas, visto que ocorrem no mesmo ponto, além de possuir a menor deformação.

Os corpos de prova obtidos a partir do Processo 2 apresentaram o menor valor de tensão máxima e de ruptura, porém, suporta a maior deformação antes da ruptura, o que indica que o material é mais dúctil e mais flexível. Como apresentou o menor módulo de elasticidade, também é possível concluir que é o material que possui menor rigidez.

Para o Processo 3, o valor de tensão máxima é maior que para o Processo 2, o que indica que o material suporta cargas mais fortes, mas com deformações menores, ou seja, o material é mais tenaz: apresenta resistência e ductilidade.

Já os corpos de prova obtidos no Processo 4 apresentaram o maior valor de tensão máxima suportada sem romper, ou de resistência à tração, e o maior módulo de elasticidade, o que indica que é o material mais rígido e resistente. Nota-se ainda que, ao aumentar a densidade aparente e diminuir o volume do material, as propriedades de resistência à tração e rigidez são melhoradas.

Os resultados do ensaio de tração para todos os processos foram mais baixos quando comparados com os resultados de tração de placas e de madeira plástica confeccionadas a partir da reciclagem de embalagens SUP obtidos por Teixeira (2013), que foram em torno de 15 a 20 MPa para a resistência à tração (tensão máxima). Ainda assim, os resultados obtidos a partir dos processos 3 e 4 foram satisfatórios, mostrando-se promissores para aplicação como placas de sinalização, por exemplo.

É possível observar, também, que em todos os processos a curva tensão *versus* deformação apresentou falhas, representadas pela descontinuidade da linha após a ruptura. Essas falhas indicam o rompimento entre as camadas dos corpos de prova. Até atingir a deformação máxima, pode-se verificar que os corpos de prova para cada processo mantiveram-se íntegros durante o ensaio, apresentando maior uniformidade em sua estrutura. Porém, para tensões entre 2,5 e 4,5 MPa, o material se rompe e começa a desintegrar-se e a delaminar-se.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo objetivou a caracterização dos materiais componentes das embalagens *Stand Up Pouch* e o desenvolvimento de quatro processos de reciclagem mecânica para essas embalagens. Também foram avaliados e caracterizados os produtos reciclados e verificou-se que o produto reciclado com maior resistência à tração foi obtido através do

processo de reciclagem que gera um maior gasto de energia, ou seja, o produto reciclado que apresentou as melhores propriedades é o menos sustentável.

Os ensaios de termogravimetria (TGA), de calorimetria diferencial de varredura (DSC) e de espectrometria no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foram realizados com o intuito de caracterizar os materiais componentes das embalagens SUP, especificamente para uso de alimentos úmidos para animais, já que estas embalagens são classificadas com a identificação de número 7 (outros). De acordo com os resultados obtidos, foi possível concluir, através da análise TGA, que as embalagens estudadas são compostas por dois polímeros e por alumínio, com a porcentagem média de 79% polímero e 21% alumínio. A partir do ensaio DSC, chegou-se ao resultado de que os polímeros que compõe as embalagens multicamadas analisadas são o polipropileno (PP) e o poli(tereftalato de etileno) (PET). Verificou-se que a camada polimérica externa das embalagens é composta por filmes de PET e a camada polimérica interna é composta por filmes de PP.

A reciclagem das embalagens *Stand Up Pouch*, realizada a partir de quatro processos diferentes, foi próspera. As etapas de reciclagem incluíram o beneficiamento, moagem, aglutinação e compressão.

Os ensaios de índice de fluidez e de resistência à tração foram realizados com a finalidade de caracterizar os materiais reciclados obtidos. A análise do índice de fluidez foi inconclusiva, sugerindo que o material trabalhado é muito viscoso, devido à presença do filme alumínio que dificulta a fluidez da mistura. O ensaio de tração foi realizado com os corpos de prova obtidos a partir da confecção das placas de cada processo.

Foi possível concluir, ainda, que os resultados obtidos a partir do processo 1, que continha em suas etapas coleta e compressão da embalagem como recebida, não foram satisfatórios, uma vez que o material resultante é bastante frágil quando comparado aos demais. Já para o processo 2, que consistiu na compressão da embalagem invertida, os resultados foram mais satisfatórios quando comparado com o processo 1, porém, menos satisfatórios em comparação aos processos 3 e 4, que continham as etapas de moagem e aglutinação, respectivamente, posteriormente à compressão. Além disso, foi possível observar que nas placas obtidas através dos processos 1 e 2 havia menor aderência entre as camadas, em função dos materiais terem sido colocados inteiros, proporcionando maior delaminação e menor rigidez dos corpos de prova quando submetidos ao ensaio de

tração. Os processos 3 e 4, apesar de possuírem o maior gasto energético em função da utilização de mais máquinas e etapas, foram os que obtiveram resultados mais satisfatórios, tanto de uniformidade e consistência das placas quanto de resistência à tração. Foi possível concluir também que, ao diminuir o volume e aumentar a densidade aparente do material, as propriedades de resistência à tração e rigidez são melhoradas.

Como o processo 4, que consistiu em moagem e aglutinação do material para posterior compressão, é o que apresentou maior resistência à tração, rigidez e uniformidade em seu produto resultante, pode-se concluir que este foi o resultado mais satisfatório obtido para a finalidade de aplicação do produto reciclado como placas simples de sinalização. No entanto, este processo exige maior gasto energético para sua execução, visto que é composto por mais etapas que os demais, necessitando da utilização de mais equipamentos.

É importante reforçar que as embalagens estudadas são passíveis de reciclagem e devem ser descartadas em coletores para materiais recicláveis, preferencialmente o de plásticos. Além disso, a indicação do principal ou dos principais materiais presentes em sua composição não só facilitaria sua identificação, como auxiliaria à população no descarte correto dessas embalagens, fomentando a busca pela sua reciclagem.

A reciclagem do *Stand Up Pouch*, apesar de encontrar dificuldades por possuir camadas compostas por diferentes materiais, pôde ser executada de maneira simples, sem desintegrar seus componentes. A qualidade do material reciclado é inferior aos materiais e matérias-primas originais, mas, ainda assim, possui aplicações, podendo estender a vida útil dessas embalagens que são utilizadas apenas uma vez e descartadas, muitas vezes, incorretamente. Observa-se, portanto, que o material pode ser reciclado e não exige técnicas complexas, muito tecnológicas ou inviáveis. Neste âmbito, é necessário maior investimento em informação para a população, facilitando, dessa forma, o descarte correto das embalagens, evitando sua contaminação, e, ainda, é importante incentivar as recicladoras para que realizem cada vez mais a reciclagem de diferentes composições plásticas e multimateriais, possibilitando o aumento da vida útil dos materiais, o fechamento correto do ciclo do produto e a redução de impactos ambientais que essas embalagens podem causar quando descartadas incorretamente no ambiente.

7. RECOMENDAÇÕES

No presente trabalho, não foi possível a realização de um outro processo de reciclagem com uma etapa de extrusão após a aglutinação. Para a verificação da possibilidade de extrusão, recomenda-se a realização do teste de índice de fluidez aplicando temperaturas mais altas. Uma vez que o material consegue fluir pelo capilar, será possível, então, extrusar o material.

Após ser aglutinado, o material poderia ser direcionado à extrusora, que consiste na passagem do material por um equipamento no qual é aquecido, atingindo o ponto de plasticidade, sendo posteriormente cortado em grãos (*pellets*) (VON ZUBEN; NEVES, 1999).

Portanto, para pesquisas futuras, sugere-se a simulação do processo de reciclagem com a utilização de uma extrusora a fim de comparar os resultados e verificar se estes seriam mais satisfatórios que os apresentados neste trabalho.

Além da realização de mais uma etapa, resultando em mais um processo a ser analisado, sugere-se, também, a otimização dos processos 3 e 4, que obtiveram resultados satisfatórios para a aplicação sugerida.

É importante citar, ainda, que um dos propósitos desse trabalho foi a colaboração com um projeto da Prefeitura da Cidade Universitária, que utilizaria as placas fabricadas a partir do melhor processo desenvolvido, com o objetivo de utilizá-las para sinalizar e fornecer informações sobre as espécies de plantas e árvores que habitam a Ilha do Fundão, no Rio de Janeiro. Além disso, o projeto também propõe acessibilidade aos portadores de deficiência visual ao almejar inserir as informações nas placas também na linguagem em Braille. Dessa forma, sugere-se tal aplicação às placas produzidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS PLÁSTICAS FLEXÍVEIS. ABIEF (Brasil). **Um paralelo com a história da embalagem plástica flexível no Brasil**. [S. L.]: LDB Comunicação Empresarial, 2015. 92 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGEM. ABRE; COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. CETESB (Brasil). **Embalagem e Sustentabilidade: Desafios e orientações no contexto da economia circular**. São Paulo: Verbus Comunicação Editorial, 2016. 39 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. ABRELPE (Brasil). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**. São Paulo: Abrelpe, 2019. 68 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. ABAL (Brasil). Disponível em <<http://embalagensdealuminio.com.br/flexiveis/>>. Acesso em: 30 de novembro de 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1238-10: Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer**. West Conshohocken. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638-10: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. West Conshohocken. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D882-12: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting**. West Conshohocken. 2012.

ARAÚJO, Luciana Maria Guadagnini; MORALES, Ana Rita. Compatibilization of recycled polypropylene and recycled poly (ethylene terephthalate) blends with SEBS- g- MA. **Polímeros**, Campinas, v. 28, n. 1, p. 84-91, mar. 2018.

BANNACH, Gilbert; PERPÉTUO, Glauco Lini; CAVALHEIRO, Éder Tadeu; CAVALHEIRO, Carla Cristina; ROCHA, Rafael Rodrigo. **Efeitos da história térmica nas propriedades do polímero PET: um experimento para ensino de análise térmica**. *Química Nova*, São Paulo, v. 34, n. 10, p.1825-1829, jul. 2011.

BARÃO, Mariana Zanon. **Embalagens para produtos alimentícios**: Produtos de Borracha e Plástico. 2011. Dossiê Técnico - Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas. Disponível em: <<http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NTY0MQ==>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2019.

BÓ, Marcelo Dal; CARDOSO, Antônio P. G.; TANCREDO, Ciana; MERGEN, Isaura Z.; DONEDA, Raquel N.; NOVAES, Adelamar F.; FARIA, Débora C. de. Reciclagem de embalagens poliméricas contendo filme de alumínio metálico via processamento químico. **Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais**, Florianópolis, v. 1, n. 1, p.1-5, 21 fev. 2011.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**. Lei Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010 - institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências, 2010. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em: 19 de março de 2020.

CANEVAROLO JUNIOR, Sebastião. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2007. 448 p.

COSTA, Thiago Santangelo; ORNELAS, Danielle Lanchares; GUIMARÃES, Pedro Ivo Canesso; MERÇON, Fábio. **Química nova**: experimentos com alumínio. 23. ed. [S. l.]: Sociedade Brasileira de Química, 2006.

DANTAS, Mara Lúcia Siqueira. **Degradabilidade de embalagens compostas de laminados de papel revestido, plástico e alumínio e sua interação com o meio ambiente**. Piracicaba, 2000.

DIAS, David Montero; MARTINEZ, Carlos Barreira; BARROS, Raphael Tobias Vasconcelos; LIBÂNIO, Marcelo. Modelo para estimativa da geração de resíduos sólidos domiciliares em centros urbanos a partir de variáveis socioeconômicas conjunturais. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 325-332, 2012.

FLEXIBLE PACKAGING EUROPE. FPE. **Understanding Life Cycle Assessment (LCA) of flexible packaging**. Disponível em: <<https://www.flexpack-europe.org/en/sustainability/food-lcas.html>>. Acesso em: 03 de junho de 2020.

GRISA, Ana M. C.; CRESPO, Janaiana S.; ZENI, Mára. **Análise termogravimétrica de polímero**. Anais do 8º Congresso brasileiro de polímeros. Caxias do Sul, Brasil, p. 1191- 1192, 2005.

HAHLADAKIS, John N.; IACOVIDOU, Eleni. Closing the loop on plastic packaging materials: what is quality and how does it affect their circularity?. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 630, p. 1394-1400, jul. 2018.

HERNANDEZ, Ruben J.; SELKE, Susan E.m.; CULTER, John. **Plastics Packaging**: Properties, processing, applications, and regulations. Cincinatti: Hanser Publishers, 2000.

ISO 14040. **Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework**. Genève, Switzerland. 1997.

KAISER, Katharina; SCHMID, Markus; SCHLUMMER, Martin. Recycling of Polymer-Based Multilayer Packaging: a review. **Recycling**, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 1-26, 22 dez. 2017.

LAMONTAGNE, Nancy. Recycling the Unrecyclable: industry innovations aim to keep traditionally difficult-to-recycle plastics out of the landfill. **Plastics Engineering**, [s.l.], v. 1, n. 1, p. 14-16, abr. 2016.

LIMA, Cleyton Rebechi de. **História da embalagem: Stand-Up Pouch**. 2015. 84 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Embalagem, Escola de Engenharia Mauá, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2015.

MESTRINER, Fábio. **Manual de Embalagem TradPouch**. [S. L.]: Gualapack Group, 2019. 12 p.

NEVES, Ana Cláudia Ribeiro Rossi; DE ALMEIDA CASTRO, Luiz Otávio. Separação de materiais recicláveis: panorama no Brasil e incentivos à prática. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, p. 1734-1742, 2012.

NIAOUNAKIS, Michael. Flexible Plastic Packaging and Recycling. **Recycling Of Flexible Plastic Packaging**, [s.l.], p. 1-20, 2020. Elsevier.

PEREIRA, Ana Paula dos Santos; SILVA, Marcelo Henrique Prado da; JÚNIOR, Édio Pereira Lima; PAULA, Anderson dos Santos; TOMMASINI, Flávio James. Processing and Characterization of PET Composites Reinforced With Geopolymer Concrete Waste. **Materials Research**, [S.L.], v. 20, n. 2, p. 411-420, 9 out. 2017.

PETROVICH, John. FTIR and DSC of polymer films used for packaging: LLDPE, PP and PVDC. **Shape**, S.L., v. 2, n. 5, p. 1-13, jul. 2017.

REZENDE, Raquel Badia Campos de. **Caracterização da Resina Proveniente da Reciclagem Pós-Industrial de Embalagens Stand-Up Pouch**. 2014. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2014.

RIBEIRO, Jayne Cunha Barreira. Aplicação do palete em projeto de design de interiores. **Ecodesign**. Apucarana, v. 1, n. 1, p. 94-114, jun. 2014.

SARANTÓPOULOS, Claire I. G. L; MOREIRA, Christiane; SOARES, Beatriz; BORGES, Daniele; COLTRO, Leda; OLIVEIRA, Lea; TEIXEIRA, Fábio Gomes. **Embalagens Plásticas Flexíveis: Principais Polímeros e Avaliação de Propriedades**. Campinas: Cetea/ital, 2002. 267 p.

TARTAKOWSKI, Zenon. Recycling of packaging multilayer films: new materials for technical products. **Resources, Conservation And Recycling**, Szczecin, Poland, v. 55, n. 2, p. 167-170, dez. 2010. Elsevier BV.

TEIXEIRA, Mirella de Marchi. **Reciclagem de embalagens tipo Stand Up Pouch: viabilidade técnica e teste industrial**. 2013. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, Lorena, 2013.

TOENSMEIER, Pat. Circular Design: flexible food packaging is growing, along with concerns about recyclability. the industry is taking note and working to improve plastics collection and reuse. **Plastics Engineering**, [s.l.], v. 1, n. 1, p. 24-30, abr. 2019.

VON ZUBEN, Fernando; NEVES, Fernando Luiz. Recycling of aluminum and polyethylene present in Tetra Pak's milk cartons. **Technical Papers**, Brazil, v. 1, n. 1, p.12-18, 1999.