



**Caracterização do resíduo proveniente
do processo de separação por
gravidade de plástico pós-consumo:
“Fundo de tanque”**

Gabriel Carvalho Bertassone Avila

Monografia em Engenharia Química

Orientadores:

Prof. Luis Cláudio Mendes, D.Sc

Sibele Piedade Cestari, D.Sc

Outubro de 2021

CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO PROVENIENTE DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR GRAVIDADE DE PLÁSTICO PÓS-CONSUMO: “FUNDO DE TANQUE”

Gabriel Carvalho Bertassone Avila

Monografia submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado por:

Prof.^a Carla Reis de Araújo, D.Sc.

Gerson Alberto Valencia Albitres, D.Sc.

Orientado por:

Prof. Luis Claudio Mendes, D.Sc.

Sibele Piedade Cestari, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Outubro de 2021

Avila, Gabriel Carvalho Bertassone

Caracterização do resíduo proveniente do processo de separação por gravidade de plástico pós-consumo: "Fundo de tanque" / Gabriel Carvalho Bertassone Avila. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2021.

ix, 46 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2021.

Orientadores: Luis Cláudio Mendes e Sibeled Piedade Cestari.

1. Reciclagem. 2. Plástico pós-consumo. 3. Separação por gravidade. 4. Caracterização. 5. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 6. Luis Cláudio Mendes e Sibeled Piedade Cestari. I. Título

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe Vânia, ao meu pai Gilson e à minha irmã Gabriela pelo amor e pelo apoio incondicional aos meus estudos e desenvolvimento, incentivando minhas escolhas com todo carinho e compreensão.

Aos meus orientadores, Professor Luis e Sibebe, por terem me aceitado como aluno de iniciação científica no início da minha graduação, o que me abriu portas para oportunidades acadêmicas incríveis, assim como os agradeço pela dedicação e por todos os ensinamentos durante a condução deste trabalho.

Aos colegas do LAMPOLS e do IMA, por serem sempre gentis e dispostos a ajudar e por todas as conversas entre a realização de um experimento e outro.

Ao Fernando Garcia e à CODESFI, pela doação do material e por abrir as portas da cooperativa para a realização deste estudo, acreditando na importância da pesquisa e da reciclagem.

Aos meus amigos de longa data e aos que fiz no Fundão, por serem fontes de apoio e risadas, tornando todo este caminho mais fácil e prazeroso.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO PROVENIENTE DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR GRAVIDADE DE PLÁSTICO PÓS-CONSUMO: “FUNDO DE TANQUE”

Gabriel Carvalho Bertassone Avila

Outubro, 2021

Orientadores: Prof. Luis Cláudio Mendes, D.Sc.

Sibele Piedade Cestari, D.Sc.

A reciclagem mecânica é o método mais comum para a reciclagem de plástico no Brasil, no entanto ainda hoje a porcentagem de reciclagem no país é baixa. Uma forma de incentivar o aumento dessa taxa é através de estudos de um fluxo já existente de plásticos reciclados, buscando desenvolver produtos especificamente de plástico pós consumo. Neste trabalho, foi caracterizado um resíduo gerado dentro de uma cooperativa recicladora de plástico, criado a partir da separação por gravidade em tanques com soluções aquosas. Após a separação das frações de plásticos de interesse, uma mistura de plásticos pós-consumo permanece no fundo desses tanques e é tratado como rejeito. Com a caracterização deste resíduo, chamado de “Fundo de tanque”, é possível identificar sua composição e suas propriedades, viabilizando sua utilização em produtos, ajudando a estabelecer sua cadeia de reciclagem. O conjunto de análises permitiu inferir que a amostra “Fundo de tanque” é constituída por cerca de 50% de mistura de HDPE/PP e 50% de PS, evidenciando uma baixa complexidade da mistura e que a separação por gravidade úmida empregada não foi eficiente. Outros métodos de separação podem ser empregados neste resíduo, como por exemplo a separação eletrostática, para a obtenção de mais resinas recicladas de PP, PE e PS. Com a composição encontrada para o “Fundo de tanque” e suas propriedades térmicas, vemos que o material pode ser processado de forma análoga às poliolefinas sem que ocorra degradações, o que pode constituir uma vantagem para a indústria recicladora.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	POLÍMEROS	4
3.1.1	Propriedades térmicas	6
3.2	RESÍDUOS SÓLIDOS PLÁSTICOS.....	7
3.3	RECICLAGEM DE PLÁSTICOS.....	8
3.3.1	Separação de plásticos	12
3.3.2	Projeto a partir da reciclagem (Design from Recycling)	15
3.4	CARACTERIZAÇÃO DE POLÍMEROS	16
3.4.1	Calorimetria de varredura diferencial	16
3.4.2	Termogravimetria	17
3.4.3	Análise térmica dinâmico-mecânica.....	17
3.4.4	Espectroscopia vibracional de absorção no infravermelho	19
4	MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1	MATERIAL.....	21
4.1.1	Resíduo plástico pós-consumo “Fundo de Tanque”.....	21
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO “FUNDO DE TANQUE”	25
4.2.1	Calorimetria diferencial de varredura (DSC)	25
4.2.2	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	25
4.2.3	Dissolução seletiva com clorofórmio	25
4.2.4	Análise dinâmico-mecânica (DMA)	26
4.2.5	Termogravimetria (TGA)	27
4.2.6	Calcinação	27

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO “FUNDO DE TANQUE”	27
5.1.1	Calorimetria diferencial de varredura (DSC)	27
5.1.2	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	29
5.1.3	Dissolução seletiva em clorofórmio	30
5.1.4	Análise dinâmico-mecânica (DMA)	33
5.1.5	Termogravimetria (TGA)	34
5.1.6	Calcinação	36
6	CONCLUSÕES	37
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	38
8	REFERÊNCIAS	39
	APÊNDICE A – ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DO ESPECTRO DE FTIR DO “FUNDO DE TANQUE”	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação de classificações estruturais de cadeias macromoleculares..	6
Figura 2: Fluxo da logística reversa aplicada à cadeia de plásticos.	10
Figura 3: Método de separação de plásticos pela diferença de densidade.	13
Figura 4: Relação entre a tensão, deformação e ângulo de defasagem durante a análise dinâmico-mecânica.	18
Figura 5: Modos vibracionais moleculares.	20
Figura 6: Representação da metodologia empregada na CODESFI-Rio de separação de PS e obtenção do “Fundo de tanque”.	21
Figura 7: Representação da metodologia empregada na CODESFI-Rio de separação de PE e obtenção do “Fundo de tanque”.	22
Figura 8: Container com os resíduos do processo de separação por flotação na cooperativa de reciclagem.	23
Figura 9: Fração de materiais inservíveis retirados da amostra de “Fundo de tanque”.	23
Figura 10: Amostra de “Fundo de tanque” após ser lavado e triturado em liquidificador basculante industrial.	24
Figura 11: Amostra de “Fundo de tanque” após beneficiamento em moinho de facas.	24
Figura 12: Corpos de prova de “Fundo de tanque” utilizados na análise dinâmico-mecânica.	Erro! Indicador não definido.
Figura 13: Curvas calorimétricas do “Fundo de tanque”.....	28
Figura 14: Curva calorimétrica do terceiro aquecimento do “Fundo de tanque” de 80 °C a 130 °C.....	29
Figura 15: Espectro de FTIR do “Fundo de tanque”.....	30
Figura 16: Sacos plásticos com as frações não dissolvidas em clorofórmio após a dissolução seletiva.....	31
Figura 17: Filme polimérico formado após a evaporação de clorofórmio após a dissolução seletiva.....	31
Figura 18: Espectro de FTIR da fração de sólidos não dissolvidos em clorofórmio do “Fundo de tanque”.	32
Figura 19: Espectro de FTIR da fração de sólidos dissolvidos em clorofórmio do “Fundo de tanque”.	33
Figura 20: Curvas do módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E'') e $\tan \delta$ do “Fundo de tanque”.	34
Figura 21: Curvas termogravimétrica e derivada do “Fundo de tanque”.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Copolímero de acrilonitrila butadieno estireno
DMA	Análise dinâmico-mecânica
DSC	Calorimetria de varredura diferencial
EPS	Poliestireno expandido
FTIR	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier
HDPE	Polietileno de alta densidade
LDPE	Polietileno de baixa densidade
LLDPE	Polietileno linear de baixa densidade
PCR	Resinas plásticas pós-consumo recicladas
PET	Poli(tereftalato de etileno)
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Poli(cloreto de vinila)
PU	Poliuretano
TGA	Análise termogravimétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

T_c	Temperatura de cristalização
T_{final}	Temperatura de degradação final
T_g	Temperatura de transição vítrea
T_{onset}	Temperatura de degradação inicial
T_m	Temperatura de fusão cristalina
T_{max}	Temperatura onde a velocidade de degradação é máxima
$\tan(\delta)$	Tangente delta
E'	Módulo de armazenamento
E''	Módulo de perda

1 INTRODUÇÃO

No século XIX, a indústria de polímeros consistia basicamente na vulcanização da borracha natural e na modificação de outros polímeros naturais. Entretanto, em 1907 Lorde Baekeland inventou o primeiro processo de síntese de um material polimérico totalmente sintético, a resina fenol-formaldeído, ou baquelite. Já no século XX, a ciência e tecnologia de polímeros se desenvolveram rapidamente com a fabricação de polímeros a partir do petróleo e a automação da moldagem por injeção, o que reduziu os preços dos produtos finais e os tornou acessíveis para a população em geral. A partir de então, é possível ver materiais poliméricos presentes desde o vestuário, indústria automotiva, embalagens de alimentos e até em inovações na área médica (ABIPLAST, 2019; HAGE JR., 1998).

Os plásticos são materiais de propriedades únicas, baratos, duráveis, extremamente versáteis e se apresentam inclusive como uma maneira de diminuir as emissões de gases de efeito estufa se comparados com materiais mais tradicionais como madeira, metais, cerâmicas e vidro em muitas aplicações (DE PAULA AMANTES *et al.*, 2020). Por conta de todos esses fatores, em 2018 a produção mundial de plástico chegou a marca de 366 milhões de toneladas (ABIPLAST, 2019). Apesar dos diversos benefícios, o manejo incorreto de resíduos plásticos é um problema contemporâneo global que traz diversos impactos ambientais.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos entrou em vigor no Brasil em 2010, estabelecendo estratégias para a logística reversa do plástico, incentivando o reuso e a reciclagem do material frente à sua disposição em aterros, sendo estas ações-chave para diminuir a exploração de recursos e reduzir a poluição do solo, água e ar. Entretanto, pouco ainda é feito no país, onde apenas 1,6% do total de resíduos domiciliares e públicos coletados são reciclados (BRASIL, 2020).

O plástico pode ser reciclado mecanicamente e voltar a ser matéria-prima para a indústria de transformação, fechando seu ciclo de vida. Para que um fluxo de reciclagem de plástico seja bem-sucedido, é necessário que exista uma tecnologia de processamento viável e acessível, uma fonte de resíduos

econômica e confiável e um mercado interessado na resina reciclada e suas propriedades (MANO *et al.*, 1994).

Desta forma, este trabalho estudou um resíduo gerado dentro de uma cooperativa recicladora de plástico. Este resíduo é criado a partir da separação por gravidade em tanques com soluções aquosas, um dos principais processos utilizados na separação de plásticos. Após a separação das frações de plásticos de interesse, que serão transformados em resinas recicladas, uma mistura de plásticos pós-consumo permanece no fundo desses tanques, podendo representar até 25% em massa do total. Por não existir um mercado interessado em sua reciclagem, é tratado como rejeito e tem como destino o aterro sanitário. Com a caracterização deste resíduo, é possível identificar sua composição e suas propriedades, viabilizando sua utilização em produtos e incentivando a criação de um mercado de interesse para uma fonte de resíduos já bem estabelecida.

2 OBJETIVOS

Caracterizar o resíduo plástico pós-consumo “Fundo de tanque”, proveniente do processo de separação por gravidade realizado em cooperativas de reciclagem de plásticos, com a finalidade de viabilizar sua reciclagem.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a efetividade do processo de separação por gravidade empregado;
- Elencar as principais resinas plásticas constituintes do resíduo pós-consumo estudado;
- Obter prioritariamente suas propriedades térmicas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será feita uma revisão bibliográfica sobre polímeros, assim como sobre suas propriedades e métodos de caracterização relevantes para este trabalho. Também serão abordados os resíduos provenientes do uso de plásticos, sua reciclagem e o desenvolvimento de novos produtos reciclados.

3.1 POLÍMEROS

Polímeros são moléculas muito grandes que contêm um número de átomos encadeado superior a uma centena, que começam a apresentar características próprias mais dominantes do que as características resultantes da natureza química dos átomos ou dos grupamentos funcionais presentes. Estas são denominadas *macromoléculas* e suas propriedades são decorrência das interações intra e intermoleculares. As interações dipolo-dipolo, forças de Van der Waals e as ligações hidrogênicas criam resistência muito mais significativa se comparada às micromoléculas, causando até um aumento de viscosidade quando dispersas em um solvente adequado, o que não é observado em soluções com moléculas de cadeia curta (MANO; MENDES, 2004).

Polímeros são macromoléculas com estrutura química características, formadas por unidades químicas denominadas meros, que unidos por ligações covalentes, se repetem regularmente ao longo da cadeia. Os polímeros podem ser tanto de origem sintética quanto de origem natural, apresentando segmentos moleculares de 100 a 100.000 Å. A massa molar média pode atingir a ordem de milhões e está intrinsecamente ligada às suas propriedades, como sua reologia no estado fundido, tenacidade e elasticidade. Entretanto, eventos como ataques químicos, aquecimento e cisalhamento durante o processamento, ou exposição à radiação ultravioleta, podem modificar drasticamente a distribuição de massa molar de um polímero (CANEVAROLO, 2020).

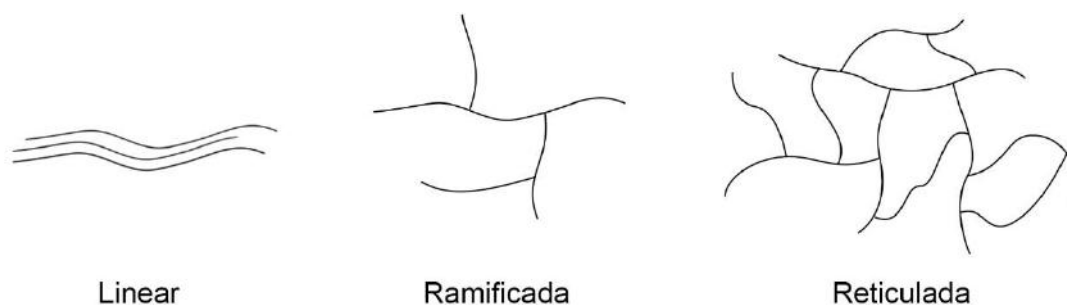
Os monômeros são as micromoléculas suscetíveis a reagir para formar polímeros. O tipo de reação que promove a interligação dos meros para a formação da cadeia polimérica determina o quanto a composição do polímero será parecida com a composição do monômero. A reação química que resulta

na interligação dos meros e na formação do polímero é denominada polimerização (MANO; MENDES, 2004).

Os polímeros podem existir em estado amorfo ou em estado cristalino. Na verdade, não há polímero 100% cristalino, e sim semicristalinos, constituídos de fase amorfa e fase cristalina. Esta diferenciação é um fator determinante nas propriedades (HALARY; LAUPRÊTE; MONNERIE, 2011). As cadeias de polímeros são longas o suficiente para dobrarem sobre si mesmas, e a mesma cadeia pode participar da formação de regiões cristalinas e de regiões amorfas concomitantemente, conectando estas fases ordenadas e desordenadas. Essas conexões em polímeros semicristalinos resultam em um aumento de resistência e tenacidade, o que possibilita a aplicação destes materiais em tubulações de drenagem, tanques de armazenamento de produtos químicos e sacos plásticos, evidenciando a importância deste fator estrutural para os materiais poliméricos (PEACOCK; CALHOUN, 2006).

Quanto à fusibilidade dos polímeros, estes podem ser divididos em duas categorias: termoplásticos e termorrígidos. Os termoplásticos se fundem ao serem aquecidos e se solidificam ao serem resfriados em um processo reversível, como é o caso dos polímeros lineares ou levemente ramificados, já que suas cadeias permitem que estas deslizem umas sobre as outras sob a influência de temperatura e pressão. Esta propriedade facilita seu processamento e moldagem a altas temperaturas. Quanto aos polímeros termorrígidos, estes possuem uma estrutura com ligações cruzadas, mantendo suas cadeias interconectadas em posições fixas, o que os torna infusíveis. Os termorrígidos podem ainda ser divididos entre termorrígidos químicos e termorrígidos físicos, no qual o primeiro é totalmente insolúvel em qualquer solvente e o segundo pode ser solúvel em solventes adequados muito polares. A Figura 1 mostra possíveis estruturas da cadeia polimérica (MANO; MENDES, 2004; PEACOCK; CALHOUN, 2006).

Figura 1: Representação de classificações estruturais de cadeias macromoleculares.



Fonte: adaptado de Peacock e Calhoun (2006).

Os polímeros mais difundidos no planeta são: polipropileno (PP), polietileno de baixa densidade (LDPE), polietileno de alta densidade (HDPE), poli(cloreto de vinila) (PVC), poliuretano (PU), poli(tereftalato de etileno) (PET) e poliestireno (PS). O polietileno, englobando LDPE e HDPE, é o plástico mais utilizado em embalagens, seguido pelo PP. Juntos, constituem as poliolefinas e fazem parte de mais da metade da demanda global de produção de plástico (SERRANTI; BONIFAZI, 2019).

Conforme constatado por de Paula Amantes *et al.* (2020), os polímeros podem ser processados nos mais diversos formatos, e possuem menor custo energético de processamento se comparado a materiais tradicionais como madeira, metais, cerâmicas e vidro. A facilidade de processamento alinhada à existência de uma multiplicidade de constituições químicas e formulações – que levam às mais diversas propriedades – fizeram com que desde o último século este material tenha sido extensamente utilizado.

3.1.1 Propriedades térmicas

Os termoplásticos são sensíveis a mudança de temperatura e várias de suas propriedades mecânicas, elétricas e químicas são dependentes da temperatura em que o material se encontra. Como os polímeros são utilizados em diversos contextos e ambientes, um estudo de suas propriedades térmicas é necessário para garantir a utilização do material de forma segura e conforme as propriedades esperadas.

A temperatura de transição vítrea (T_g , do inglês *glass transition temperature*) é a temperatura na qual a fase amorfa de um polímero aumenta a

movilidade molecular, resultando em mudanças significativas de propriedades. Geralmente, em temperaturas inferiores à temperatura de transição vítrea, as ligações primárias da cadeia principal juntamente com as interações intra e intermoleculares estão em um grau de coesão que torna o material rígido, enquanto acima da T_g há um afrouxamento desta coesão, gerando uma diminuição no módulo de elasticidade e a expansão do volume, devido ao aumento do movimento molecular local (ASHBY; JONES, 2013; CAMPO, 2008).

A temperatura de fusão cristalina (T_m , do inglês *melting temperature*) é a temperatura na qual polímeros semicristalinos apresentam uma transformação bem definida do estado sólido para o estado líquido. Termoplásticos amorfos possuem um intervalo de amolecimento gradual até sua fusão completa, não sendo possível determinar uma temperatura de fusão. A T_m e a T_g podem ser utilizadas como critérios para a determinação de resistência ao calor de polímeros semicristalinos e polímeros amorfos, respectivamente (CAMPO, 2008).

A temperatura de cristalização (T_c) representa o processo em que as cadeias poliméricas se organizam de forma regular, formando novamente uma estrutura cristalina a partir do resfriamento de um polímero semicristalino fundido (HALARY; LAUPRÊTE; MONNERIE, 2011).

As temperaturas ideais de uso de um material polimérico estão intrinsecamente conectadas às temperaturas de fusão cristalina e de transição vítrea. No caso das borrachas vulcanizadas, por exemplo, estas devem ser utilizadas em temperaturas acima de sua T_g , já que é necessário que apresentem alta elasticidade.

3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS PLÁSTICOS

O aumento da geração de resíduos acompanhou o processo de urbanização e industrialização ocorrido no mundo inteiro nas últimas décadas. O manejo incorreto de resíduos possui grande impacto ambiental, o que tem levado a uma mobilização coletiva em torno do gerenciamento de resíduos. Os resíduos plásticos se destacam neste cenário já que possuem baixa degradabilidade na

natureza e sua presença no lixo urbano tem aumentado cada vez mais (MATOS, 2007).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei 12.305 de 2010, determina que todo resíduo sólido reciclável deve ser recuperado, e apenas resíduos sólidos não recicláveis devem ter como destinação final aterros sanitários. O PNRS estabelece também o princípio de responsabilidade compartilhada entre os atores da cadeia de geração dos resíduos sólidos, os tornando responsáveis pela destinação correta dos produtos com o objetivo de reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental (BRASIL, 2010). Entretanto, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, apenas 1,6% dos 65,1 milhões de toneladas de resíduos domiciliares e públicos potencialmente coletados em 2019 foram recuperados através da reciclagem (BRASIL, 2020).

No que se refere aos plásticos, de acordo com a ABIPLAST (2020) a indústria transformadora de plásticos brasileira produziu 7,3 milhões de toneladas em produtos, sendo os principais setores consumidores a construção civil (23,1%), o setor de embalagens para alimentos (20,4%) e o setor de automóveis e peças (8,9%). Em 2019, as principais resinas consumidas no Brasil foram o poli(propileno) (PP, 21,0%), poli(cloreto de vinila) (PVC, 13,6%), poli(etileno de alta densidade) (HDPE, 12,7%), poli(etileno linear de baixa densidade) (LLDPE, 11,8%) e o plástico reciclado (10,6%) (ABIPLAST, 2019). Entretanto, quando se trata de plásticos provenientes da coleta regular de resíduos sólidos domiciliares de uma grande cidade brasileira, as principais resinas por percentual de massa são o poli(tereftalato de etileno) (PET, 36,74%), HDPE (28,58%), PP (17,36%) e poliestireno (PS, 6,29%) (MATOS, 2007). Um estudo realizado por Quitaes *et al.* (2018) com dados da Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (COMLURB) evidenciou que a fração plástica reciclável pode representar 24,8% do total de resíduo sólido domiciliar gerado.

3.3 RECICLAGEM DE PLÁSTICOS

Em um contexto de grande demanda por produtos plásticos e uso intensivo dos recursos naturais, a reciclagem é uma atividade essencial para um

desenvolvimento sustentável, apresentando diversos efeitos econômicos e ambientais benéficos. Entre esses efeitos, estão a minimização da exploração de recursos naturais, a redução da poluição do solo, água e ar, a mitigação das emissões de gases do efeito estufa, a redução dos custos de produção e a geração de renda (ANCAT, 2019). Todos estes benefícios devem estar alinhados com um estudo de ciclo de vida, que pode determinar qual método de reciclagem é o mais adequado ao analisar toda energia e matéria-prima utilizada, assim como todos os impactos gerados (BAIRD; COLLIAS, 2014).

O ciclo de vida de um produto polimérico se inicia com sua matéria-prima – o material polimérico, sendo ele virgem ou reciclado – que pode ser processada e transformada em um produto através de processos de transformação como extrusão e injeção. Durante a manufatura, pode ser gerado o resíduo sólido plástico chamado de pós-industrial ou pré-consumo, como os galhos, aparas ou rebarbas do processo de injeção, que possuem a vantagem de estarem limpos e serem de composição conhecida. Em termos de reciclagem, o resíduo pós-industrial é o de maior qualidade e usualmente é reciclado na própria empresa geradora. A reciclagem feita ainda na indústria de processamento é classificada como reciclagem primária (GUNJAN; BHARTI; SHARMA, 2020).

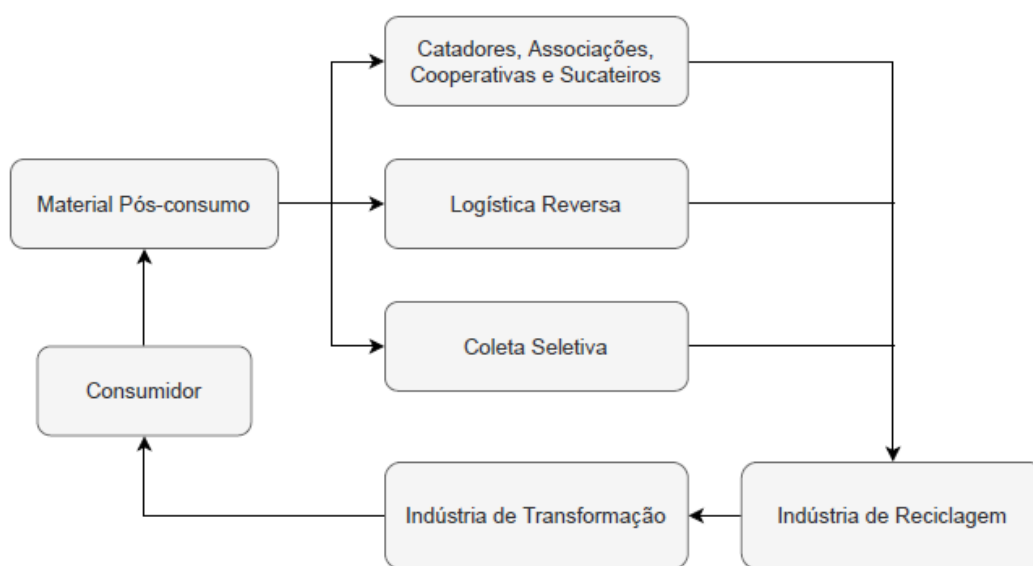
Após a utilização do artefato plástico pelo consumidor doméstico ou comercial, este se torna um material pós-consumido e já não pode ser utilizado para a aplicação a que se destinava, sendo então descartado. Este tipo de resíduo sólido plástico consiste em uma mistura de composição desconhecida e está potencialmente contaminado com frações orgânicas (como restos de alimentos e papel) e frações inorgânicas, o que aumenta a complexidade da sua reciclagem se comparado ao resíduo sólido plástico pós-industrial. Ainda assim, esse material pode ser utilizado na reciclagem mecânica, também chamada de secundária, que consiste na conversão dos materiais descartados em matéria-prima não-virgem a ser transformada novamente em bens de consumo pela indústria de transformação (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017).

Do ponto de vista ambiental, a prioridade é evitar a criação de resíduos sólidos plásticos, seja por otimização na produção ou pela promoção da reutilização. A reciclagem é uma rota altamente viável, aplicada como opção preferencial e que fecha o ciclo de vida do produto polimérico. Caso não seja

possível a reciclagem primária ou secundária, a recuperação energética ou reciclagem química deve ser priorizada frente à destinação em aterros sanitários (SINGH *et al.*, 2017).

Associações e cooperativas de catadores, catadores individuais e sucateiros, em conjunto com ações de logística reversa e coleta seletiva, são essenciais para a reciclagem de artefatos plásticos. Estes são os atores que realizam uma triagem preliminar e encaminham o material para a indústria recicladora. A indústria recicladora é responsável por processar os resíduos e transformá-los em matéria-prima reciclada. Esta matéria-prima secundária é então vendida à indústria de transformação, que produzirá bens de consumos ou embalagens à disposição do mercado consumidor (ANCAT, 2019; SINDIPLAST, 2011). Na Figura 2 está representado esquematicamente o fluxo da logística reversa aplicada à cadeia de plásticos.

Figura 2: Fluxo da logística reversa aplicada à cadeia de plásticos.



Fonte: adaptado de SINDIPLAST (2011).

O estudo de Coelho *et al.* (2011) evidencia que o Brasil é o segundo país que mais recicla PET no mundo, mesmo sem uma regulação por lei acerca de sua disposição final, sendo catadores de materiais recicláveis os maiores responsáveis pela reintegração do PET pós-consumo para indústrias recicladoras, que o utilizam para a fabricação de novas embalagens e de fibras têxteis, principalmente. Este fato demonstra que o estabelecimento de rotas de

reciclagem para plásticos pós-consumo depende de processos que sejam tecnológica e economicamente viáveis, e da existência de um mercado que se interesse em utilizar este material mesmo em um contexto em que não existam incentivos legais.

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Plástico (ABIPLAST) em 2019 foram produzidas no Brasil 838,5 mil toneladas de resinas plásticas pós-consumo recicladas, codificadas como PCR, sendo o setor de higiene pessoal e limpeza doméstica e o setor da construção civil os principais mercados consumidores destas resinas (Tabela 1).

Tabela 1: Principal mercado consumidor por resina plástica pós-consumo reciclada (PCR) em volume %.

Resina	Principal mercado consumidor	Produtos	Volume
EPS PCR	Construção civil	Molduras, rodapés, telhas, lajes, lajotas e perfis.	78%
HDPE PCR	Construção civil	Mangueiras corrugadas, tubulações e conexões.	30%
LLDPE PCR	Agroindústria	Lonas e mangueiras para irrigação.	25%
PET PCR	Higiene pessoal e Limpeza doméstica	Frascos e garrafas em geral.	27%
PP PCR	Utilidades domésticas	Baldes, bacias e lixeiras.	37%
PS PCR	Brinquedos	Peças para barrinhos, bonecos.	27%
PVC PCR	Construção civil	Tubos, conexões, esquadrias, perfis e forros.	30%

Fonte: ABIPLAST, 2020.

O método mais comum para a reciclagem de plástico no Brasil é a reciclagem mecânica. Tipicamente, esta reciclagem envolve as etapas de coleta, separação, lavagem, moagem, extrusão e granulação de acordo com as características do plástico em termos de origem, tamanho e composição (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017). A reciclagem mecânica produz menos 20% de emissões de gás carbônico se comparado ao processo de obtenção de um material virgem e seu impacto poderia ser ainda menor se o transporte e a

energia utilizada utilizassem tecnologias com baixa emissão de carbono (MATERIAL ECONOMICS, 2018).

3.3.1 Separação de plásticos

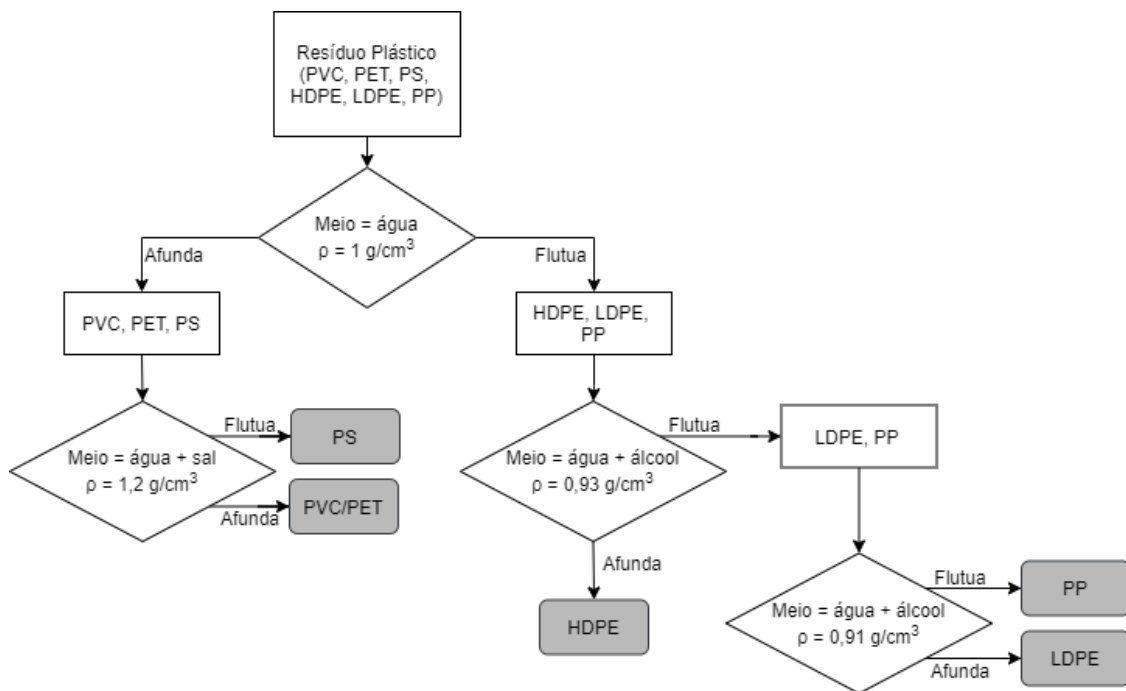
Um dos principais problemas da produção de resinas plásticas recicladas é que grande parte dos tipos de plástico não são compatíveis entre si. Ainda que misturas de plásticos possam ser processadas de forma direta para utilização em fins que não exijam propriedades mecânicas excelentes – como é o caso da fabricação de compósitos de madeira plástica (MARTINEZ LOPEZ *et al.*, 2020), compósitos com fibras de poliéster reciclada (CAVALIERI; PADELLA, 2002), ou como carga polimérica de baixo custo (LA MANTIA, 1992, 1993) – a separação dos plásticos é uma etapa fundamental para se obter uma matéria-prima não-virgem economicamente competitiva e que leve a um produto com boas propriedades mecânica, possibilitando sua utilização de forma ampla (LUIJSTERBURG; GOOSSENS, 2014).

Com o avanço tecnológico no campo da reciclagem, diferentes métodos de separação de plásticos com tamanho já reduzido se consolidaram, como por exemplo a separação eletrostática, dissolução seletiva e separação por gravidade. A separação eletrostática é uma técnica de separação que utiliza o efeito triboelétrico para separação de materiais não condutores baseado nas diferenças de suas propriedades elétricas. Conforme estudado por Silveira *et al.* (2018), este processo pode ser utilizado com sucesso para a separação de PP e PE, assim como na separação de PET e PVC provenientes do sistema de coleta seletiva municipal, com taxas de recuperação e pureza superiores a 90,2%.

A separação por dissolução seletiva consiste na utilização de um sistema com líquidos solventes e não-solventes em razões diversas para dissolver polímeros específicos, de acordo com os parâmetros de solubilidade do sistema de solventes e do polímero de interesse. Achilias *et al.* (2007) reportou a utilização da separação por dissolução seletiva de polietileno de baixa densidade (LDPE) e HDPE, e PP virgens e de resíduos comerciais, utilizando como solvente tolueno e xileno, atingindo uma taxa de recuperação de cada polímero maior que 90%.

Os métodos de separação por gravidade são as tecnologias de separação de resíduos plásticos que utilizam a força da gravidade como força dominante. Estes métodos podem ser classificados em secos, os quais utilizam o ar como meio da separação, e em úmidos, que utilizam água ou outros solventes. A separação por densidade em meio aquoso, também conhecida como *sink-float separation* (termo em inglês para separação afunda-flutua) é um método de separação por gravidade úmido baseado na diferença de densidade dos materiais (SERRANTI; BONIFAZI, 2019). A separação ocorre quando o material é introduzido em um tanque contendo um fluido de densidade conhecida, geralmente água e/ou soluções salinas ou alcoólicas, na qual materiais com densidade menor do que o fluido irá boiar, enquanto os materiais mais densos irão afundar. Este tipo de separação é eficiente quando os plásticos pós-consumidos possuem diferença considerável de densidade, como é o caso das poliolefinas e de plásticos mais pesados como o PS, PVC e PET, que podem ser separados utilizando água como meio. Na Figura 3 está detalhada a representação esquemática de separação de resíduo plástico contendo LDPE, HDPE, LLDPE, PP, PS, PVC e PET.

Figura 3: Método de separação de plásticos pela diferença de densidade.



Fonte: adaptado de SINDIPLAST (2011).

Na Tabela 2 podem ser vistos alguns materiais plásticos com densidade maior que 1,00 g/ml. Esses plásticos podem ser separados utilizando soluções salinas, enquanto os plásticos que possuem pouca diferença de densidade, como é o caso do PVC e do PET, são dificilmente separados por gravidade. A separação por um líquido de baixa densidade também pode ser interessante na separação de resíduos plásticos de resíduos de alimentos, por exemplo. Neste caso, pode-se obter soluções de baixa densidade utilizando um ou mais solventes orgânicos, como hexano, etanol, xileno e tolueno, apesar do uso desses líquidos apresentar maiores custos de operação e riscos de segurança (FERRARA; MELOY, 1999).

Tabela 2: Densidade de alguns dos plásticos mais comuns.

Polímero		Densidade (g/ml)
LDPE	polietileno de baixa densidade	0,91–0,93
HDPE	polietileno de alta densidade	0,95–0,96
PP	polipropileno	0,90–0,91
PS	poliestireno	1,04–1,07
ABS	acrilonitrila butadieno estireno	1,05–1,07
PU	poliuretanos	1,11–1,25
PC	policarbonato	1,2
PVC	policloreto de vinila	1,30–1,35
PET	tereftalato de polietileno	1,37

Fonte: FERRARA; MELOY, 1999.

Mumbach *et al.* (2019) realizaram o estudo de recuperação e caracterização de resíduos plásticos provenientes do processo de reciclagem de uma indústria de papel. Primeiramente, foi realizada uma etapa de dissolução seletiva utilizando acetato de etila como solvente para remoção de resinas adesivas. Em seguida, foi feita a separação por diferença de densidade em solução aquosa, utilizando soluções com diferentes razões de água e álcool etílico com o objetivo de isolar as frações de poliolefinas. Como resultado deste processo de separação foi possível obter uma fração praticamente pura de PP.

A presença de contaminantes, bolhas de ar ou aditivos e cargas na composição do material podem afetar a eficiência da separação por densidade (SERRANTI; BONIFAZI, 2019).

3.3.2 Projeto a partir da reciclagem (*Design from Recycling*)

O projeto a partir de reciclagem (*design for recycling*) é uma nova abordagem estratégica desenvolvida pela Universidade de Gante e pela Universidade da Antuérpia visando o conceito de economia circular, na qual é avaliado quais produtos podem ser desenvolvidos a partir de um fluxo já existente de plásticos reciclados. O projeto visa o desenvolvimento de produtos focado na reciclabilidade e na redução de seus impactos durante seu ciclo de vida (MARIS *et al.*, 2014). Tem como objetivo desenvolver produtos especificamente de plástico pós-consumo, buscando aplicações através das especificações destes materiais (LORE *et al.*, 2017).

A metodologia inclui estudos sobre a percepção do consumidor e sua experiência com o novo material. Entretanto, o ponto de partida é a perspectiva técnica, com uma extensa pesquisa dos parâmetros úteis para o processamento do material e sua caracterização, identificando seus pontos fortes e pontos fracos. Esta pesquisa inclui, por exemplo, a identificação dos tipos de polímero no resíduo por FTIR, obtenção das propriedades térmicas com DSC e propriedades mecânicas com testes de impacto e tensão. Com essas informações, é possível combinar as características do material reciclado com potenciais produtos novos ou já existentes, escolher o processo de manufatura mais adequado, identificar a necessidade e a viabilidade econômica da utilização de compatibilizantes e modificadores, assim como quantificar o impacto ambiental do material (LORE *et al.*, 2017; RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017).

Utilizando esta metodologia, o estudo de Ragaert *et al.* (2018) demonstrou o caso de um resíduo pós-industrial de PP reciclado contaminado com PET no qual foi possível fechar o ciclo deste material ainda dentro da empresa geradora ao desenvolver uma aplicação de alto impacto e rigidez média. Em outro estudo, foi possível o desenvolvimento de telhas para telhados verdes inclinados, utilizando como material o resíduo do processo de separação por densidade de embalagens plásticas pós-consumo. Este resíduo de composição complexa foi capaz de ser utilizado como matéria prima após a análise da composição, propriedades mecânicas e remoção de PVC e metais não-ferrosos (RAGAERT *et al.*, 2020). Já o estudo de Damme *et al.* (2016) realizou a caracterização de

copolímero acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) reciclado proveniente de veículos e de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos com a finalidade de estudar maneiras de reutilizar este material para aplicações futuras. Assim como o estudo de Hubo *et al.* (2015) que, visando a mesma finalidade, avaliou diversos resíduos pós-industriais e pós-consumo de poliolefinas para viabilizar sua utilização em moldagem por injeção.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DE POLÍMEROS

Nesta seção, estão descritas algumas técnicas de caracterização de polímeros, que foram utilizadas na parte experimental deste documento.

3.4.1 Calorimetria de varredura diferencial

A calorimetria de varredura diferencial (DSC, *differential scanning calorimetry*) é uma ferramenta analítica efetiva para a caracterização de polímeros e a determinação das temperaturas de fusão cristalina, temperatura de cristalização e as respectivas entalpias, assim como a determinação da temperatura de transição vítrea (SCHICK, 2009).

A análise consiste na quantificação da energia necessária para aumentar a temperatura de uma amostra durante transições térmicas específicas quando comparada a uma amostra de referência, normalmente o ar. Em processos endotérmicos, a amostra precisa de um fluxo de calor maior para aumentar sua temperatura, enquanto em processos exotérmicos, precisa de um fluxo de calor menor se comparado ao material de referência. O equipamento funciona mantendo a diferença de temperatura entre a amostra e a referência sempre em zero, assim, qualquer mudança de fase ou transição térmica na qual a amostra absorve ou liberta calor pode ser notada pela compensação de energia dada pelo equipamento (GUO, 2016; TOMODA *et al.*, 2020).

A técnica de calorimetria é amplamente utilizada para medir a temperatura de transição vítrea, que resulta em um degrau da curva de fluxo de calor *versus* temperatura devido ao aumento do poder calorífico do polímero após a T_g . Durante a cristalização, calor é perdido para o ambiente, logo um menor fluxo de calor é necessário para manter a amostra na mesma temperatura que a

referência, gerando um vale na curva de fluxo de calor. A fusão cristalina requer absorção de calor (evento endotérmico), representando por um pico. A área da curva relacionada aos eventos de primeira ordem está associada à variação de entalpia durante cada transição e é um importante fator no estudo de seu processamento, definindo o quanto de energia é necessário para tornar o polímero fluído, permitindo sua moldagem (VYAZOVKIN, 2010).

3.4.2 Termogravimetria

A análise termogravimétrica (TGA) é uma técnica bastante disseminada para o estudo do processo de decomposição térmica, sendo especialmente útil para o estudo de materiais poliméricos, incluindo termoplásticos, termorrígidos, elastômeros, compósitos, filmes, fibras, revestimentos e tintas. Nesta análise, é medida a quantidade e a velocidade na qual a massa de uma amostra varia em função da temperatura e do tempo em um forno com atmosfera controlada. A amostra pode ser analisada tanto em uma temperatura crescente ou decrescente a uma taxa constante ou em uma temperatura isotérmica. Com a informação gerada, pode-se investigar a estabilidade térmica e a composição da amostra (como proporção de cargas, resinas poliméricas e solventes em sua formulação). Geralmente, incrementos de massa da amostra estão relacionados à adsorção ou oxidação, enquanto a perda de massa da amostra é atribuída aos fenômenos de decomposição, desidratação ou volatilização (CHEN, 2016; NG *et al.*, 2018).

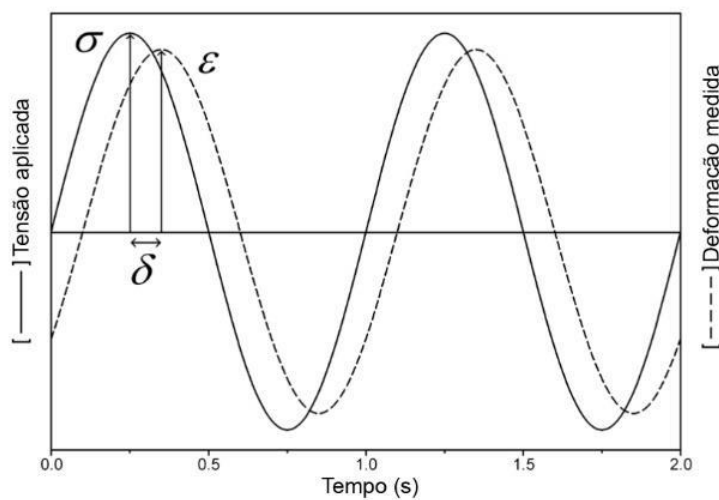
3.4.3 Análise térmica dinâmico-mecânica

A análise térmica dinâmico-mecânica, ou simplesmente dinâmico-mecânica (DMA, *dynamic-mechanical analysis*) é capaz de medir com precisão a temperatura de transição vítrea, mas também o módulo de armazenamento (elástico) (E') e módulo de perda (viscoso) (E'') em função da temperatura, ou frequência ou tempo. Utilizada especialmente para caracterizar o comportamento viscoelástico de polímeros, é uma técnica rápida, eficiente que requer pequenas quantidades de amostra (CANEVAROLO, 2020).

Nesta análise, uma tensão (σ) é aplicada ao corpo de prova, geralmente seguindo uma oscilação senoidal, resultando em uma curva da deformação (ϵ)

correspondente à tensão aplicada. Em materiais perfeitamente elásticos, toda energia aplicada para a deformação é armazenada e pode ser recuperada com a retirada da tensão, como seria o caso de uma mola ideal. Entretanto, a maioria dos materiais poliméricos possui comportamento viscoelástico, no qual parte da energia é perdida na forma de calor, resultando em um ângulo de defasagem (δ) entre a curva senoidal da tensão aplicada e a deformação gerada (Figura 4) (PRICE, 2016).

Figura 4: Relação entre a tensão, deformação e ângulo de defasagem durante a análise dinâmico-mecânica.



Fonte: adaptado de Price (2016).

A partir das informações de amplitude da tensão aplicada, amplitude da deformação medida e o ângulo de defasagem, é possível obter os módulos E' e E'' . O módulo de armazenamento (E') representa uma medida da energia mecânica que o material é capaz de reter na forma de energia potencial ou elástica durante a aplicação da tensão. Já o módulo de perda (E'') representa a energia perdida na forma de calor devido à tensão fora de fase com a deformação resultante. A razão entre o módulo de perda e o módulo de armazenamento (E''/E') é uma medida da quantidade de energia deformacional que é dissipada como calor durante cada ciclo, expressando a capacidade do material em dissipar a energia mecânica aplicada e é chamada de tangente delta ou fator de perda ($\tan \delta$). Grandes valores de $\tan \delta$ de um material representa que ele possui um maior comportamento viscoso, no qual toda energia de

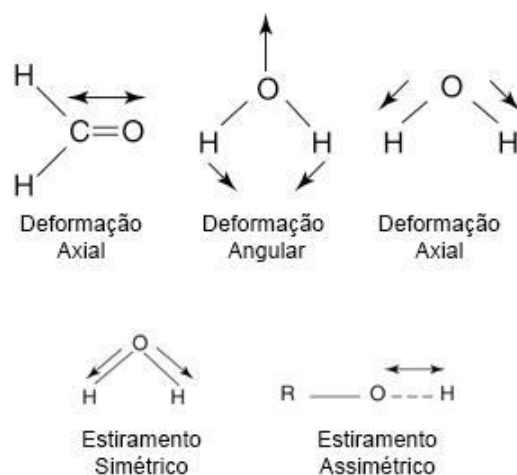
deformação é dissipada como calor, frente ao seu comportamento elástico (CASSU; FELISBERTI, 2005; LORANDI; ODILA; ORNAGHI JR., 2016).

3.4.4 Espectroscopia vibracional de absorção no infravermelho

A espectroscopia de absorção no infravermelho é uma ferramenta analítica confiável e de baixo custo para a identificação de polímeros. A radiação eletromagnética infravermelho é insuficiente para excitar elétrons, ao contrário da excitação no ultravioleta visível ou raios-x, mas pode induzir excitação vibracional de átomos e grupos ligados por ligações covalentes. Assim, a técnica permite que se investigue a geometria molecular e a natureza das ligações químicas presentes através das frequências vibracionais específicas destas ligações, que são dependentes da energia potencial da molécula, massa atômica ou geometria molecular, por exemplo. A energia será absorvida quando a molécula receber a radiação eletromagnética com energia exatamente igual a uma dessas vibrações. Para este fim, espectrômetros de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) são predominantemente usados e melhoraram drasticamente a aquisição de espectros de infravermelho (STUART, 2005; TOMODA *et al.*, 2020).

Os modos vibracionais costumam receber nomes descritivos: deformações axiais, também chamadas de estiramento, quando há uma variação no tamanho da ligação; ou deformação angular, quando há uma variação dos ângulos entre as ligações ou entre um plano de referência. Além disso, no estiramento os átomos podem se mover se aproximando ou se afastando do átomo central simultaneamente (estiramento simétrico) ou de forma assíncrona, quando um átomo se aproxima do átomo central enquanto o outro se afasta (estiramento assimétrico) (Figura 5) (GUERRERO-PÉREZ; PATIENCE, 2020).

Figura 5: Modos vibracionais moleculares.



Fonte: adaptado de Stuart (2005).

Para a análise adequada de polímeros, foca-se principalmente na região do infravermelho médio ($4000-400\text{ cm}^{-1}$), que é uma região rica em informações e bem caracterizada do espectro e que pode ser dividida em quatro regiões, sendo a natureza de uma frequência de grupo geralmente determinada pela região espectral em que está localizada. Esta região é dividida da seguinte forma: a região de estiramento X–H ($4000-2500\text{ cm}^{-1}$), a região de ligação tripla ($2500-2000\text{ cm}^{-1}$), a região de ligação dupla ($2000-1500\text{ cm}^{-1}$) e a região da impressão digital ($1500-600\text{ cm}^{-1}$). A região da impressão digital é caracterizada por sua grande complexidade, já que o espectro de uma molécula pode ter cem ou mais bandas de absorção presentes e nem sempre bem-comportadas, o que torna difícil a assinalação de cada banda. Assim, os padrões encontrados nessa região são únicos para cada molécula e determinantes para sua identificação (BHARGAVA; WANG; KOENIG, 2003; STUART, 2005).

A espectroscopia de infravermelho é uma técnica bastante usada para examinar também misturas de polímeros. Se dois polímeros são imiscíveis, o espectro infravermelho deve ser a soma dos espectros dos dois componentes, já que a separação de fases implica que os polímeros que formam a mistura terão um comportamento semelhante aos polímeros puros. Se os polímeros forem miscíveis, as interações químicas entre as cadeias poliméricas individuais podem alterar o espectro (GARTON, 1992).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados o material caracterizado e os métodos utilizados em sua caracterização.

4.1 MATERIAL

Nesta seção será descrito o ciclo de separação na CODESFI-Rio e o procedimento de purificação e fracionamento no IMA.

4.1.1 Resíduo plástico pós-consumo “Fundo de Tanque”

A CODESFI-Rio é uma cooperativa de materiais recicláveis localizada da Zona Norte da Cidade do Rio de Janeiro que recebe sucata de metais, plástico, vidro, papel e papelão através de catadores, ferros-velhos, retiradas em empresas, condomínios e através do sistema de coleta seletiva do sistema de limpeza urbana municipal. Na cooperativa é realizada primeiramente uma triagem manual dos resíduos plásticos, separando-os por tipo de polímero (PET, PE, PS etc.). O material é separado manualmente, lavado e moído e transferido para um tanque onde será realizado o processo de separação por densidade, utilizando o método por gravidade úmido. O material caracterizado neste estudo é o resíduo polimérico proveniente da separação de PE e PS conforme o processo realizado na CODESFI-Rio (Figura 6 e 7).

Figura 6: Representação da metodologia empregada na CODESFI-Rio de separação de PS e obtenção do “Fundo de tanque”.

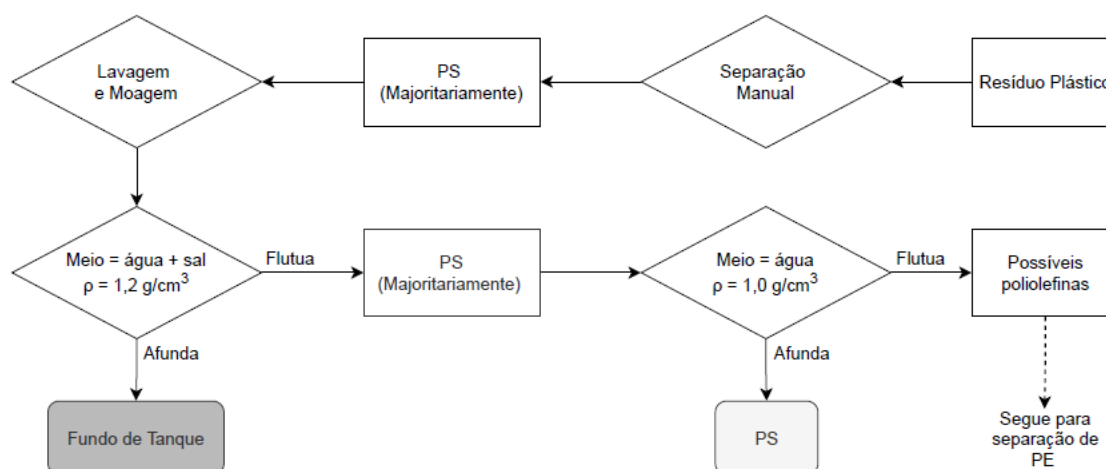
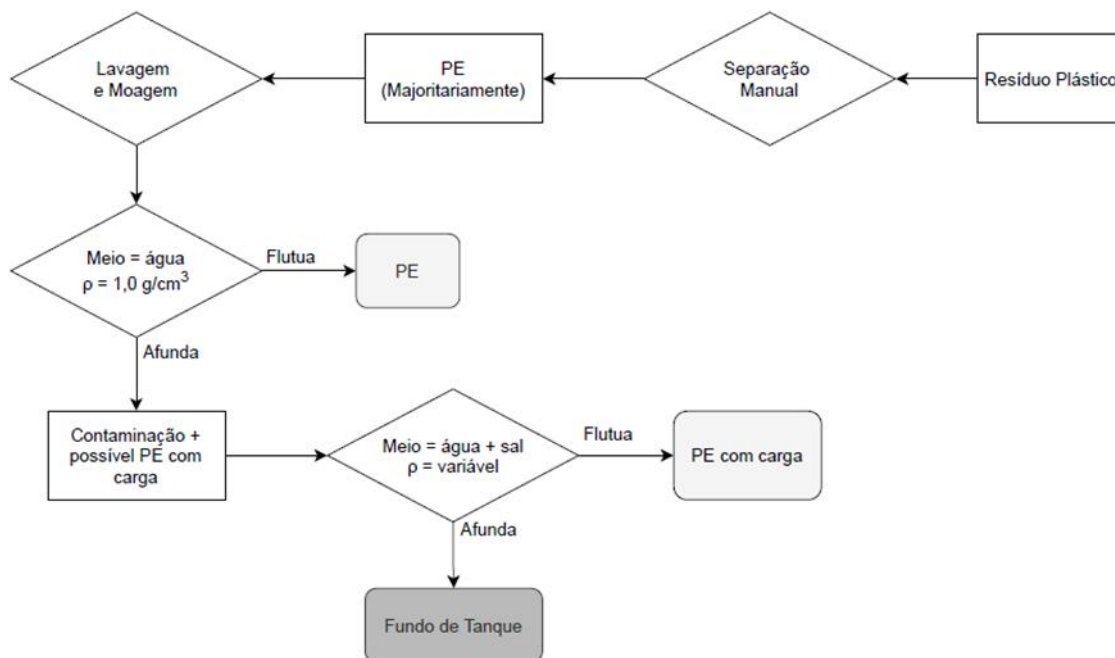


Figura 7: Representação da metodologia empregada na CODESFI-Rio de separação de PE e obtenção do “Fundo de tanque”.



Estes dois polímeros flutuam com o ajuste da densidade do meio e uma vez separados, são comprados pelas indústrias recicladoras na forma de granulado de resina reciclada. Entretanto, a fração do material que permanece no fundo do tanque após a separação não possui compradores, é tratada como rejeito e se acumula no galpão da cooperativa, tendo como única destinação possível o aterro sanitário. Esta fração (Figura 8) é aqui chamada de “Fundo de tanque” e o material foi gentilmente cedido pela CODESFI-Rio.

Figura 8: Container com os resíduos do processo de separação por gravidade na cooperativa de reciclagem.



Foram extraídas amostras de forma a garantir a representatividade do material e fez-se através de identificação visual a remoção de materiais não plásticos considerados inservíveis, como papel, barbante, metais, embalagens metalizadas, cerâmica, madeira, entre outros, representando 1,2% do peso total da amostra.

Figura 9: Fração de materiais inservíveis retirados da amostra de “Fundo de tanque”.



Para beneficiamento do material, foi realizada uma lavagem/trituração em um liquidificador basculante industrial Metalúrgica Skymesen Ltda., modelo LB-15P, capacidade 15 litros. O “Fundo de tanque” foi triturado em uma solução de sabão de coco em barra diluído em água, em concentração igual a 1% em massa

por 10 minutos. Após a trituração, o material foi enxaguado em água corrente e colocado em bandejas plásticas e secas ao sol por 8 horas.

Figura 10: Amostra de “Fundo de tanque” após ser lavado e triturado em liquidificador basculante industrial.



Com a intenção de facilitar o processamento, o material foi então moído em moinho de facas Biovera modelo SL033, aumentando a homogeneidade e diminuindo o tamanho de partículas.

Figura 11: Amostra de “Fundo de tanque” após beneficiamento em moinho de facas.



4.2 CARACTERIZAÇÃO DO “FUNDO DE TANQUE”

Nesta seção são descritas as análises de caracterização utilizadas nesse projeto.

4.2.1 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

Para avaliação das transições térmicas dos materiais foi utilizado o calorímetro da TA Instruments, modelo Q1000. Utilizando em todos os ciclos nitrogênio como gás de arraste, primeiramente a amostra foi aquecida de 0 até 200°C, a 10°C/min, mantendo por 1 minuto para eliminar a história térmica do polímero. Em seguida, a amostra foi resfriada à taxa máxima (200 °C/min) até 0°C. Para realização do segundo ciclo de aquecimento, a amostra foi novamente aquecida com as mesmas condições do primeiro aquecimento, de 0 até 200°C, a 10°C/min. No segundo ciclo de resfriamento, a amostra foi resfriada até 0°C, com velocidade controlada (10 °C/min). Ao final, foi aplicado aquecimento de 0 até 200°C, a 10°C/min. As temperaturas de cristalização (T_c) e de fusão cristalina (T_m) foram determinadas a partir do segundo resfriamento e do terceiro aquecimento, respectivamente.

4.2.2 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Para a caracterização da estrutura química dos materiais presentes no “Fundo de tanque” foi feita a espectroscopia na região do infravermelho utilizando filme prensado a 230 °C. A análise foi conduzida em equipamento Perkin-Elmer Frontier FT-IR/FIR, na faixa do infravermelho médio (4000 – 400 cm^{-1}), resolução de 4 cm^{-1} e 20 varreduras. Para a análise de correlação, foram utilizados os espectros da bibliografia científica - Hummel Polymer Sample Library e o software OMNIC, da ThermoScientific.

4.2.3 Dissolução seletiva com clorofórmio

O procedimento foi conduzido em tubo de ensaio com 1 g da amostra e 10 ml de clorofórmio. A amostra foi dissolvida em temperatura ambiente durante 12 horas. Após o período de dissolução, a fração solúvel foi vertida sobre placa

de Petri, e submetida à evaporação em estufa até massa constante. O resíduo insolúvel recebeu nova de carga de clorofórmio e o mesmo procedimento anterior foi executado. Ao todo, o procedimento foi repetido por três vezes. Desse modo, duas frações foram obtidas, a fração solúvel e a fração insolúvel em clorofórmio. Para identificação, as frações foram submetidas à análise de FTIR a partir do filme obtido de cada fração. O filme da fração insolúvel foi obtido através da prensa hidráulica a 230 °C, enquanto que o filme da fração solúvel pôde ser obtido através da evaporação do clorofórmio.

4.2.4 Análise dinâmico-mecânica (DMA)

A análise dinâmico-mecânica do material foi conduzida em equipamento TA Q800, corpo de prova retangular com bordas arredondadas com dimensão 6 x 1 x 0,2 cm, faixa de temperatura 25 a 140 °C, a 2 °C/min, frequência de 1 Hz, em modo de apoio simples (*single-cantilever*). Os corpos de prova (Figura 12) foram obtidos com amostra moída em moinho analítico básico IKA A 11, retirando os grânulos maiores usando uma peneira de mesh 1 e moldados com espaçadores metálicos e prensa hidráulica a 230 °C. Foram determinados os módulos de armazenamento (E') e perda (E'') e a tangente delta ($\tan \delta$).

Figura 12: Corpos de prova de “Fundo de tanque” utilizados na análise dinâmico-mecânica.



4.2.5 Termogravimetria (TGA)

A estabilidade térmica dos materiais foi avaliada através de análise termogravimétrica (TGA), utilizando o equipamento TA Instruments, modelo Q500. Para a análise, foi utilizado um intervalo de temperatura entre 30-700 °C, a 10 °C/min, e atmosfera de nitrogênio. A análise permitiu determinar a temperatura de degradação inicial ($T_{inicial}$), máxima (T_{max}), final (T_{final}) e bem como o teor de resíduo.

4.2.6 Calcinação

A determinação do teor de cinzas foi realizada com cerca de 1 grama de amostra em cadinho de porcelana. O conjunto foi levado a aquecimento direto em chama de bico de Bunsen até que a amostra parasse de emitir fumaça. Este processo tem a finalidade de impedir que a amostra inflame ao entrar na mufla e os gases gerados provoquem perda de material. Após a degradação térmica com auxílio do bico de Bunsen, o cadinho contendo os resíduos carbonizados da amostra foi colocando em forno mufla a 700 °C, durante 3 horas, de modo que toda a porção orgânica fosse consumida e restasse apenas o resíduo inorgânico. O cadinho foi retirado da mufla, resfriado à temperatura ambiente e o resíduo pulverizado foi quantificado, sendo determinada a razão percentual entre a massa de resíduo e a massa inicial da amostra.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados referentes aos métodos de caracterização empregados no “Fundo de Tanque”.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO “FUNDO DE TANQUE”

5.1.1 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

Na Figura 13 são apresentadas as curvas calorimétricas nos diferentes ciclos. Na curva térmica de resfriamento foi determinada a temperatura de cristalização, T_c , na faixa de 117-119 °C. Essa faixa de temperatura correspondeu ao processo de cristalização do PP. Na terceira curva de

aquecimento foram observados dois picos endotérmicos, com máximos em diferentes valores de temperatura de fusão cristalina, T_m . O primeiro, de menor entalpia (5,14 J/g), ocorreu na faixa de 126-127 °C, foi atribuído à T_m do HDPE enquanto o segundo, mais expressivo (25,19 J/g), ocorreu entre 158-160 °C, identificado como relativo à T_m do PP (MANO; MARTINS; MENDES, 2000). Os picos endotérmicos e exotérmicos registrados nesse trabalho encontraram similaridade (variação de 1% na faixa de temperatura) aos reportados por Hubo *et al.* (2015), considerando uma amostra de resíduo pós-industrial de PP misturado com PE. No terceiro ciclo de aquecimento, no intervalo de 80 °C a 130°C (Figura 14), foi observada a variação do perfil da curva térmica significando um aumento da capacidade térmica. Essa variação foi relacionada à temperatura de transição vítrea, T_g . O ponto de inflexão ocorreu a 99,48 °C. Esse valor foi associado à T_g do poliestireno atático, PS, conforme reportado no estudo de Chen *et al.* (2007). Em resumo, os resultados calorimétricos indicaram presença de mistura de PS, PP e HDPE. Considerando que somente a temperatura de cristalização do PP foi observada foi possível conjecturar que a quantidade de HDPE é muito inferior, sendo considerada impureza.

Figura 13: Curvas calorimétricas do “Fundo de tanque”.

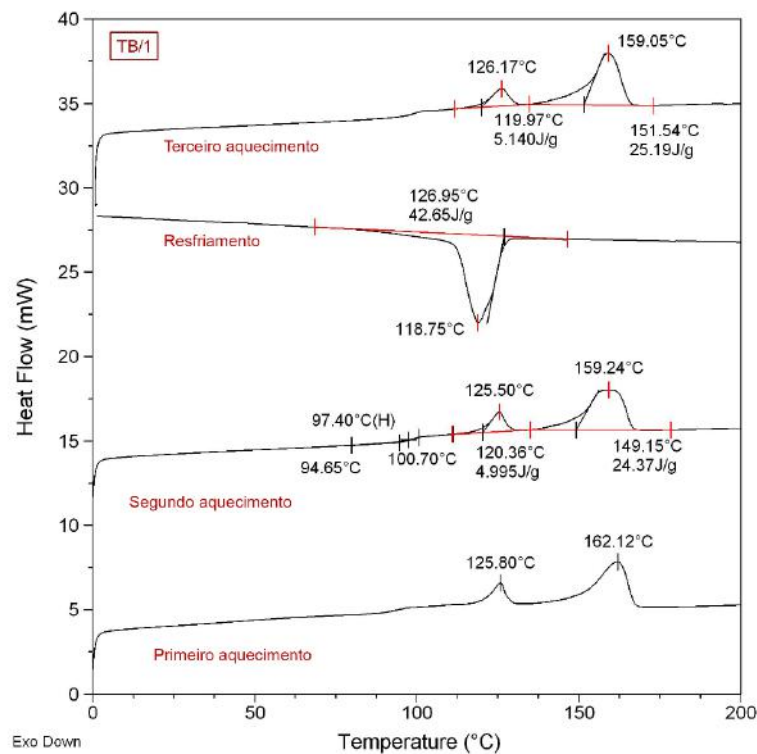
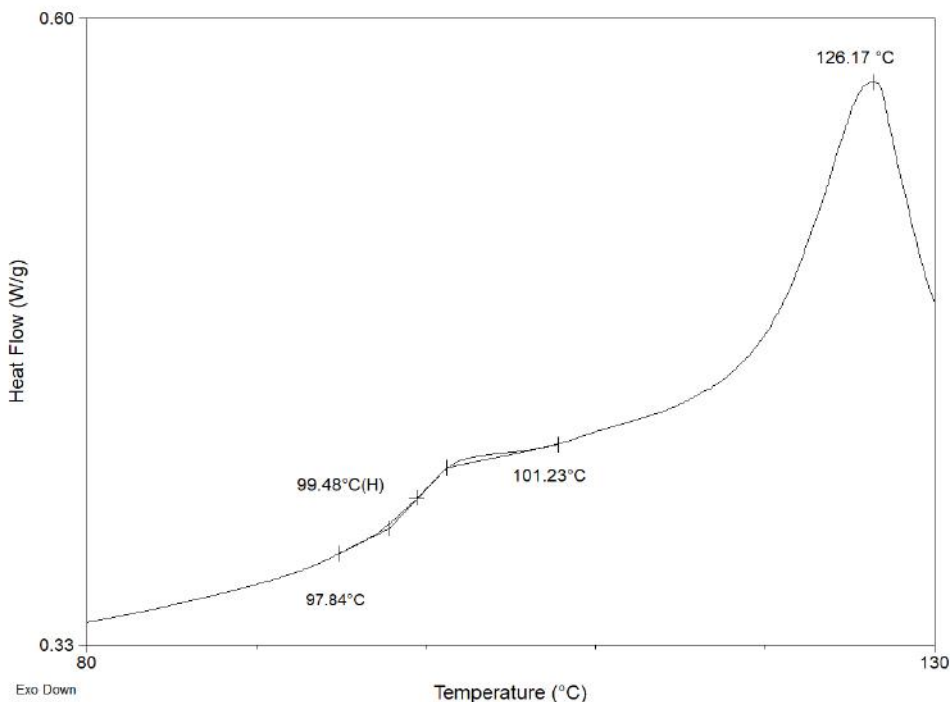


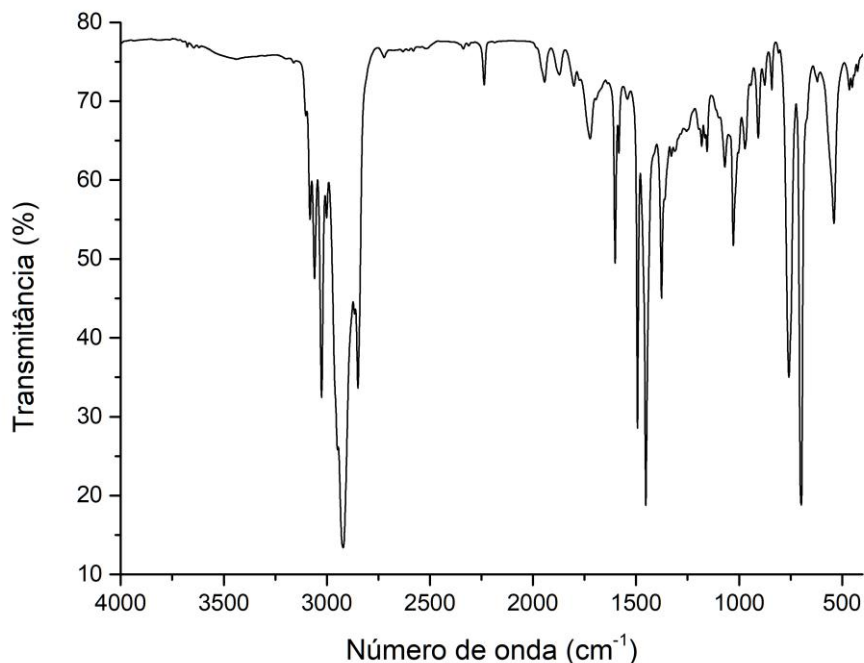
Figura 14: Curva calorimétrica do terceiro aquecimento do “Fundo de tanque” de 80 °C a 130 °C.



5.1.2 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 15 apresenta o espectro na região do infravermelho do “Fundo de tanque”. Constatou-se uma absorção em torno de 3025 cm^{-1} , correspondente à ligação C-H em anel aromático. Foi possível notar absorções em 2921 , 2849 e 1452 cm^{-1} referentes aos estiramento assimétrico, simétrico e deformação angular, respectivamente, de CH_3 e CH_2 em estrutura alifática, indicando que a cadeia principal é formada por carbonos saturados, característico no espectro de poliolefinas como PP e PE, e também presente no espectro do PS. A absorção em 1620 cm^{-1} foi associada ao estiramento de ligação dupla, entre carbonos de anel aromático. As absorções em 698 e 758 cm^{-1} foram relacionadas a anel aromático, monosubstituído (KUPTSOV; ZHIZHIN, 1998; LEÓN-BERMÚDEZ; SALAZAR, 2008).

Figura 15: Espectro de FTIR do “Fundo de tanque”.



Através da análise de correlação do espectro do “Fundo de tanque”, obteve-se uma correlação de 93,08% com o espectro do PS atático (Apêndice A), o qual também inclui absorções características de poliolefinas. Também foi possível evidenciar a ausência de bandas referentes a heteroátomos na cadeia principal, como o oxigênio, que evidenciaria a presença de poli(tereftalato de etileno) (PET). A ausência de estiramentos referentes à ligação carbono-haleto, confirma a ausência de poli(cloreto de vinila) (KUPTSOV; ZHIZHIN, 1998).

5.1.3 Dissolução seletiva em clorofórmio

Na tentativa de separação e quantificação dos componentes do Fundo de tanque, foi feita a dissolução seletiva utilizando clorofórmio. O procedimento foi realizado em triplicata, em tubos de ensaio contendo 1 g de amostra. Após a repetida dissolução em clorofórmio, separação da fração dissolvida, lavagem e secagem (Figura 16), foi obtida uma média de 0,47 g de sólidos não dissolvidos, representando em média de 47% da amostra total. Na Figura 17 é mostrado o filme obtido pela fração solúvel em clorofórmio.

Figura 16: Sacos plásticos com as frações não dissolvidas em clorofórmio após a dissolução seletiva.



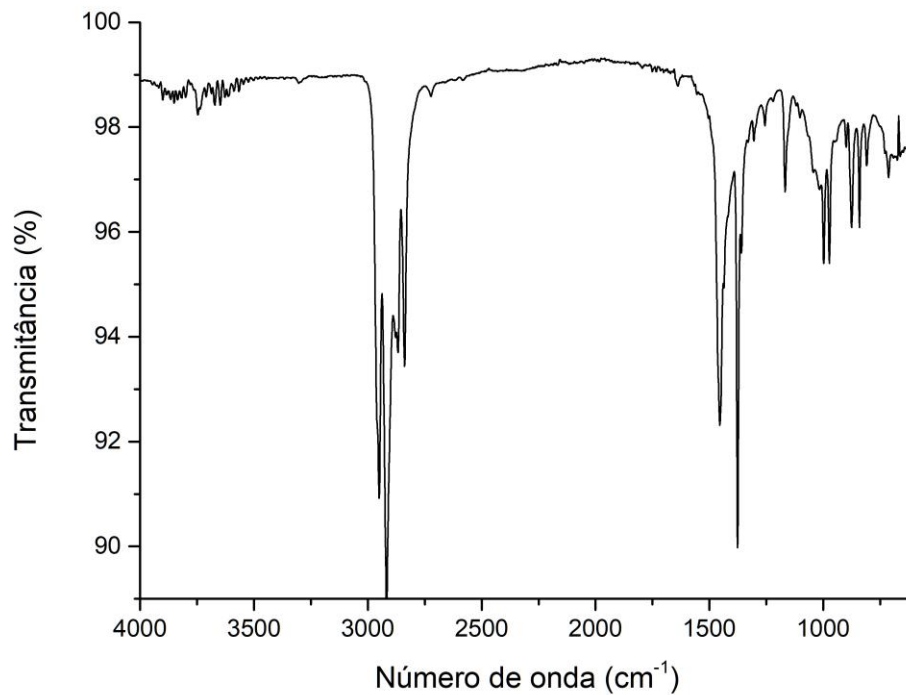
Figura 17: Filme polimérico formado após a evaporação de clorofórmio após a dissolução seletiva.



Foi realizada a análise de FTIR dos sólidos não dissolvidos em clorofórmio, obtendo-se o espectro mostrado na Figura 18. Pode-se notar que as absorções a 3025 , 1620 , 698 e 758 cm^{-1} foram eliminadas. Absorções em 2950 cm^{-1} (estiramento assimétrico de CH_3), 2920 cm^{-1} (estiramento assimétrico de CH_2), 2868 cm^{-1} (estiramento de CH_3), 1454 cm^{-1} (deformação simétrica de CH_3), 1376 cm^{-1} (deformação simétrica de CH_3), 1166 cm^{-1} (*rocking* de CH_3 e *wagging* CH), 996 cm^{-1} (*rocking* CH_3 e estiramento de C-C), 973 cm^{-1} (estiramento de C-

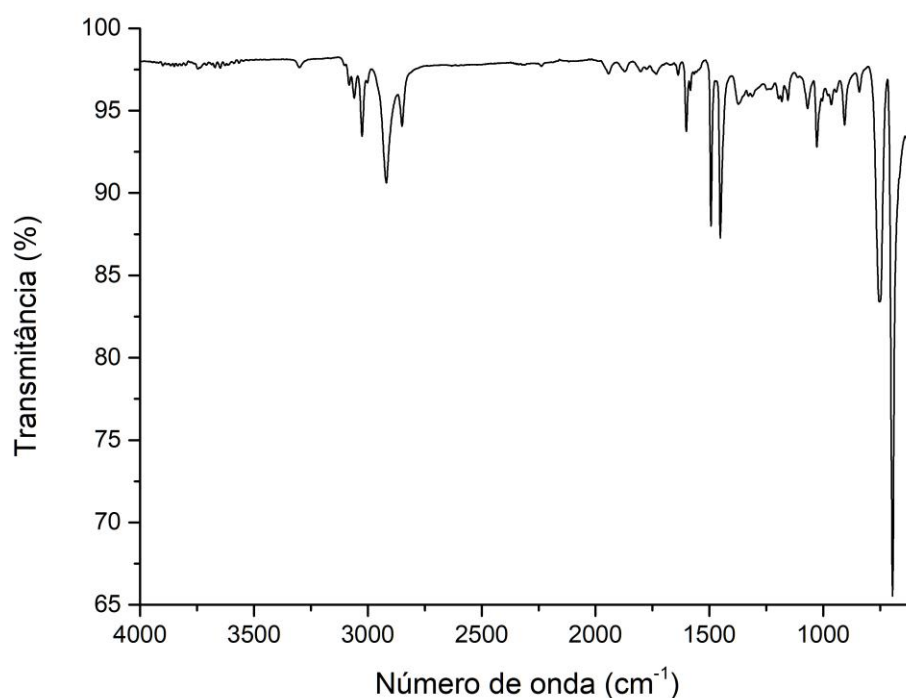
C), 840 cm^{-1} (*rocking* CH e CH_3) e 808 cm^{-1} (estiramento C-C) são características de poliolefinas porém mais indicativas de polipropileno (FANG et al., 2012; KUPTSOV; ZHIZHIN, 1998).

Figura 18: Espectro de FTIR da fração de sólidos não dissolvidos em clorofórmio do “Fundo de tanque”.



Na Figura 19 está mostrado o espectro de FTIR da fração solúvel em clorofórmio do “Fundo de tanque”, após a evaporação. Foi possível evidenciar as absorções em 695 cm^{-1} , 754 cm^{-1} , 1601 cm^{-1} e 3025 cm^{-1} relacionadas ao PS (KUPTSOV; ZHIZHIN, 1998; LEÓN-BERMÚDEZ; SALAZAR, 2008).

Figura 19: Espectro de FTIR da fração de sólidos dissolvidos em clorofórmio do “Fundo de tanque”.



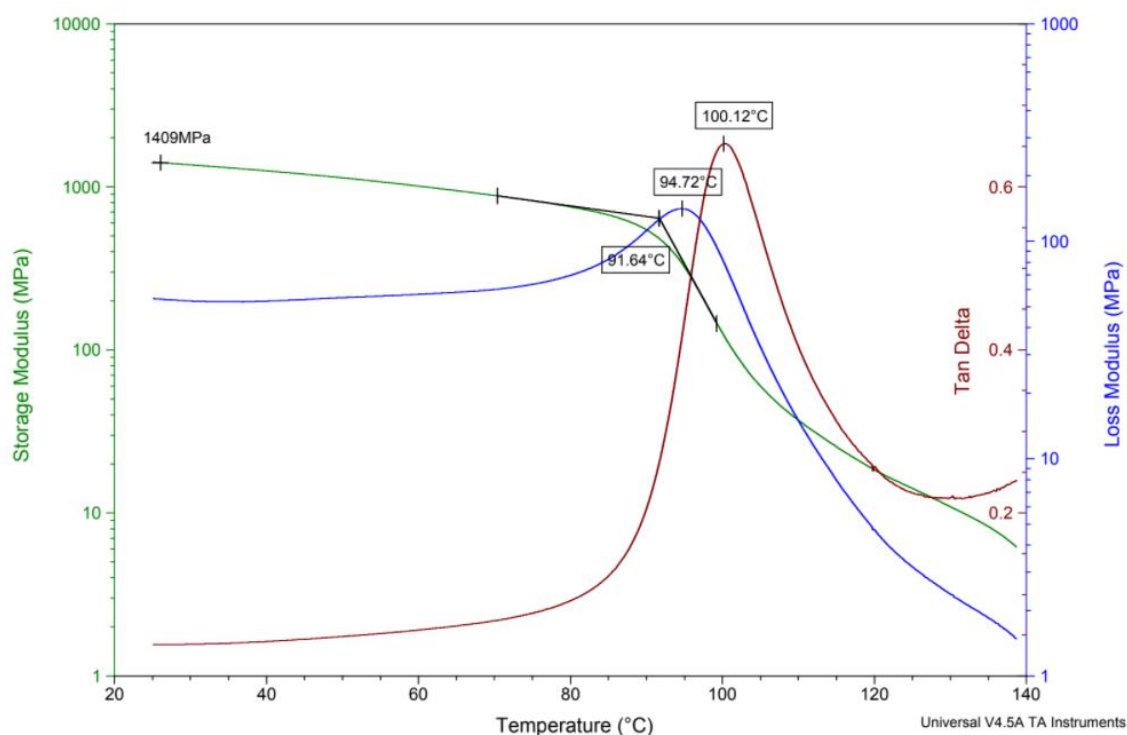
Devido à alta solubilidade em clorofórmio do poliestireno (GARCÍA *et al.*, 2009), foi possível executar uma eficiente separação entre as frações de poliolefinas e de poliestireno no “Fundo de tanque”. Quantitativamente, foi concluído que a amostra “Fundo de tanque” é constituída por cerca de 53% de poliestireno (fração solúvel) e cerca de 47% (fração insolúvel), como mistura de HDPE e PP, com predominância do último.

5.1.4 Análise dinâmico-mecânica (DMA)

Na Figura 20 são apresentadas as curvas de módulo de armazenamento (E') e de perda (E'') além da tangente delta ($\tan \delta$), entre 25-140 °C. Foi possível identificar que houve uma contínua queda na curva de E' sendo que em torno de 91,64 °C, ocorreu um decaimento brusco até a temperatura limite de análise. O valor máximo de E' foi 1.409 MPa (1,40 GPa), registrado a 25 °C. A curva de E'' começou a apresentar descontinuidade a partir de 80°C; sequencialmente, ocorreu a formação de um pico cujo máximo foi registrado em torno de 94,72 °C.

A curva de $\tan \delta$ apresentou comportamento semelhante àquela de E'' , sendo que o pico mostrou o máximo a 100,12 °C. Os valores de máximo de pico observados em E'' e $\tan \delta$ são representativos da temperatura de transição vítrea (T_g) do poliestireno, guardadas as especificidades de cada uma das propriedades. O resultado apresentou similaridade ao reportado por Worzakowska (2015).

Figura 20: Curvas do módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E'') e $\tan \delta$ do “Fundo de tanque”.



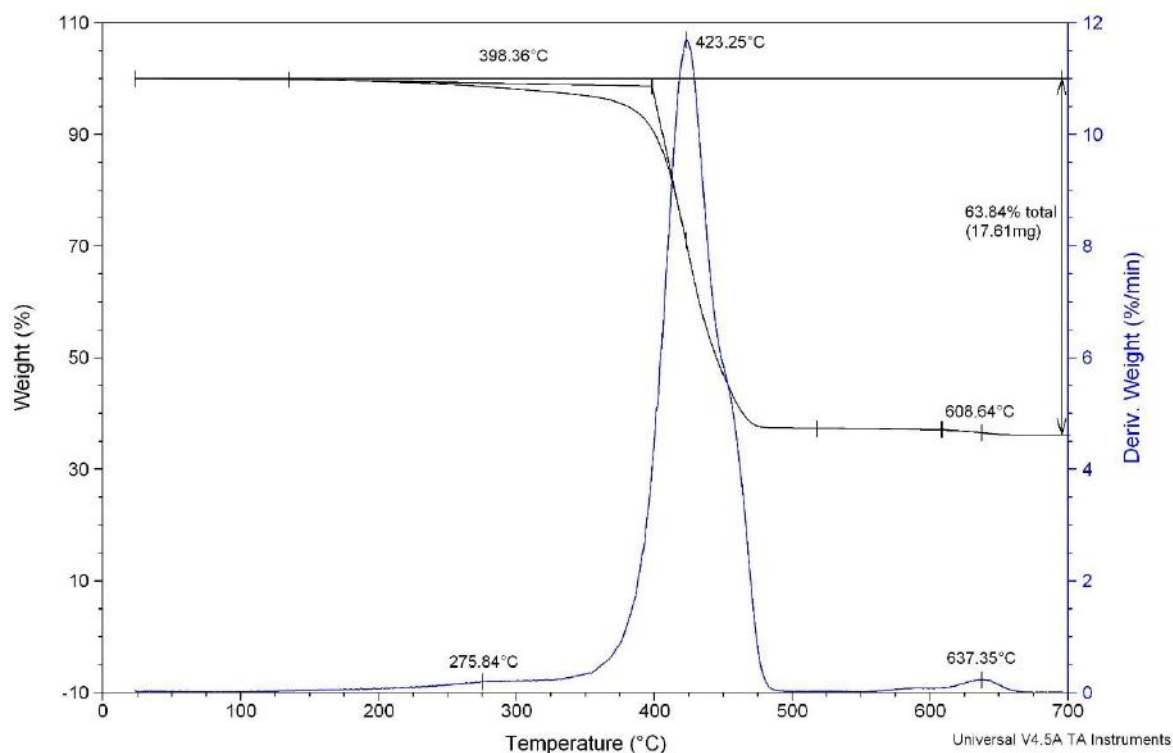
O resultado está em consonância com aqueles observados nas análises de DSC e FTIR.

5.1.5 Termogravimetria (TGA)

A curva de TGA do “Fundo de tanque” (Figura 21) apresentou três etapas de degradação. A primeira ocorreu no intervalo de 250-300 °C com T_{max} acontecendo em torno de 275 °C. Como já foi visto, a amostra “Fundo de tanque” é composta por mistura de HDPE/PP/PS. Esses materiais não retêm água. Assim, está descartada a liberação de água adsorvida. Considerando que muitos dos fragmentos contidos na amostra “Fundo de Tanque” eram coloridos, foi

conjecturada a presença de algum óxido inorgânico. Essas substâncias normalmente apresentam grupamentos hidroxila na superfície que, dependendo do posicionamento e por ação de temperatura, podem realizar reação de desidroxilação. Através de análise termogravimétrica em compósito incorporado com ZnO, Mallakpour *et al.* (2018) mencionaram o aparecimento de etapa de degradação de Zn-OH, entre 287-387 °C, atribuída à reação de desidroxilação. Entre 300-500°C, com T_{onset} em torno de 398 °C e T_{max} em 423°C, foi verificada uma intensa perda de massa, que foi atribuída à degradação térmica dos polímeros HDPE, PP e PS. Entre 600-700 °C, com T_{max} em 637 °C, foi detectada uma sutil perda de massa, associada a uma possível transformação cristalina de algum óxido inorgânico utilizado como colorante dos polímeros HDPE, PP e PS. O teor de resíduo foi em torno de 36,16%. O valor elevado foi imputado ao gás de arraste (nitrogênio, inerte) que não permite a queima completa da fração orgânica da amostra, gerando um resíduo carbonáceo. Um estudo termogravimétrico de HDPE pós-consumo revelou que a temperatura inicial de decomposição ocorreu em torno de 390 °C, conforme reportado por Kumar *et al.* (2011). Para definição do teor verdadeiro de resíduo incombustível, foi feita a calcinação da amostra, conforme consta na próxima análise desta pesquisa.

Figura 21: Curvas termogravimétrica e derivada do “Fundo de tanque”.



5.1.6 Calcinação

A determinação do teor de cinzas presente no “Fundo de tanque”, foi realizado por calcinação em mufla de 1,0599 g do material, a 700 °C, por 3 horas. Restou no cadinho um resíduo inorgânico, representando cerca de 3,79% da amostra inicial, possivelmente associado a colorantes inorgânicos adicionados aos polímeros, ou ainda a contaminações provenientes da coleta seletiva. Confrontando-se essa análise com a de termogravimetria, foi possível calcular o teor de massa de polímero na amostra “Fundo de tanque” – 96,21% – constituído de HDPE, PP e PS.

6 CONCLUSÕES

O conjunto de análises permitiu inferir que a amostra “Fundo de tanque” é constituída por cerca de 50% de mistura de HDPE/PP e 50% de PS.

Como aspecto positivo do trabalho ocorrido na cooperativa, essa composição permite evidenciar que houve uma separação manual aceitável, uma vez que não foram encontrados indícios da presença de outros polímeros como PET e PVC, comumente presentes em resíduos domiciliares e comerciais. A ausência destas resinas diminui a complexidade da mistura, facilitando seu processamento.

Considerando que os polímeros de interesse na separação ocorrida na cooperativa eram PS e PE, o fato de ainda existir grandes quantidades de PS e poliolefinas no “Fundo de tanque” evidencia que a separação por gravidade úmida empregada não foi tão eficiente. Isso pode ter ocorrido em decorrência da irregularidade da densidade do meio aquoso ou de contaminantes e aditivos no resíduo plástico. A hipótese de que a presença de colorantes na composição polimérica possa ter dificultado a separação é aceitável, pois eles podem ter provocado variações de densidade dos polímeros-base em alguns artefatos pós-consumidos.

Pelas análises realizadas neste trabalho, se observou que não se trata de uma mistura extremamente complexa, e o “Fundo de tanque” poderia ser utilizado para a obtenção de mais resinas recicladas de PP, PE e PS se outros métodos de separação forem ser empregados em conjunto conforme a viabilidade técnica e econômica, como por exemplo a separação eletrostática.

Com a composição encontrada para o “Fundo de tanque” e suas propriedades térmicas, vemos que o material pode ser processado de forma análoga às poliolefinas sem que ocorra degradações, o que pode constituir uma vantagem para a indústria recicladora.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar as propriedades mecânicas do “Fundo de tanque”;
- Propor a utilização do “Fundo de tanque” como matéria-prima de acordo com suas propriedades para utilização em objetos novos ou já conhecidos;
- Desenvolver compósitos de “Fundo de tanque” reforçado com cargas inorgânicas também recicladas, como por exemplo entulho, para utilização na construção civil.

8 REFERÊNCIAS

ABIPLAST. **Perfil 2019**. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2020/09/Perfil_2019_web_abiplast.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2021.

ABIPLAST. **Preview 2020: A Indústria de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil**. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2021/05/PREVIEW_ABIPLAST_2020.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2021.

ACHILIAS, D. S. et al. Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). **Journal of Hazardous Materials**, v. 149, n. 3, p. 536–542, 2007.

ANCAT. **Anuário da reciclagem 2017-2018**. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <<https://ancat.org.br/wp-content/uploads/2019/09/Anuário-da-Reciclagem.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H. Mechanical Properties of Polymers. In: **Engineering Materials 2**. 4. ed. Oxford: Elsevier, 2013. p. 419–440.

BAIRD, D. G.; COLLIAS, D. I. **Polymer processing: principles and design**. 2. ed. Cincinnati: Wiley, 2014.

BHARGAVA, R.; WANG, S. Q.; KOENIG, J. L. FTIR microspectroscopy of polymeric systems. **Advances in Polymer Science**, v. 163, p. 137–191, 2003.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 30 jun. 2021

BRASIL. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2019**. Brasília, 2020. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2019/Diagnostico_RS2019.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2021.

CAMPO, E. A. Thermal Properties of Polymeric Materials. In: **Selection of polymeric materials**. 1. ed. New York: William Andrew Inc., 2008. p. 103–140.

CANEVAROLO, S. V. **Polymer Science: A Textbook for Engineers and Technologists**. 1. ed. Munique: Hanser, 2020.

CASSU, S. N.; FELISBERTI, M. I. Comportamento dinâmico-mecânico e relaxações em polímeros e blendas poliméricas. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 255–263, 2005.

CAVALIERI, F.; PADELLA, F. Development of composite materials by mechanochemical treatment of post-consumer plastic waste. **Waste Management**, v. 22, n. 8, p. 913–916, 2002.

CHEN, H.; XU, H.; CEBE, P. Thermal and structural properties of blends of isotactic with atactic polystyrene. **Polymer**, v. 48, n. 21, p. 6404–6414, out. 2007.

CHEN, M. Thermal Analysis. In: **Materials Science and Engineering of Carbon**. Pequim: Elsevier, 2016. v. 48p. 249–272.

COELHO, T. M.; CASTRO, R.; GOBBO, J. A. PET containers in Brazil: Opportunities and challenges of a logistics model for post-consumer waste recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 3, p. 291–299, 2011.

DAMME, N. VAN et al. Upgrading of recycled ABS from end of life vehicles and waste of electrical and electronic equipment. **7th International Polymers and Moulds Innovations Conference**, 2016.

DE PAULA AMANTES, B. et al. Ecofriendly Composite/Nanocomposite from Discarded Addition and Condensation Polymers. In: **Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 1–23.

FANG, J. et al. Needleless Melt-Electrospinning of Polypropylene Nanofibres. **Journal of Nanomaterials**, v. 2012, p. 1–9, 2012.

FERRARA, G.; MELOY, T. P. Low dense media process: A new process for low-

density solid separation. **Powder Technology**, v. 103, n. 2, p. 151–155, 1999.

GARCÍA, M. T. et al. Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process. **Waste Management**, v. 29, n. 6, p. 1814–1818, jun. 2009.

GARTON, A. **Infrared Spectroscopy of Polymer Blends, Composites and Surfaces**. Cincinnati: Hanser Pub Inc, 1992.

GUERRERO-PÉREZ, M. O.; PATIENCE, G. S. Experimental methods in chemical engineering: Fourier transform infrared spectroscopy—FTIR. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 98, n. 1, p. 25–33, 2020.

GUNJAN; BHARTI, R.; SHARMA, R. Analysis of plastic waste management: Utilization, issues & solution. **Journal of Green Engineering**, v. 10, n. 10, p. 8524–8541, 2020.

GUO, Q. **Polymer Morphology: Principles, Characterization, and Processing**. 1. ed. Nova Jersey: Wiley, 2016.

HAGE JR., E. Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 8, n. 2, p. 6–9, 1998.

HALARY, J. L.; LAUPRÊTE, F.; MONNERIE, L. **Polymer materials: macroscopic properties and molecular interpretations**. 1. ed. Nova Jersey: Wiley, 2011.

HUBO, S. et al. Evaluation of post-industrial and post-consumer polyolefin-based polymer waste streams for injection moulding. **Omolde**, v. 26, n. 104, p. 24–34, 2015.

KUMAR, S.; SINGH, R. K. Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 28, n. 4, p. 659–667, 2011.

KUPTSOV, A. H.; ZHIZHIN, G. N. **Handbook of Fourier Transform Raman and Infrared Spectra of Polymers**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 1998. v. 1

LA MANTIA, F. P. Recycling of heterogeneous plastics wastes: I-Blends with low-density polyethylene. **Polymer Degradation and Stability**, v. 37, n. 2, p. 145–148, 1992.

LA MANTIA, F. P. Recycling of heterogeneous plastics wastes. II-The role of modifier agents. **Polymer Degradation and Stability**, v. 42, n. 2, p. 213–218, 1993.

LEÓN-BERMÚDEZ, A. Y.; SALAZAR, R. Synthesis and characterization of the polystyrene - Asphaltene graft copolymer by FT-IR spectroscopy. **CTyF - Ciencia, Tecnología y Futuro**, v. 3, n. 4, p. 157–167, 2008.

LORANDI, N. P.; ODILA, M. H. C.; ORNAGHI JR., H. Análise Dinâmico-Mecânica de Materiais Compósitos Poliméricos. **Scientia Cum Industria (Sci. Cum Ind.)**, v. 4, n. 13, p. 48–60, 2016.

LORE, V. et al. Design from recycling. **Alive. Active. Adaptive: International Conference on Experiential Knowledge and Emerging Materials, EKSIG 2017**, p. 129–143, 2017.

LUIJSTERBURG, B.; GOOSSENS, H. Assessment of plastic packaging waste: Material origin, methods, properties. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 85, p. 88–97, 2014.

MALLAKPOUR, S.; ABDOLMALEKI, A.; ELMIRA MOOSAVI, S. Production and characterization of novel nanocomposites based on poly(amide-imide) containing N -trimellitylimido- I -alanine diacid and 4,4'-diaminodiphenylmethan segments reinforced with grafted nano-ZnO by citric acid as a biological ligand. **Polymer Composites**, v. 39, n. 7, p. 2394–2402, jul. 2018.

MANO, E. B. et al. Plastic Wood From Urban Waste Recycled Plastics as a Substitute for Lumber. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, p. 19–24, 1994.

MANO, E. B.; MARTINS, A. F.; MENDES, L. C. Thermal analysis applied to discarded car bumpers. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 59, n. 1, p. 425–432, 2000.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blüncher, 2004. v. 1

MARIS, E. et al. From Recycling to Eco-design. **Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists**, p. 421–427, 2014.

MARTINEZ LOPEZ, Y. et al. Production of wood-plastic composites using cedrela odorata sawdust waste and recycled thermoplastics mixture from post-consumer products - A sustainable approach for cleaner production in Cuba. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, 2020.

MATERIAL ECONOMICS. **The circular economy: a powerful force for climate mitigation**. Estocolmo: [s.n.]. Disponível em: <<https://materialeconomics.com/publications/the-circular-economy-a-powerful-force-for-climate-mitigation-1>>. Acesso em: 28 jul. 2021.

MATOS, T. F. L. Composição dos Resíduos Poliméricos, Pós-consumo, Gerados no Município de São Carlos, SP. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 17, p. 346–351, 2007.

MUMBACH, G. D. et al. Dissolution of adhesive resins present in plastic waste to recover polyolefin by sink-float separation processes. **Journal of Environmental Management**, v. 243, n. April, p. 453–462, 2019.

NG, H. M. et al. Thermogravimetric Analysis of Polymers. **Encyclopedia of Polymer Science and Technology**, n. 13, p. 1–29, 2018.

PEACOCK, A. J.; CALHOUN, A. **Polymer chemistry: properties and applications**. 1. ed. Munique: Hanser, 2006. v. 1

PRICE, D. Thermomechanical, Dynamic Mechanical and Dielectric Methods. **Principles of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 1, n. Fevereiro, p. 164–213, 2016.

QUINTAES, B. R. et al. **Composição Física Dos Resíduos Sólidos Domiciliares Da Cidade Do Rio De Janeiro Em 2017**. 1º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. **Anais...** Gramado: 2018

RAGAERT, K. et al. Upcycling of contaminated post-industrial polypropylene waste: A design from recycling case study. **Polymer Engineering and Science**, v. 58, n. 4, p. 528–534, 2018.

RAGAERT, K. et al. Design from recycling: A complex mixed plastic waste case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, p. 104646, 2020.

RAGAERT, K.; DELVA, L.; VAN GEEM, K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. **Waste Management**, v. 69, p. 24–58, 2017.

SCHICK, C. Differential scanning calorimetry (DSC) of semicrystalline polymers. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, v. 395, n. 6, p. 1589–1611, 2009.

SERRANTI, S.; BONIFAZI, G. Techniques for separation of plastic wastes. In: **Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete**. Roma: Elsevier Ltd, 2019. p. 9–37.

SILVEIRA, A. V. M. et al. Application of tribo-electrostatic separation in the recycling of plastic wastes. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 114, p. 219–228, 2018.

SINDIPLAST. **Guia ambiental da indústria de transformação e reciclagem de materiais plásticos**. São Paulo, 2011. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/tecnologia-ambiental/producao-e-consumo-sustentaveis/?o-e-Consumo-Sustent%3Fvel%2F11-Documentos>>. Acesso em 5 jun. 2021.

SINGH, N. et al. Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 115, p. 409–422, 2017.

STUART, B. H. **Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2005. v. 8

TOMODA, B. T. et al. Characterization of biopolymer membranes and films: Physicochemical, mechanical, barrier, and biological properties. **Biopolymer Membranes and Films**, p. 67–95, 2020.

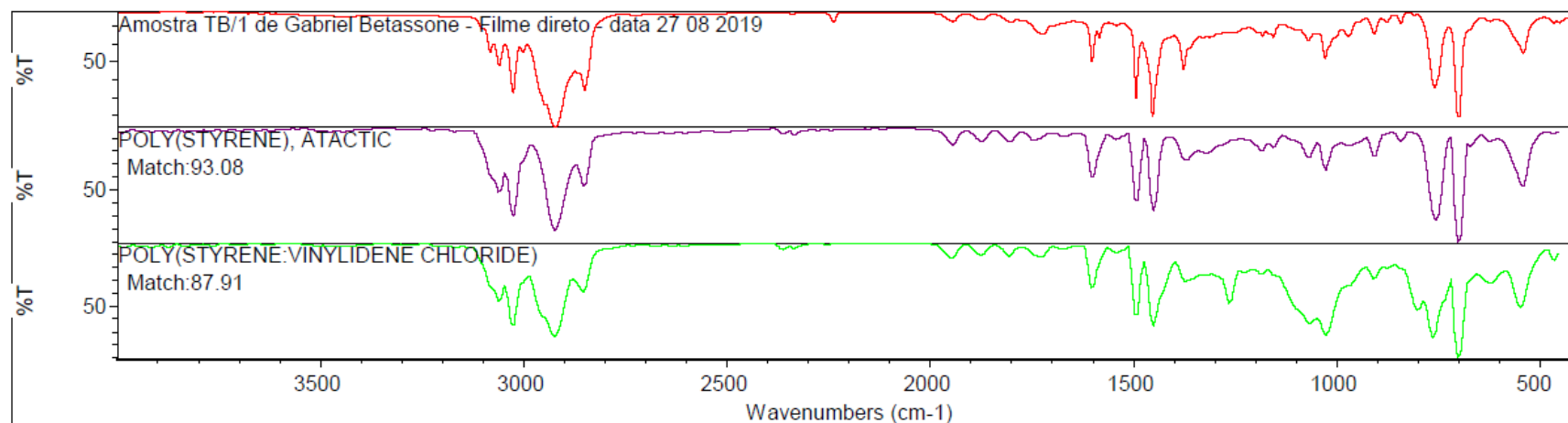
VYAZOVKIN, S. Thermal analysis. **Analytical Chemistry**, v. 82, n. 12, p. 4936–

4949, 2010.

WORZAKOWSKA, M. Thermal and mechanical properties of polystyrene modified with esters derivatives of 3-phenylprop-2-en-1-ol. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 121, n. 1, p. 235–243, 2015.

APÊNDICE A – Análise de correlação do espectro de FTIR do “Fundo de tanque”

Search results for: Amostra TB/1 de Gabriel Betassone - Filme direto - data 27 08 2019
 Date: Fri Jun 25 13:37:02 2021 (GMT-03:00)
 Search algorithm: Correlation
 Regions searched: 3995.85-455.13



Search results list of matches

Index	Match	Compound Name	Library Name	
1	46	93.08	POLY(STYRENE), ATACTIC	Hummel Polymer Sample Library
2	47	87.91	POLY(STYRENE:VINYLIDENE CHLORIDE)	Hummel Polymer Sample Library
3	9	65.40	POLY(STYRENE:4-VINYLPYRIDINE)	Hummel Polymer Sample Library
4	42	53.28	POLY(STYRENE:ACRYLONITRILE:MMA)	Hummel Polymer Sample Library
5	50	51.01	POLY(VINYLTOLUENE: BUTADIENE)	Hummel Polymer Sample Library
6	37	50.90	AROMATIC HYDROCARBON RESIN	Hummel Polymer Sample Library
7	32	46.40	POLY(ETHYLENE:PROPYLENE:DIENE)	Hummel Polymer Sample Library
8	25	41.81	POLY(BUTADIENE) + NAPHTHENIC OIL	Hummel Polymer Sample Library
9	39	41.51	POLY(ETHYLENE:PROPYLENE)	Hummel Polymer Sample Library
10	41	37.87	POLY(PROPYLENE), ATACTIC	Hummel Polymer Sample Library