

UNIVERSIDADE FUMEC
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA-FEA

Leonardo Portes Siqueira

**PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO POLIETILENO TEREFALATO (PET)
RECICLADO PÓS CONSUMO PARA REUTILIZAÇÃO COMO MATERIAL NA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Orientadora: Dra. Janaina Kizzi de Morais Silva

Belo Horizonte
Outubro de 2023

Leonardo Portes Siqueira

**PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO POLIETILENO TEREFALATO (PET)
RECICLADO PÓS CONSUMO PARA REUTILIZAÇÃO COMO MATERIAL NA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade FUMEC, como requisito para a obtenção do título de Mestre e conclusão do de Curso de Mestrado em Processos Construtivos.

Orientadora: Dra. Janaina Kizzi de Moraes Silva

Belo Horizonte
Outubro de 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S618p Siqueira, Leonardo Portes, 1972-
Processamento e caracterização do polietileno tereftalato (PET) reciclado pós consumo para reutilização como material na construção civil / Leonardo Portes Siqueira. - Belo Horizonte, 2023.

62 f. : il.

Orientadora: Janaina Kizzi de Moraes Silva

Dissertação (Mestrado em Processos Construtivos),
Universidade FUMEC, Faculdade de Engenharia e Arquitetura,
2023.

1. Polímeros. 2. Polietileno. 3. Plásticos. 4. Construção civil. I. Título. II. Silva, Janaina Kizzi de Moraes. III. Universidade FUMEC, Faculdade de Engenharia e Arquitetura.

CDU: 678.7

Dissertação intitulada **"PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO POLIETILENO TEREFTALATO (PET) RECLICLADO CIVIL PÓS CONSUMO PARA REUTILIZAÇÃO COMO MATERIAL NA CONSTRUÇÃO CIVIL"** de autoria de Leonardo Portes Siqueira, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:


Prof. Dr.ª Janaina Kizzi de Moraes Silva – Universidade FUMEC
(Orientador)


Prof. Me. Oswaldo Teixeira Baião Filho – Universidade FUMEC
(Examinador Interno)


Prof. Dr.ª Juliana da Silva e Mascarenhas Guedes - ANFLANGUERA.
(Examinador Externo)


Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Processos Construtivos da Universidade
FUMEC

Belo Horizonte, 18 de outubro de 2023.

AGRADECIMENTOS

Começo os agradecimentos a FEA-FUMEC, faculdade onde me graduei em engenharia civil em 2000. Foi uma experiência única graduar em engenharia, numa instituição com ótima infraestrutura e excelentes professores. A troca de experiências, as amizades e o conhecimento marcaram uma fase sensacional na minha vida. É um enorme prazer retornar a esta instituição e concluir o mestrado em processos construtivos.

Tenho que agradecer a Dra. Janaina Kizzi de Moraes Silva, minha orientadora que me mostrou os caminhos para a elaboração de uma dissertação e me incentivou durante tarefa difícil de redigir um trabalho de pesquisa de alto nível. Agradeço os participantes da banca examinadora, Dra. Juliana da Silva e Mascarenhas Guedes e Me. Oswaldo Teixeira Baião Filho, que são grandes profissionais e também grandes amigos, sempre me incentivando no tema que escolhi para a pesquisa. Ao Prof. Dr Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco que me apoiou bastante, professor da disciplina de novos materiais, onde teve início a minha linha de pesquisa.

Aos professores do mestrado, agradeço pelos ensinamentos e momentos que passamos, mesmo que a distância, devido as medidas de afastamento pela pandemia, me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional.

Não posso deixar de agradecer também aos meus colegas de curso, pesquisadores, e profissionais que contribuíram para as descobertas, aprendizado e por todo o companheirismo ao longo deste percurso.

Meu agradecimento final é dedicado aos meus filhos, meus pais e irmãos pelo suporte familiar, autonomia, respeito e busca dos objetivos profissionais.

RESUMO

O PET é um dos materiais plásticos mais utilizados no setor industrial, e possui diversas vantagens como baixo custo, transparência, resistência química e física. Com grande destaque na fabricação de tecidos e embalagens plásticas, que o levam a ser consumido em grandes quantidades pela sociedade. São inúmeras as possibilidades de utilização na área de construção, sem objetivo de substituir aço e concreto, e sem o objetivo de utilizar em cálculo estrutural, podendo ser usado em blocos, vedações, revestimentos, espaçadores, calços, instalações provisórias em canteiros de obras e materiais de acabamento. O descarte deste material tornou-se algo difícil de se controlar diante do uso acentuado do material. Emprega-se o PET especialmente em produtos com curta vida útil, em outros termos, os produtos feitos com PET, como embalagens, são utilizados somente enquanto existe algo dentro deles e depois são descartados. Em consequência disso, o lixo formado pelo PET vem aumentando consideravelmente através dos anos. Este estudo aborda a questão de sustentabilidade de duas formas. De um lado contribuindo com a diminuição do passivo ambiental existente com as embalagens de PET pós consumo, de outro apresentando um material alternativo de baixo custo, que não tem impacto na sua extração como madeiras, aço e cimento e com diversas aplicações na construção civil. O objetivo deste trabalho é caracterizar o polímero PET pós consumo quanto as propriedades físicas, químicas e mecânicas de forma a ter parâmetros para utilização e inserção na cadeia produtiva. É possível processar o PET pós consumo obtendo-se um material rígido, de baixo custo com características mecânicas úteis para a construção civil. A partir da coleta de garrafas, o PET é lavado, classificado, moído e limpo, obtendo os flocos, também conhecidos como *Flakes* de PET. Para o uso adequado de polímeros reciclados, é muito importante conhecer as propriedades desses materiais, tais como temperatura de fusão, grau de cristalinidade, pureza, transição vítrea e a história térmica. Através do conhecimento de tais propriedades é possível utilizar/reutilizar os polímeros. Neste trabalho foram realizados ensaios em laboratório com uma estrutura completa para processamento e caracterização de novas formulações poliméricas. Com objetivo de obter características físicas, físico-químicas e mecânicas através do processamento dos flocos, foram moldados por injeção de corpos de prova. Foram realizados ensaios de espectroscopia no infravermelho, calorimetria exploratória diferencial, termogravimetria e viscosidade, bem como ensaios mecânicos para avaliação da resistência a tração e impacto realizados em laboratório e o desenvolvimento dos resultados de forma a apresentar os parâmetros de processamento, condições de ensaio e resultados de cada amostra obtida, possibilitando uma análise comparativa e qualitativa dos materiais estudados. Os testes revelaram os valores de resistência a tração, módulo de elasticidade, tensão de escoamento, energia de impacto, transição vítrea, fusão, bandas de absorção, massa molar e agrupamentos químicos do monômero. Os resultados foram comparados aos padrões do PET original e outros materiais poliméricos diversos já utilizados, e assim identificar as condições deste material após reciclagem e processamentos. O conjunto de métodos adotados no desenvolvimento deste trabalho é pautado por normas técnicas brasileiras e internacionais sobre processamento de polímeros. Os resultados obtidos indicaram que a estrutura química do PET foi mantida após estes ciclos e a resistência mecânica com valores próximos a polímeros utilizados na indústria, viabilizando a utilização deste material. As caracterizações químicas (FTIR), físico-químicas (TG/DTG-DSC), revelaram a composição dos materiais comerciais e reciclados indicando principalmente que os materiais trabalhados eram polietileno tereftalato, não havendo

misturas de outros polímeros, aditivos ou contaminantes, por se tratar de materiais reciclados. Os ensaios de calorimetria exploratória (DSC), espectroscopia Molecular por infravermelho (FTIR), termogravimetria (TG), ensaios de viscosidade indicaram que a estrutura do PET padrão foi mantida após estes ciclos. Os resultados dos ensaios mecânicos das amostras mostraram o potencial do uso da matéria prima reciclada, com valores de módulo de elasticidade e resistência ao impacto IZOD próximos aos materiais plásticos utilizados no mercado.

Palavras-chave: Polímeros. Processo de Reciclagem de polímeros. PET. Resíduos.

ABSTRACT

PET is one of the most widely used plastic materials in the industrial sector and has several advantages such as low cost, transparency, chemical and physical resistance. It is widely used in the manufacture of textiles and plastic packaging, which leads to it being consumed in large quantities by society. There are countless possibilities for using it in construction, without the aim of replacing steel and concrete, and without the aim of using it in structural calculations. It can be used in blocks, fences, cladding, spacers, shims, temporary installations on construction sites and finishing materials. Disposal of this material has become difficult to control and manage due to its widespread use. PET is used especially in products with a short lifespan. In other words, products made from PET, such as packaging, are only used for as long as there is something in them and are then discarded. As a result, PET waste has increased considerably over the years. This study addresses the issue of sustainability in two ways. On the one hand, it contributes to reducing existing environmental liabilities from post-consumer PET packaging, and on the other, it presents a low-cost alternative material that has no impact on its extraction like wood, steel and cement, and which has various applications in the construction industry. The aim of this work is to characterize post-consumer PET polymer in terms of its physical, chemical and mechanical properties in order to have parameters for its use and insertion into the production chain. It is possible to process post-consumer PET to obtain a rigid, low-cost material with useful mechanical characteristics for the construction industry. From the collection of bottles, PET is washed, sorted, ground and cleaned to obtain flakes, also known as Pet Flakes. In order to use recycled polymers properly, it is very important to know the properties of these materials, such as melting temperature, degree of crystallinity, purity, glass transition and thermal history. By knowing these properties, it is possible to use/reuse the polymers. In this work, tests were carried out at a laboratory, which has a complete structure for processing and characterizing new polymer formulations. In order to obtain physical, physicochemical and mechanical characteristics by processing the flakes, test specimens were injection molded. Infrared spectroscopy, differential scanning calorimetry, thermogravimetry and viscosity tests were carried out, as well as mechanical tests to assess tensile strength and impact carried out in the laboratory, and the results were developed in such a way as to present the processing parameters, test conditions and results for each sample obtained, making it possible to test conditions and the results

of each sample obtained, enabling a comparative and qualitative analysis of the materials studied. The test revealed the values of tensile strength, modulus of elasticity, yield strength, impact energy, glass transition, melting, absorption bands, molar mass and chemical groupings of the monomer. The results were compared to the standards of the original PET and other polymeric materials already in use, in order to identify the condition of this material after recycling and processing. The set of methods adopted in the development of this work is guided by Brazilian and international technical standards on polymer processing. The results obtained indicated that the chemical structure of PET was maintained after these cycles and the mechanical strength was close to that of polymers used in industry, making it viable to use this material. The chemical (FTIR) and physical-chemical (TG/DTG-DSC) characterizations revealed the composition of the commercial and recycled materials, mainly indicating that the materials used were polyethylene terephthalate, with no mixtures of other polymers, additives or contaminants, as they were recycled materials. The exploratory calorimetry (DSC), molecular infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetry (TG) and viscosity tests indicated that the structure of standard PET was maintained after these cycles. The results of the mechanical tests on the samples showed the potential for using recycled raw materials, with elastic modulus and IZOD impact resistance values close to those of plastic materials used on the market.

Keywords: Polymers. Polymer recycling process. PET. Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Volume de PET reciclado	19
Figura 2 - Índice de reciclagem de polímeros no brasil.....	19
Figura 3 - Produção de resina reciclada por tipo de material polimérico.....	20
Figura 4 - Reciclagem de polímeros.....	25
Figura 5 - Etapas de reciclagem do PET.....	26
Figura 6 - Aplicações para PET reciclado	27
Figura 7 - Processo de degradação do PET no ambiente alcalino do concreto.....	27
Figura 8 - Degradação termomecânica do PET.....	29
Figura 9 - Amostra enviada para o laboratório.....	31
Figura 10 - Condições de Injeção.....	32
Figura 11 - Imagens do processo de injeção da amostra AFK234244.....	32
Figura 12 - Especificações de dimensões ASTM D638.....	33
Figura 13 - Especificações dimensões e espessura ASTM D638.....	33
Figura 14 Corpos de prova após a injeção.....	34
Figura 15 - A técnica FTIR.....	34
Figura 16 - Espectrofotômetro Bruker, Alpha II.....	36
Figura 17 - Condições do ensaio de FTIR.....	36
Figura 18 - Espectro resultante da análise de FTIR da amostra AFK234244.....	37
Figura 19 - Grupamentos químicos presentes na amostra AFK234244.....	37
Figura 20 - Espectro padrão de PET.....	38
Figura 21 - Equipamento DSC Perkin Elmer, modelo DSC-6000.....	40

Figura 22 - Condições do ensaio de DSC.....	40
Figura 23 - Curva DSC da amostra AFK234244 – 1º Aquecimento.....	41
Figura 24 - Curva DSC da amostra AFK234244 – 2º Aquecimento.....	41
Figura 25 - Resultados do ensaio de DSC.....	41
Figura 26- Equipamento Shimadzu, módulo termogravimétrico TGA-50.....	43
Figura 27 - Condições do ensaio TG.....	43
Figura 28 - Curvas TG (—) e DTG (—) referentes à amostra AFK234244.....	44
Figura 29 – Resultados do ensaio de TG.....	44
Figura 30 - Curva padrão TG para o PET não reciclado.....	45
Figura 31 - Balança Analítica Mettler Toledo, modelo ME204/A e equipamento de banho viscosimétrico quimis.....	46
Figura 32 - Condições do ensaio de viscosidade.....	46
Figura 33 – Resultados do ensaio de Viscosidade.....	47
Figura 34- Equipamento de ensaio a tração Instron EMIC, modelo 23-30.....	48
Figura 35 - Condições do ensaio de Tração.....	48
Figura 36 - Curvas Tensão x Deformação da amostra AFK234244.....	49
Figura 37 - Resultados do ensaio de Tração.....	49
Figura 38 - Corpos de prova da amostra AFK234244 após o ensaio de tração.....	50
Figura 39 - Módulo elástico de polímeros.....	51
Figura 40 - Equipamento NZ Philpolymer, modelo XJC – 25D.....	52
Figura 41 - Condições do ensaio de Impacto Izod.....	53
Figura 42 - Corpo de prova da amostra AFK234244 no equipamento de impacto.....	53
Figura 43 – Resultados do ensaio de Impacto Izod.....	54
Figura 44 - Corpos de prova da amostra AFK234244 após o ensaio de impacto.....	54
Figura 45 - Resultados de Resistência ao impacto de polímeros PET.....	55

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFK234244 - Código de realização dos ensaios na empresa Afinko
ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASTM - American Society for Testing and Materials
ABIPET - Associação Brasileira da Indústria do Pet
ABRECON - Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil
ATR - Reflectância Total Atenuada
CL - Cloro
CO₂ - Dióxido de Carbono
CPVC - Policloreto de Vinila Clorado
DSC - Calorimetria Exploratória Diferencial
DTA - Análise Térmica Diferencial
FTIR - Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
IR - Infra Red
LDPE - Low Density Polyethylene
HDPE - High Density Polyethylene
MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura
PC - Policarbonato
PET - Poli (tereftalato de etileno)
PET-R - Poli (tereftalato de etileno) Reciclado
PROPEQ - Projeto e Pesquisa em Engenharia Química
PVC - Policloreto de vinila
PBT - Poli (tereftalato de butileno)
PP – Polipropileno
PS - Poliestireno
RCC - Resíduo da Construção Civil
TG - Termogravimetria
TGA - Análise Termogravimétrica
UV - Ultravioleta
UV-Vis - Ultravioleta visível
UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS.....	17
3	JUSTIFICATIVA.....	18
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
	4.1 Polímeros.....	21
	4.1.1 Tipos de polímeros.....	21
	4.1.2 Aplicação de polímeros.....	22
	4.2 PET.....	23
	4.2.1 Processamento e reciclagem do PET.....	24
	4.2.2 Aplicações para o PET pós-consumo reciclado.....	26
	4.3 Processos de Degradação do PET.....	27
	4.3.1 Degradação termomecânica.....	28
	4.3.2 Degradação termo-oxidativa.....	29
5	METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
	5.1 Moldagem por injeção	31
	5.2 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)....	34
	5.3 Calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	39
	5.4 Termogravimetria (TG).....	42
	5.5 Ensaio de Viscosidade.....	45
	5.6 Ensaio de Tração	47
	5.7 Ensaio de Impacto Izod.....	51
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
7	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	58
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A palavra polímero tem origem do grego, com a junção do termo poli (muitos) e mero (unidade de repetição). Dessa forma, um polímero é uma macromolécula formada por dezenas de milhares de unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. Os polímeros podem ser divididos em três classes: Plásticos, Elastômeros e Fibras. A classificação depende de uma série de fatores, como o tipo de monômero (molécula com unidade de repetição unitária), número médio de meros por cadeia e o tipo de ligação covalente. Dentro da classe de polímeros plásticos, pode-se subdividi-los em termofixos e termoplásticos. Os polímeros termofixos não são recicláveis, porque são solidificados com aplicação do calor e não amolecem mais, ao contrário dos termoplásticos que utilizam o calor para a sua possível modelagem. Termoplásticos são polímeros com aptidão de amolecer e fluir quando sujeitos ao aumento de temperatura e pressão. Quando não mais sob influência desses fatores, o material se solidificará de acordo com a forma dada. Se houver reaplicação de temperatura e pressão, o material novamente irá amolecer e fluir, visto que o processo de cura deste tipo de polímero é completamente reversível, pois nenhuma ligação química entre cadeias ocorre. Quando o polímero é semicristalino, o amolecimento se dá com a fusão da fase cristalina. Essa característica permite que materiais termoplásticos possam ser remoldados e reciclados sem afetar negativamente as propriedades físicas do polímero (Callister, 2007).

O PET é um polímero termoplástico e um dos materiais plásticos mais utilizados no setor industrial, e possui diversas características e utilidades que o levam a ser consumido em grandes quantidades pela sociedade. Nesse sentido, seu descarte se tornou algo difícil de controlar e orientar diante do uso acentuado do material. Nos últimos 20 anos, a reciclagem de PET se instaurou no setor industrial, tornando-se uma opção muito eficaz para o fim da vida útil da embalagem plástica. Isso acontece porque este processo beneficia consideravelmente o meio ambiente e a economia, à medida que substitui novos bens por bens reciclados e movimentam empresas, com um crescente aumento na utilização de plásticos nos mais diferentes produtos, como eletrodomésticos, motores, construção civil e muitos outros. Os setores mais comuns e conhecidos de se encontrar o PET são em embalagens e fibras têxteis, chamadas

de poliéster. O material PET possui muitas utilidades, uma vez que possui boa resistência química e mecânica, além de ser leve, facilitando o transporte. Dessa forma, diversos setores da economia utilizam produtos que contenham PET reciclado. No setor de construção civil é usado em caixas d'água, condutores, torneiras e telhas. O produto tem sido testado como elemento termoacústico em paredes de vedação, como sanduíche em paredes estruturais e lajes, além de substituto de areia. Outra utilidade do PET é seu uso como componente para a fabricação de fôrmas para concretagem. O polímero termoplástico também é utilizado como agregado na fabricação de blocos de concreto não-estruturais. (Propeq, 2023).

Estudos realizados por Souza (2018), buscaram avaliar uma solução de engenharia para confecção de telhas termoacústicas à base de PET reciclado.

Segundo Sebrae (2022), em seu artigo Reciclagem de garrafas PET na construção civil conta já ter sido desenvolvido um material obtido a partir do PET triturado com areia, vidro e outros materiais. Desse processo, obtém-se uma massa muito semelhante ao asfalto. Esse novo composto é colocado em moldes que pode ser usado como blocos para pisos de calçadas, meios-fios e outros. Para fabricação de blocos de concreto, consiste na substituição de 15% da areia por este material na mistura dos agregados.

Destacam-se os estudos de inúmeros pesquisadores que apresentam alternativas para o uso de PET como agregado em concreto. José Lourenço Santos (2013) pesquisou o desenvolvimento de compósitos de matriz cimentícia utilizando resíduos de politereftalato de etileno (PET) e de areia de britagem na produção de concreto.

Foti (2011) estudou a possibilidade de se utilizar fibras de garrafas PET para conseguir uma melhoria da ductilidade do concreto. As fibras utilizadas foram obtidas através de corte simples das garrafas, sem qualquer processamento, reduzindo os custos de produção de concreto reforçado com fibras. A adição de uma pequena quantidade de fibras apresentou influência sobre o comportamento pós-fissuração de elementos de concreto simples.

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos. O Capítulo 1 – INTRODUÇÃO – apresenta uma breve contextualização sobre o polímero PET, seu uso, vida útil e descarte, além da justificativa do trabalho.

O Capítulo 2 – OBJETIVOS – apresenta os objetivos gerais e específicos.

O Capítulo 3 – JUSTIFICATIVA – apresenta vantagens em relação a sustentabilidade.

O Capítulo 4 – REFERENCIAL TEÓRICO – conceitua como funciona o processo de reciclagem, aplicações para o PET pós-consumo reciclado, vantagens ambientais e econômicas, processo de síntese do PET e processos de Degradação do PET.

O Capítulo 5 – METODOLOGIA RESULTADOS E DISCUSSÕES – apresenta a metodologia utilizada para realização dos ensaios em laboratório, realização dos ensaios, resultados e discussões.

O Capítulo 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS – apresenta dados quantitativos para comparação dos resultados obtidos.

Por fim, no capítulo 7 – são apresentadas as PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é caracterizar o polímero PET pós consumo quanto as propriedades físicas, químicas e mecânicas de forma a ter parâmetros para utilização e inserção na cadeia produtiva.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo geral processar o PET reciclado e caracterizá-lo obtendo propriedades físico-químicas e mecânicas, para que possa ser utilizado em diversas aplicações na construção civil. Os objetivos específicos para atingir o objetivo geral são conceituar polímeros, processo de síntese e reciclagem de PET, vantagens econômicas e mecanismos de degradação, moldagem por injeção de corpos de prova conforme norma ASTM D638, realização de ensaios de calorimetria exploratória (DSC) norma ASTM D2244, espectroscopia Molecular por infravermelho norma ASTM D3677, termogravimetria (TG) norma ASTM D6370, ensaios de viscosidade norma ASTM 4603, ensaios de tração -norma ASTM D368 e ensaios de impacto -norma ASTM D256.

Os ensaios para caracterizações químicas (FTIR), físico-químicas (TG/DTG-DSC), vão revelar a composição do material reciclado indicando principalmente se o PET-R é realmente polietileno tereftalato, sem misturas de outros polímeros, aditivos ou contaminantes, por se tratar de material reciclado.

Os ensaios mecânicos de tração e de impacto vão caracterizar as propriedades mecânicas de tração (módulo de elasticidade, resistência à tração, resistência à ruptura e deformação), e de impacto (energia de impacto ou a tenacidade de um corpo de prova padrão através da batida com um pêndulo).

Os resultados dos ensaios serão comparados a características padrões do polímero PET, e a polímeros convencionais semelhantes utilizados pela indústria para avaliar o potencial do uso como matéria prima reciclada.

3 JUSTIFICATIVA

O PET como matéria prima apresenta muitas vantagens em relação a sua durabilidade e resistência. Daí a importância de processar e caracterizar o PET reciclado reintroduzindo este material na indústria e na construção civil. Produtos PET demoram séculos para se degradar e o seu acúmulo na natureza é cada vez maior. Atualmente, apontam-se os problemas causados pela poluição por esse material, como a degradação da vida marinha, desequilíbrio de ecossistemas e ilhas de lixo flutuando pelo mar. Além disso, os plásticos, em geral, têm como a sua principal matéria prima o petróleo, o qual é responsável por grandes impactos ambientais devido aos vazamentos do óleo nos oceanos. Além disso, o petróleo não é renovável então, o plástico também é finito (Propeq, 2023).

A construção civil é responsável por consumir grande parte dos recursos naturais não renováveis e gerar impactos ambientais significativos, que se iniciam na extração da matéria prima para a fabricação de materiais de construção e se estendem até o final do ciclo de vida das obras. Neste contexto, o desenvolvimento de materiais de construção mais sustentáveis se faz necessário como forma de mitigar os impactos ambientais causados e contribuir para o desenvolvimento sustentável do setor. Novas técnicas ou novos materiais podem servir como subsídios para a produção de artigos que tenham características inovadoras e desejáveis para aplicações específicas que venham a facilitar a vida dos seres humanos (Inovasocial, 2022).

Segundo a Abrecon (2023), a massa total de resíduos da construção e demolição (entulho) gerada em 2022 no Brasil foi de, aproximadamente, 120 milhões de toneladas.

Um estudo encomendado pelo Picplast (Plano de Incentivo à Cadeia do Plástico) apontou que em 2021, 23,4% dos resíduos plásticos pós-consumo foram reciclados no país. No período também se destaca um incremento de 14,3% na produção de plástico reciclado pós-consumo, chegando a mais de 1 milhão de toneladas.

Como mostra a figura 1, em 2019, o Brasil reciclou 55% das embalagens de PET descartadas, segundo a Associação brasileira da indústria do PET. O volume corresponde a 311 mil toneladas de produto, o que gera um faturamento maior

que 3,6 bilhões de reais. Tal valor equivale a 36% do faturamento total do setor de PET no Brasil (Propeq, 2023). Cada vez mais procurada pelas grandes fabricantes de bens de consumo, em especial a indústria de bebidas, a resina plástica PET reciclada teve o seu preço acelerar e atingir patamares recordes.

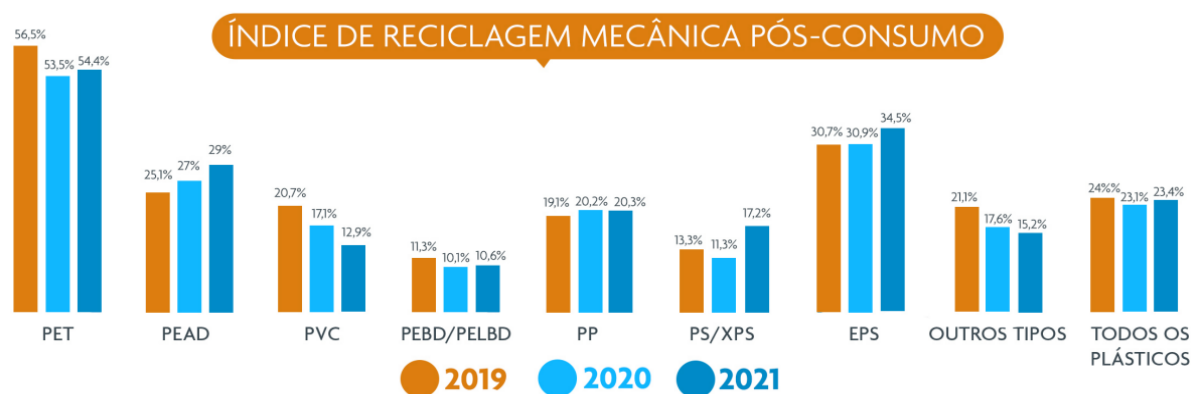
Figura 1 - Volume de PET reciclado



Fonte: Propeq, 2023.

A figura 2 indica o índice de reciclagem de polímeros no Brasil, que se manteve estável nos últimos anos, mostrando a recuperação da indústria pós pandemia (Abiplast, 2023).

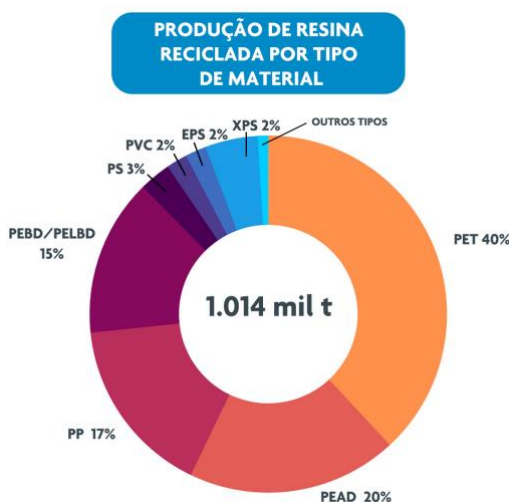
Figura 2 - Índice de reciclagem de polímeros no Brasil



Fonte: Abiplast, 2023.

Na figura 3, de todos os tipos de plástico produzidos no Brasil, o PET utilizado nas garrafas de refrigerante e água mineral é o que tem a mais alta taxa de reciclagem.

Figura 3 – Produção de resina reciclada por tipo de material polimérico



Fonte: Abiplast, 2023.

Outro ponto relevante a ser considerado é o mercado de créditos de carbono que surge como oportunidade para alavancar projetos alinhados com ações de sustentabilidade. Um crédito de carbono corresponde a uma tonelada de carbono que deixou de ser emitida para a atmosfera, e assim indústrias podem gerar um balanço positivo de créditos de carbono e que podem se reverter em vantagem econômica. As ações que podem ser transformadas em projetos de geração de créditos de carbono no contexto deste estudo, e assim fomentar potenciais novos negócios são:

- Adotar a logística reversa: viabilizar que consumidores possam devolver embalagens a sua origem, e facilitar o processo de reciclagem desses materiais, reduzindo custos e emissões de carbono da obtenção de matéria virgem para fabricação de novos produtos.
- Gerenciamento de resíduos sólidos: gerenciar a destinação dos resíduos urbanos e industriais, seja para alguma forma de reaproveitamento ou destruição do rejeito (material tóxico ou perigoso sem alternativa de reintrodução na cadeia produtiva) significa obedecer a lei, mas também uma oportunidade de abordagem sócio ambiental e de governança para gerar créditos de carbono.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Polímeros

A palavra polímeros vem do grego *poli*, que significa “muitas”, e *meros*, que é “partes”, isso porque as macromoléculas desses compostos originam-se através da ligação de várias unidades de moléculas pequenas, denominadas de monômeros. (Manual da química, 2023).

4.1.1 Tipos de polímeros

Os polímeros podem ser divididos em dois grupos principais: os polímeros naturais e os polímeros sintéticos:

- Polímeros naturais: são a borracha (látex – poli-isopreno formado por monômeros do isopreno, retirado da seringueira), os polissacarídeos (tais como a celulose (encontrada no algodão), o amido (encontrado em vegetais e na forma de grãos das sementes e de raízes de várias plantas, como: batata, trigo, arroz, milho e mandioca) e o glicogênio (encontrado em praticamente todas as células dos mamíferos, principalmente no fígado e nos músculos) e as proteínas, como a queratina presente nos cabelos, a caseína do leite e a fibroína presente no fio de seda da teia das aranhas.
- Polímeros artificiais ou sintéticos: O primeiro polímero sintético de interesse comercial foi o nitrato de celulose, conhecido como celuloide. Quando o valor do marfim das presas dos elefantes que era usado para produzir bolas de bilhar ficou muito elevado, uma fábrica norte-americana prometeu um bom prêmio para quem descobrisse um substituto para o marfim. Assim, em 1870, John Wesley Hyatt descobriu o celuloide que passou a ser usado não só para se produzir bolas de bilhar, mas também dentaduras, filmes fotográficos e colarinhos de camisas.
- Polímeros de adição: Formados pela reação de adição de um número muito grande de monômeros iguais, originando uma única molécula.

Exemplos: polietileno, PVC (policloreto de vinila), PTFE (politetrafluoretileno - teflon), PS (poliestireno), PP (polipropileno), PAN (poliacrilonitrila ou orlon), PVA (poliacetato de vinila), PMMA (polimetilmetacrilato ou plexiglass) e as borrachas sintéticas.

- Polímeros de condensação ou de eliminação: Formados pela reação de condensação entre moléculas de substâncias iguais ou diferentes com a saída simultânea de uma molécula pequena, como uma molécula de água.

Exemplos: baquelite, náilon ou poliamida, kevlar, poliéster (PET, dácron ou terilene), silicones e policarbonato

- Polímeros de rearranjo: Nesse caso, um ou mais monômeros sofrem rearranjo em suas estruturas à medida que ocorre a reação de polimerização.

Exemplo: o poliuretano.

Os polímeros sintéticos ou artificiais são chamados de plásticos e em sua fabricação usam-se calor e pressão para que adquiram forma. Além disso, tanto os polímeros naturais como os artificiais podem ser classificados em termoplásticos (seu formato pode ser modificado) e termorrígidos ou termofixos (sua estrutura tridimensional é rígida com ligações cruzadas, logo seu formato não pode ser modificado). (Manual da química,2023).

4.1.2 Aplicação de polímeros

Aplicações e usos de polímeros na construção civil, no setor automotivo, nas comunicações, embalagens e diversos setores da indústria.

Policarbonato (PC). O policarbonato trata-se de um composto de cadeia longa, formado por conjuntos funcionais unidos a conjuntos de carbonato. Eles são considerados termoplásticos, porque podem ser moldados quando aquecidos. As principais aplicações desse composto são em CDs, recipientes para filtros, garrafas, vitrines e divisórias.

Poliuretano (PU). Esse polímero é composto por uma cadeia de unidades orgânicas conectadas por ligações uretânicas. Essa opção é amplamente utilizada em chapas, estofamento de automóveis, isolamento térmico em roupas impermeáveis, esquadrias, revestimentos, filmes, correias e molduras.

Poliestireno (PS). Poliestireno é um homopolímero formado pela polimerização do monômero de estireno. Esse polímero também faz parte dos termoplásticos, o que lhe confere maior flexibilidade. Utiliza-se na fabricação de isolante térmico, grade de ar-condicionado, peças de máquinas e automóveis, e brinquedos.

Policloreto de vinilo (PVC). Muito conhecido como PVC, o policloreto de vinilo é um dos polímeros sintéticos mais produzidos no mundo e pode ser caracterizado como rígido ou flexível. Suas principais aplicações são em divisórias, telhas translúcidas, tubos e conexões para água, persianas, esgotos e ventilação.

Polipropileno (PP). Pertencente ao grupo das poliolefinas, o polipropileno ou polipropeno é um composto termoplástico produzido por meio da polimerização por adição do monômero de propileno. Nesse sentido, ele pode ser aplicado em recipientes para alimentos, produtos químicos, fibras, filmes orientados, material hospitalar, entre outros.

Polietileno Tereftalato (PET). O polietileno tereftalato é um termoplástico composto pela reação entre o etileno glicol e o ácido tereftálico. Em geral, aplica-se esse polímero na fabricação de fios, tecidos, embalagens para bebidas, produtos de limpeza, vassouras, alimentos, refrigerantes e afins (Wikipedia, 2023).

4.2 PET

Polietileno tereftalato, ou PET, é um polímero termoplástico patenteado em 1941 por dois químicos britânicos, John Rex Whinfield e James Tennant Dickson, formado pela reação entre o ácido tereftálico e o etileno glicol. É um poliéster por possuir o grupo funcional éster na sua cadeia principal, e possui propriedades termoplásticas, isto é, pode ser reprocessado diversas vezes pelo mesmo ou por outro processo de transformação. Quando aquecidos a temperaturas adequadas, esse plástico amolece, funde e pode ser novamente moldado (Politereftalato de etileno, 2022).

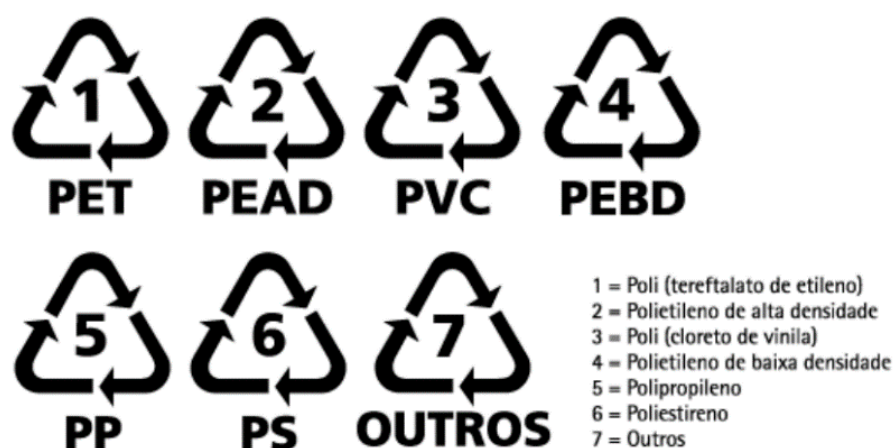
4.2.1 Processamento e reciclagem do PET

No processo de síntese do PET realizado em duas ou três etapas, são usados comonômeros e aditivos para otimizar as condições de processamento do material. Entretanto, tanto durante a síntese como no processo de reciclagem, ocorrem reações de degradação (termomecânica e termo oxidativa) e reações secundárias, formando acetaldeído, oligômeros, e o dietileno glicol. A presença desses “contaminantes” acelera o processo de degradação do polímero, afetando a qualidade do produto final (Romão W, 2009). Contudo, ainda é limitado o processo de reciclagem do PET devido à escassez de empresas que forneçam material de qualidade. Geralmente, o PET pós-consumo é comercializado na forma de flocos, os quais apresentam granulometria em torno de 3 a 9 mm, limitando, assim, sua aplicação em determinados processos (Awaja e Pavel, 2005)

A reciclagem de polímeros é classificada em quatro categorias: primária, secundária, terciária e quaternária. Tanto a reciclagem primária como a secundária também são conhecidas como reciclagem mecânica, o que diferencia uma da outra é que na primária utilizam-se polímeros pré-consumo e na secundária, polímeros pós-consumo. Na reciclagem terciária também é chamada de química, os produtos originais são transformados por meio de diversos processos, como no caso do plástico, que é transformado em hidrocarbonetos ou monômeros, podendo ser utilizado na produção de novos plásticos ou mesmo de produtos químicos. A reciclagem quaternária energética, promove a combustão completa do plástico através da incineração, geralmente em usinas. No Brasil a principal reciclagem praticada é a mecânica (Romão, 2009).

O plástico PET é um plástico reciclável da categoria “1”, figura 4, o que significa que é o tipo mais fácil de reciclar e revender. Ele pode ser transformado em mais garrafas, embalagens, sacos ou fibra de poliéster para sacos de dormir, fibras de carpete, lã, corda, travesseiros e mochilas (Propeq, 2023).

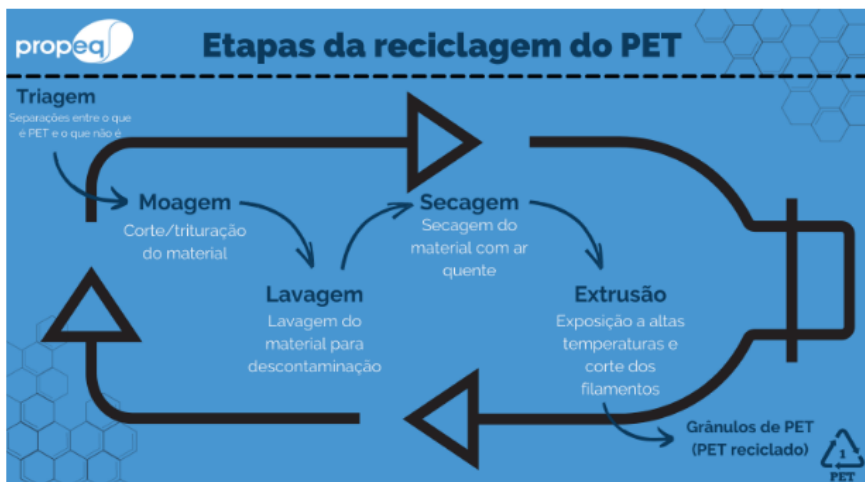
Figura 4 - Reciclagem de polímeros



Fonte: UFRJ Reciclagem de polímeros, 2018.

Existem 3 tipos de reciclagem possíveis, sendo elas a reciclagem mecânica, que é a mais comum, a reciclagem química, que consiste em transformar produtos plásticos em substâncias químicas e, geralmente, envolve processos de despolimerização, e a reciclagem energética, que envolve a utilização do poder calorífico de alguns resíduos, como restos de alimentos, plásticos, materiais higiênicos descartáveis, entre outros. A reciclagem mecânica, geralmente, envolve quatro etapas: moagem, lavagem, secagem e extrusão/injeção. Vale ressaltar que, antes do início do processo, é realizada uma triagem, que consiste em separar o que é PET do que não é PET (rótulos, tampas), e também pode separar os materiais por cor, origem, conteúdo antes envasado, etc. Além disso, a triagem ajuda a evitar que haja a entrada de material contaminado no processo (Propeq, 2023). A figura 5 indica as etapas de reciclagem do PET.

Figura 5 - Etapas de reciclagem do PET



Fonte: Propeq, 2023.

A seguir as quatro etapas:

Moagem: O processo de reciclagem começa com uma moagem do material, já separado, em um moinho, que corta ou tritura o material para diminuir seu tamanho. Esse material cortado ou triturado é o floco ou *flake* de PET e segue para a próxima etapa do processo.

Lavagem: Após a obtenção dos flocos de PET, realiza-se uma lavagem a fim de descontaminar o material de possíveis impurezas. Realiza-se a lavagem com água, e nessa etapa do processo, pode haver uma separação (opcional) dos *fakes* em um tanque com água baseado em suas diferentes densidades.

Secagem: os flocos de PET lavados passam por grandes secadores, nos quais circula ar quente, a fim de remover a água dos flocos e deixá-los secos para a próxima etapa.

Extrusão/injeção: Nessa etapa, submetem-se os flocos triturados, lavados e secos a altas temperaturas em uma máquina extrusora. O aquecimento promove a fusão dos flocos, que vão para uma matriz para a formação dos moldados.

4.2.2 Aplicações para o PET pós-consumo reciclado

O material PET possui muitas utilidades, uma vez que possui boa resistência química e mecânica, além de ser leve, facilitando o transporte. Dessa forma, diversos

setores da economia utilizam produtos que contenham PET reciclado. Novas embalagens, chapas e bobinas, aplicações têxteis, resinas insaturadas, fitas de arquear. plásticos de engenharia e tubos e condutores (figura 6).

Figura 6 - Aplicações para o PET reciclado

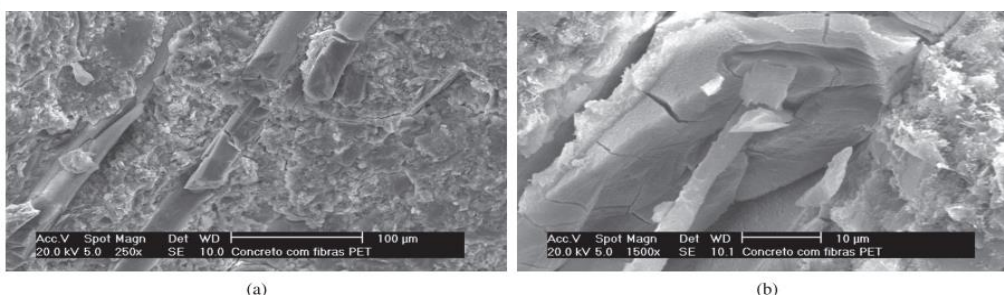


Fonte: Propeq,2023.

4.5 Processos de Degradação do PET

Os mecanismos e a cinética de degradação do PET são fortemente afetados pela presença e pelo tipo de co-monômero. A degradação também é importante para os processos de reciclagem, pois ela afeta as propriedades finais dos produtos reciclados. Por exemplo, na reciclagem mecânica, é desejável manter as propriedades intrínsecas do material original. A degradação pode ser iniciada por cisalhamento, calor, oxigênio, resíduos de catalisador, conduzindo a degradação mecânica, térmica, química, ou ainda a uma combinação destas (Romão W,2009). A figura 7 mostra em microscopia eletrônica de varredura (MEV) as fibras PET em processo de degradação após 150 dias no ambiente alcalino do concreto.

Figura 7- Processo de degradação do PET no ambiente alcalino do concreto.



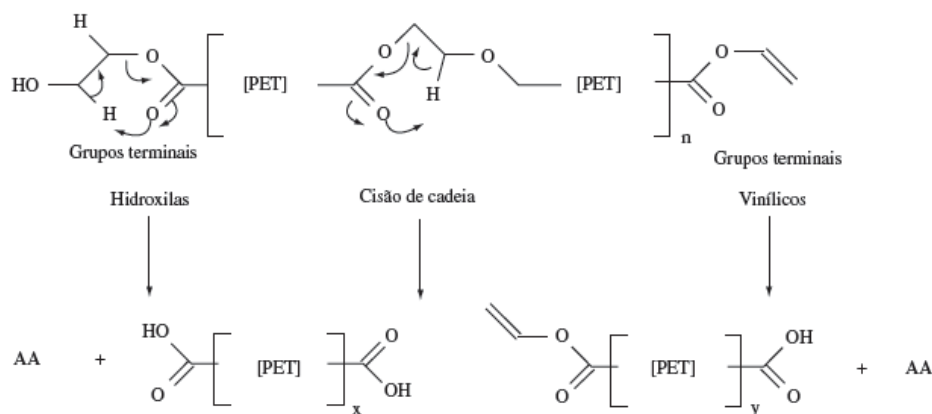
Fonte: Pelisser, F. et al, 2012.

4.5.1 Degradação termomecânica

A degradação termomecânica ocorre durante o processamento, quando o polímero sob aquecimento é submetido ao cisalhamento. A figura 8 ilustra este tipo de reação de degradação para o PET, onde as reações de cisão β ocasionam a formação de grupos terminais vinílicos e carboxílicos. Entretanto, como a temperatura de processamento normalmente é superior à temperatura de fusão do PET (~ 280 °C), as degradações térmicas podem ocorrer pela eliminação dos grupos terminais lábeis (hidroxílicos e vinílicos). Estudos com a degradação térmica do PET sob atmosfera inerte a altas temperaturas (270-370 °C), atribuíram a perda dos grupos finais hidroxílicos e vinílicos à formação de compostos de baixa massa molar, como o acetaldeído.

Alguns trabalhos sobre reciclagem mecânica por extrusão convencional mostraram que existe um limite de ciclos de reprocessamento onde as propriedades do PET são mantidas (Spinacé, M. A., 2000). Depois de três ciclos de processamento ocorre uma variação drástica nas propriedades mecânicas tornando-o duro e quebradiço, impossibilitando sua utilização para as mesmas aplicações do polímero virgem. (Romão W, 2009).

Figura 8 - Degradação termomecânica do PET



Fonte: Romão W, 2009.

4.5.2 Degradação termo oxidativa

A degradação termo oxidativa ocorre na presença de calor e oxigênio, resultando na formação de grupos cromóforos os quais são responsáveis por variações de cor (Ciolau, F. C. L., 2006). O PET reprocessado varia de cor tornando-se amarelo escuro e marrom, conforme o tempo de aquecimento. A degradação termo oxidativa do PET durante o seu reprocessamento é um fenômeno indesejável e deve ser evitada quando boas propriedades ópticas são exigidas, como por exemplo, em embalagens transparentes de bebidas. (Edge et al., 1996) estudaram a degradação termo oxidativa do PET a uma temperatura de 300 °C durante o período de 24 horas. Através de técnicas de UV-visível, infravermelho e fosforescência, eles observaram a formação de espécies quinonas e ésteres insaturados a partir da hidroxilação do anel aromático.

A separação adequada dos polímeros é muito importante para assegurar a qualidade dos produtos da reciclagem mecânica. A presença de macro contaminantes, como vidro, papel, metal ou outros polímeros, mesmo em concentrações pequenas pode alterar as propriedades do reciclado. Os resíduos de PVC e adesivos são problemas característicos do reprocessamento de garrafas de PET. Os adesivos, apesar de poderem ser desprezados em processos de inserção de rótulos tipo camisa, ainda são usados para colar rótulos nas garrafas, principalmente nas garrafas verdes. Já os resíduos de PVC se tornam comuns em reciclagens de

grande escala, devido à competição de mercado entre estes dois polímeros, dificultando sua diferenciação por aplicação. Tanto o PVC, quanto os adesivos, geram compostos ácidos nas temperaturas de processamento (ácido hidrolórico e acético, respectivamente), que catalisam a hidrólise dos grupos éster. Ainda durante a reciclagem de resíduos de PET, podem-se utilizar soluções alcalinas a altas temperaturas, para lavagem dos mesmos e, neste caso, as ligações éster podem ser quebradas por catálise básica. Porém, independentemente do tipo de catálise que possa prevalecer, a degradação térmica e auto oxidativa adicionam-se à degradação hidrolítica, durante o reprocessamento. Conseqüentemente, há um aumento no teor de grupos finais carboxílicos paralelamente a uma diminuição na massa molar dos poliésteres. Pode-se observar ainda que a contribuição conjunta dos resíduos de LDPE e PP de tampas e rótulos de garrafas, juntamente com as garrafas reprocessadas de HDPE/LDPE fez com que houvesse um incremento significativo na absorção, da amostra HDPE/PP tc, na região da carbonila, podendo indicar a ação desses resíduos como catalisadores da degradação da amostra de HDPE/PP. (Santos, A. S. F., Agnelli, 1999). Para os resíduos de PET, foi possível observar a importância da remoção do resíduo de adesivo, no processo de degradação deste polímero. No entanto, a retirada deste resíduo durante a lavagem implica em custo adicional nesta etapa, uma vez que seria necessário incrementar seu intervalo de tempo. Como sua influência numa amostra com secagem bem-sucedida não foi catalítica, um processo de lavagem com apenas 5 minutos pode ser vantajoso.

5 METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÕES

O material PET em flocos utilizado foi adquirido de uma empresa de reciclagem na cidade de Contagem/Mg, que comercializa o material em embalagens tipo *bag's* e é vendido ao preço de R\$3,50 o Kg do material. A amostra com 4kg do material foi enviada em maio de 2023 para a empresa Afinko Soluções em Polímeros localizada na cidade de São Carlos, em São Paulo, onde foram realizados os ensaios (Figura 9). Foram moldados 20 corpos de prova e selecionados dentre estes, 7 corpos de prova para ensaios de tração e 10 corpos de prova para ensaios de impacto. Conforme a norma ASTM D638, deve-se ter pelo menos 5 corpos de prova para cada ensaio. Os ensaios de espectroscopia no infravermelho, calorimetria exploratória diferencial, termogravimetria e determinação da viscosidade foram realizados nos flocos de PET.

5.1 Moldagem por Injeção

O processamento ocorreu aplicando o material em flocos diretamente no equipamento de injeção de polímeros Battenfeld Unilog B2-PL35/76, com os parâmetros T0(temperatura do bico), T1 temperatura (fundido), T2 temperatura (Entrada molde), Velocidade de Injeção, Pressão de Injeção, Tempo de Injeção, Pressão de Empacotamento e Tempo de Resfriamento indicados na Tabela 1. Na Figura 8 estão apresentadas imagens do processo de injeção (Afinko, 2023). Para a reprodutibilidade destes experimentos deve-se seguir os mesmos parâmetros utilizados para injeção.

Figura 9 - Amostra enviada para o laboratório Afinko



Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

A figura 10 mostra as condições de injeção com temperaturas do processo, velocidade de Injeção, pressão de Injeção, tempo de Injeção, pressão de empacotamento, tempo de empacotamento e tempo de resfriamento.

Figura 10 - Condições de Injeção

Parâmetro	AFK234244	
Temperaturas (°C)	T0 (Bico)	278
	T1 (Fundido)	260
	T2 (Entrada)	250
Molde	60	
Velocidade de Injeção (cm ³ /s)	42	
Pressão de Injeção (bar)	239	
Tempo de Injeção (s)	8	
Pressão de Empacotamento (bar)	239	
Tempo de Empacotamento (s)	6	
Tempo de Resfriamento (s)	10	
Equipamento(s)	Battenfeld Unilog B2-PL35/76	

Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

A figura 11 mostra imagens do processo de injeção da amostra AFK234244.

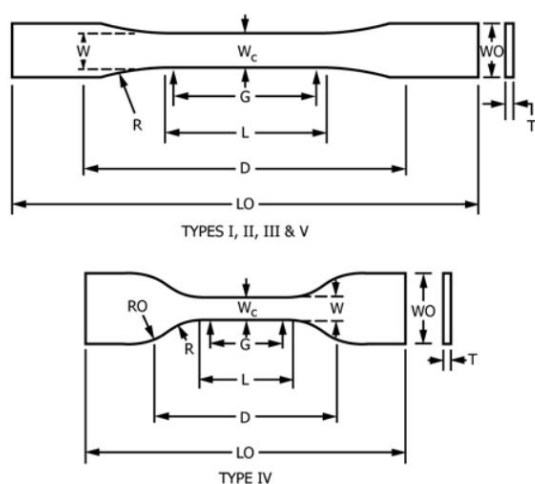
Figura 11 - Imagens do processo de injeção da amostra AFK234244



Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

De acordo com a norma ASTM D638, a moldagem de corpos de prova por injeção deve ser feita em pelo menos cinco espécimes para cada amostra no caso de materiais isotrópicos. Foi utilizado as medidas tipo 1 da tabela 2 da norma ASTM D638, indicadas na figura 12 e 13.

Figura 12 - Especificações de dimensões ASTM D638



Fonte: ASTM D638 – 2014.

Figura 13 - Especificações dimensões e espessura ASTM D638

Dimensions (see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.) ^A		
	7 (0.28) or under	Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	
	Type I	Type II	Type III
W —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)
L —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)
WO —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)
WO —Width overall, min ^G
LO —Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)
G —Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)
G —Gage length ^I
D —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)
R —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)
RO —Outer radius (Type IV)

Fonte: ASTM D638 – 2014.

A figura 14 mostra os corpos de prova após a injeção.

Figura 24 - Corpos de prova após a injeção

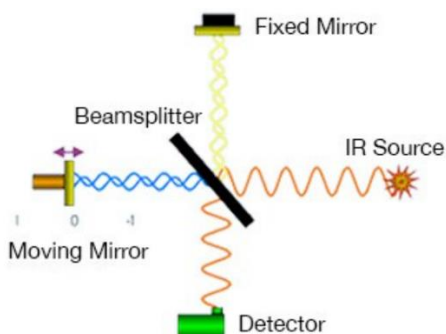


Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

5.2 Espectroscopia no infravermelho com transformada de forrier(FTIR)

O ensaio de FTIR é utilizado na caracterização e identificação de grupamentos químicos de materiais orgânicos e inorgânicos e permite avaliar diversas características como: identificar materiais desconhecidos e contaminações, determinar o índice de oxidação, avaliar degradação, quantificar alguns compostos e avaliar misturas de materiais. A espectroscopia no infravermelho é considerada uma das mais importantes técnicas experimentais para a caracterização de polímeros em termos de identificação e/ou determinação de características estruturais de Polímeros. A técnica de FTIR consiste quando a radiação infravermelha atinge uma amostra, parte da radiação é absorvida pela amostra e outra parte passa por ela (transmitida). Na figura 15, o sinal resultante no detector é um espectro que representa a característica molecular da amostra. A utilidade da espectroscopia no infravermelho se deve ao fato de que diferentes estruturas químicas (moléculas) produzem traços espectrais diferentes. A transformação de Fourier converte a saída do detector em um espectro interpretável. A técnica FTIR gera espectros padronizados que fornecem informações estruturais (Callister, 2007).

Figura 15 - A técnica FTIR



Fonte: Thermofisher , 2022.

Um espectro de FTIR é obtido a partir dos interferogramas "decodificados" como espectros reconhecíveis. Os padrões espectrais facilitam a identificação da amostra, uma vez que as moléculas têm impressões digitais infravermelhas específicas. A técnica de FTIR pode ser uma ferramenta de uso único ou uma ferramenta de pesquisa altamente flexível. Se a técnica FTIR estiver configurada para o uso de um dispositivo de amostragem específico (por exemplo, transmissão ou ATR), o espectrômetro poderá fornecer uma ampla variedade de informações. Na maioria dos casos, a identificação de uma substância desconhecida, e informação quantitativa sobre aditivos ou contaminantes. Informações sobre cinética de acordo com o aumento ou diminuição da absorção no infravermelho. Existem regiões características para cada tipo de características das moléculas.

O número de modos vibracionais aumenta com o número de átomos presentes na molécula. A transmitância de uma radiação é complementar a sua absorbância, nos espectros de infravermelho a unidade que se mede o espectro será a transmitância, diferente do UV-Vis em que eram trabalhadas as absorbâncias das substâncias (Callister, 2007). Por fim, a técnica de FTIR pode ser uma ferramenta econômica para obter respostas sobre caracterização de polímeros. Foram realizadas no equipamento espectrofotômetro da figura 16. As condições do ensaio são indicadas na figura 17.

Figura 16- Espectrofotômetro Bruker, Alpha II



Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Figura 17 - Condições do ensaio de FTIR

Condições: 32 repetições, leitura de 4000 a 400 cm^{-1}

Preparação da Amostra: Por ATR diretamente na amostra

Modo de Operação: Refletância **Data de Realização:** 05/06/2023

Equipamento: Espectrofotômetro Bruker, Alpha II

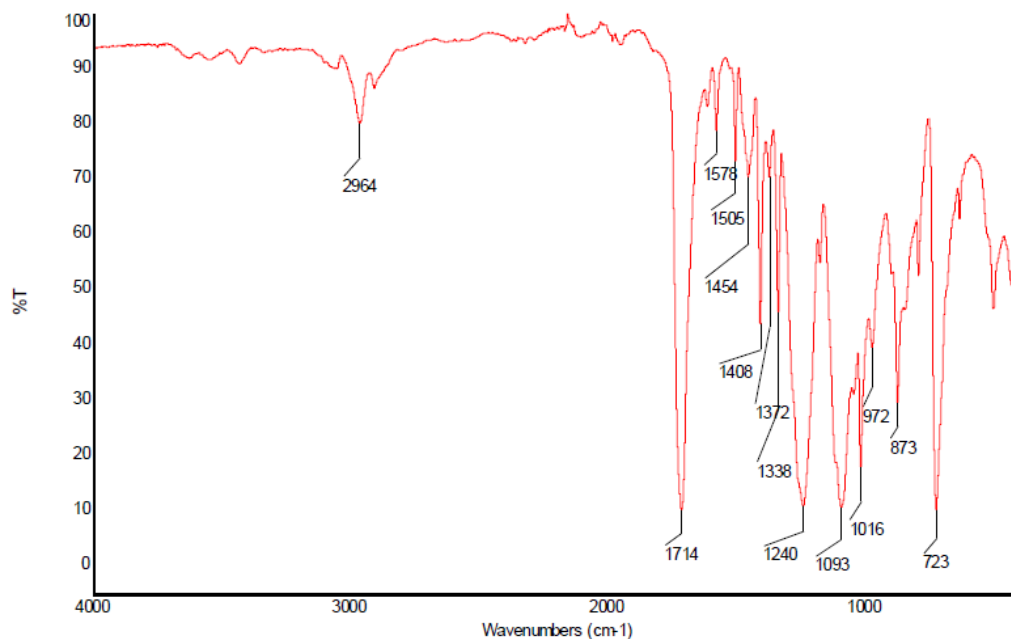
ASTM E1252:2021 – “*Standard Practice for General*

Norma de Referência: *Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis*”

Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Na Figura 18 está apresentado o espectro resultante da análise de FTIR da amostra AFK234244 e as bandas de absorção dos grupamentos químicos característicos presentes na amostra estão reunidas na figura 19. (Afinko, 2023).

Figura 18 - Espectro resultante da análise de FTIR da amostra AFK234244



Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Figura 19 - Grupamentos químicos presentes na amostra AFK234244

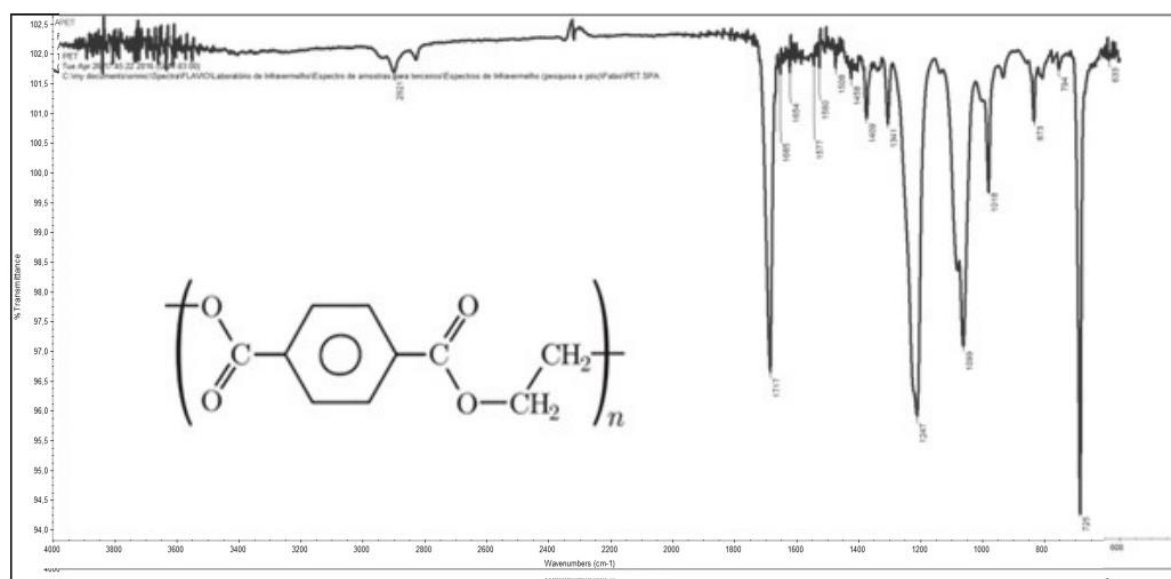
Número de Onda (cm ⁻¹)	Grupamento Característico
2962	Deformação axial assimétrica de CH ₃
1714	Deformação axial de C=O
1578 – 1505	Deformação axial de C=C aromático
1454 – 1408	Deformação angular de CH ₂
1372 – 1338	Deformação angular de CH ₃
1240	Deformação axial de ((C=O)O)
1093 – 972	Deformação axial de C-O
873	Deformação angular de C-H fora do plano em anel aromático <i>para</i> substituído
723	Deformação angular de CH ₂

Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

As informações fornecidas pela Figura 18 e 19 permitiram a observação de bandas de absorção referentes a grupamentos metileno (CH_2), aromático p-substituído e carboxila de éster ($(\text{C}=\text{O})\text{O}$), caraterísticos de poliésteres aromáticos, como PET e PBT. A análise de FTIR da amostra AFK234244 evidenciou bandas de absorção características de poliésteres aromáticos, que são polímeros termoplásticos e possuem uma estrutura química bem definida como a estrutura o polímero PET. (Afinko, 2023).

A figura 20 mostra o espectro padrão de PET com suas bandas de absorção assinaladas. A banda em 2921 cm^{-1} é relativa as ligações CH_2 , conforme mostrado na estrutura do PET. Quando o grupo éster se encontra ligado a um anel aromático, a deformação axial $\text{C}=\text{O}$ absorve as frequências mais baixas, como nesse caso em bandas de absorção em números de onda de 1717 cm^{-1} . A parte aromática é facilmente identificável pela deformação $\text{C}=\text{C}$ do anel ao número de onda de $1600\text{-}1450\text{ cm}^{-1}$. Dois picos característicos do tereftalato são observados na região da deformação $\text{C}-\text{O}$ ao número de onda de 1100 e 1300 cm^{-1} . A banda a 725 cm^{-1} surge a menores frequências do que é usual para um anel benzênico, devido a extensa deslocalização do sistema de elétrons na molécula, caracterizando um anel parassubstituído (Santos, 2009).

Figura 20 - Espectro padrão de PET



Fonte: Figura adaptada. Santos, A. S. F., 2009.

Analisando a tabela de absorção de PET padrão com a amostra de PET reciclado, não se observou mudanças significativas nas bandas de absorção, confirmando que o material reciclado é mesmo o polímero PET.

5.3 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

Calorimetria Exploratória Diferencial, pode ser definida como uma técnica que mede as temperaturas e o fluxo de calor associado com as transições dos materiais em função da temperatura e do tempo. Tais medidas fornecem informações qualitativas e quantitativas sobre mudanças físicas e químicas que envolvem processos endotérmicos (absorção de calor), exotérmicos (liberação de calor) ou mudanças de capacidade calorífica.

O método de ensaio consiste em aquecer ou arrefecer uma amostra a uma taxa controlada, sob ação de um gás de purga específico com fluxo controlado, e monitoramento contínuo com dispositivo de detecção adequado para observar a diferença de entrada de calor entre o material de referência e um material de ensaio. É apresentado na figura 18 o equipamento utilizado para o teste DSC. Numa análise de DSC podem ser obtidas propriedades como: Temperatura de transição vítrea, temperatura de fusão, temperatura de ebulição, temperatura e tempo de cristalização. Se trata de uma das técnicas mais importantes, utilizadas e difundidas para caracterização e identificação de Polímeros. Na figura 22 estão apresentadas as condições do ensaio e nas figuras 23 e 24 estão as curvas do primeiro e segundo aquecimento. (Callister, 2007).

Figura 21 - Equipamento DSC PerkinElmer, modelo DSC-6000



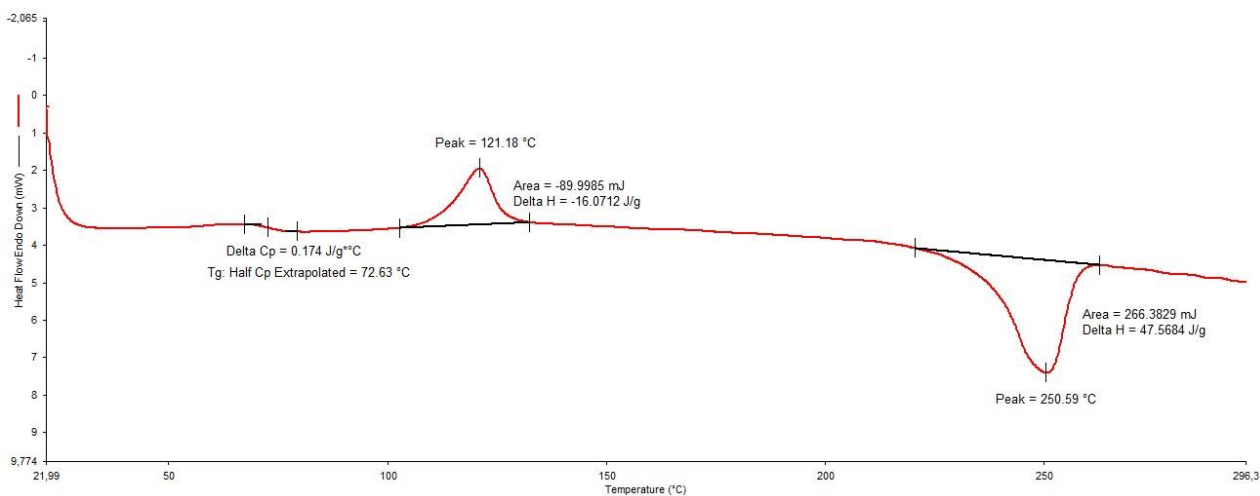
Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Figura 22 - Condições do ensaio de DSC

ETAPA	Faixa de Temperatura (°C)	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Gás Utilizado	Vazão do Gás (mL/min)
1º Aquecimento	23 a 300	10	N ₂	50
2º Aquecimento	23 a 300	10	N ₂	50
Porta-amostra: Cadinho de Alumínio				
Massa da(s) Amostra(s) (mg): AFK234244: 5,600				
Data de Realização: 06/06/2023				
Equipamento: (X) PerkinElmer, modelo DSC-6000 () Shimadzu, modelo DSC-60				
Norma de Referência: ASTM D3418:2021 – “Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry”.				

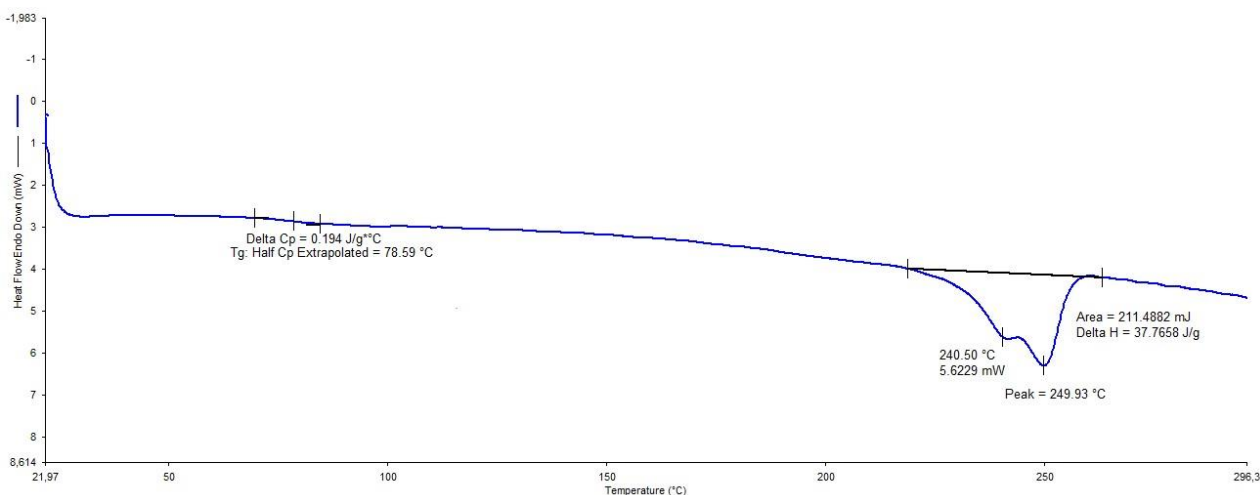
Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Figura 23 - Curva DSC da amostra AFK234244 – 1º Aquecimento



Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Figura 24 - Curva DSC da amostra AFK234244 – 2º Aquecimento



Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Na figura 25 estão apresentados os resultados do ensaio de DSC.

Figura 25 - Resultados do ensaio de DSC

Amostra	1º Aquecimento		2º Aquecimento	
	Tg (°C)	Tm (°C)	Tg (°C)	Tm (°C)
AFK234244	72,63	250,59	78,59	249,93

Tg: Temperatura de Transição Vítea, **Tm:** Temperatura de Fusão Cristalina.

Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Os resultados da análise de DSC da amostra AFK234244 evidenciaram uma temperatura de transição vítrea em torno de 79°C e uma temperatura de fusão cristalina em torno de 249°C, considerando o segundo aquecimento, que reflete propriedades intrínsecas do material, as quais são características de Polietileno Tereftalato (PET). (Afinko, 2023).

Os resultados das análises de FTIR e DSC, complementares na caracterização de materiais, indicam que a amostra AFK234244 é composta por Polietileno Tereftalato (PET), confirmando que após as etapas de uso da embalagem, descarte, coleta, triagem e moagem, não há contaminação de outros materiais. O material proveniente da indústria de reciclagem é adequado para o estudo.

5.4 Termogravimetria (TG)

O ensaio de TG é utilizado para se avaliar a estabilidade térmica, quantificar os resíduos inorgânicos, perda de água e perda de solventes ou plastificantes durante o ensaio. Esta análise baseia-se na medição contínua da massa da amostra em função da temperatura ou tempo e sob uma atmosfera controlada. Esse ensaio mede a variação de massa da amostra (perda e/ou ganho) em função da variação de temperatura imposta ao material analisado. O equipamento é composto por uma micro balança que mede a massa da amostra do início ao fim do ensaio. Com a mudança de temperatura, diversos fenômenos podem ocasionar a perda e/ou ganho de massa, em relação ao valor inicial. Essa técnica permite conhecer os efeitos que o aquecimento pode ocasionar no material, permitindo estabelecer a faixa de temperatura em que a amostra adquire composição química fixa, definida e constante, a temperatura em que começam a se decompor, acompanhar o andamento de reações de desidratação (perda de umidade), oxidação, combustão, decomposição (Callister, 2007). A figura 26 mostra o equipamento de ensaio TG e a figura 27 mostra as condições do ensaio TG.

Figura 26 - Equipamento Shimadzu, módulo termogravimétrico TGA-50



Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Figura 27 - Condições do ensaio TG

Etapa	Temperatura (°C)	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Gás Utilizado	Vazão do Gás (mL/min)
I	25 a 600	10	N ₂	50
II	600	Isoterma 2 min	N ₂	50
III	600 a 800	10	O ₂	50

Suporte de Amostra: Platina

Massa da(s) Amostra(s) (mg): AFK234244: 10,323

Data de Realização: 06/06/2023

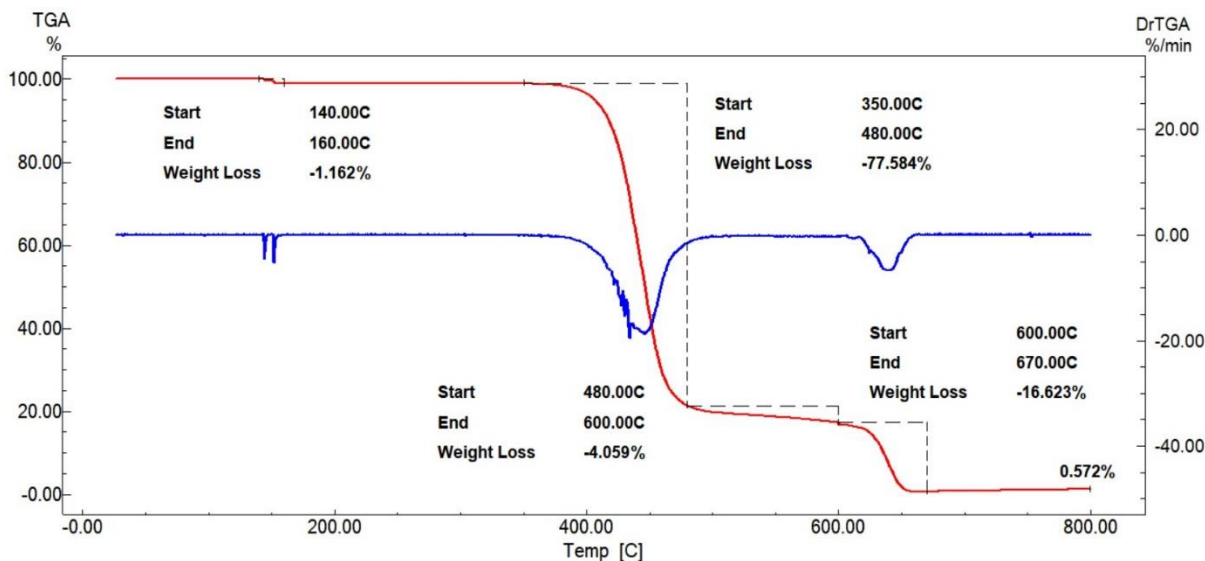
Equipamento: Shimadzu, módulo termogravimétrico TGA-50

Norma de Referência: ASTM E1131:2020 - "Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry"

Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Na Figura 28 estão apresentadas as curvas de TG e DTG. Ao analisar a curva TG, é possível identificar a Tonset, que é a menor temperatura em que pode ser detectado o início da variação de massa, e a Tendset, que se refere à menor temperatura, na qual o processo responsável pela variação de massa termina. A variação de massa em função da temperatura (dm/dT) é a derivada da curva TG, conhecida como DTG, que é utilizada para determinação da temperatura em que a velocidade de decomposição é máxima.

Figura 28 - Curvas TG (—) e DTG (—) referentes à amostra AFK234244



Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Na figura 29 estão apresentados os resultados do ensaio.

Figura 29 – Resultados do ensaio de TG

Amostra	Faixa de Temperatura (°C)	Perda de Massa (%)	Resíduo a 800°C (%)
AFK234244	140 a 160	1,16	0,57
	350 a 480	77,59	
	480 a 600	4,06	
	600 a 670	16,62	

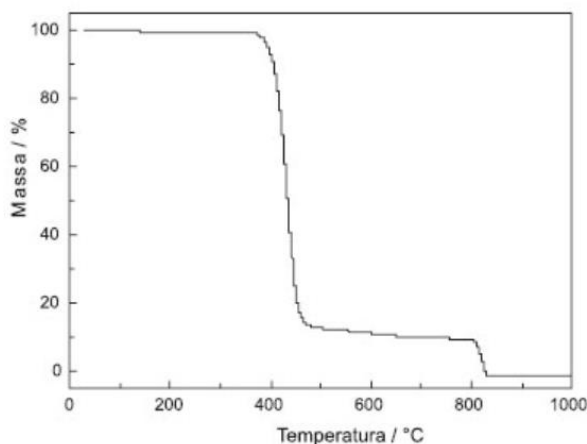
Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Os resultados da análise de TG da amostra AFK234244 revelaram quatro perdas de massa. A primeira na faixa de 140°C a 160°C de aproximadamente 1,16%, a segunda na faixa de 350°C a 480°C de aproximadamente 77,59%, a terceira na faixa de 480°C a 600°C de aproximadamente 4,06% e a quarta na faixa de 600°C a 670°C de aproximadamente 16,62%. A amostra apresentou um resíduo estável a 800°C de aproximadamente 0,57%, referente ao teor de material inorgânico presente em sua composição. (Afinko, 2023).

Na figura 30, a curva padrão TG para o PET não reciclado mostra variação de massa até 350 °C, quando se inicia uma perda de massa entre 350 e 510 °C, na qual

88% da massa inicial é perdida. Isso gera um resíduo carbonizado que foi queimado, ao se mudar a atmosfera do forno para ar a 800 °C. Quando esta alteração é realizada, ocorre a queima dos resíduos carbonizados entre 800 e 840 °C. Os parâmetros da curva TG para o PET reciclado correspondem com o PET padrão, confirmando que não houve perda destas características químicas.

Figura 30 - Curva padrão TG para o PET não reciclado



Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

5.5 Ensaio de Viscosidade

O ensaio de viscosidade é utilizado para analisar a resistência ao escoamento dos materiais. No caso dos polímeros, o tamanho de suas cadeias e o enovelamento entre elas causam muita fricção interna e dificuldade/resistência ao escoamento. Dessa forma, o ensaio de Viscosidade está diretamente ligado à massa molecular do polímero, sendo possível obter informações importantes, como diminuição da massa molecular, quebra de cadeias poliméricas e degradação. A análise é feita a partir do preparo de soluções com concentrações definidas de material polimérico e solvente e posterior escoamento através da gravidade, em um viscosímetro capilar de vidro. O capilar é imerso em banho com temperatura controlada, enquanto o tempo de escoamento de um volume conhecido de solução é determinado (Callister, 2007). A figura 31 mostra os equipamentos de ensaio de viscosidade, a figura 32 mostra as condições do ensaio de viscosidade e a figura 33 mostra os resultados do ensaio de viscosidade.

Figura 31 - Balança Analítica Mettler Toledo, modelo ME204/A e equipamento de banho viscosimétrico quimis.



Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Na figura 32 estão apresentados os resultados do ensaio.

Figura 32 - Condições do ensaio de viscosidade

Temperatura do Laboratório: 22,9°C	Umidade do Laboratório: 44%
Percentual de Material Inerte*: 0%	Concentração: 0,005 g/mL
Solvente: Fenol/1,1,2,2-Tetracloroetano (60%/40%)	
Temperatura de Dissolução: 100°C	Tempo de Dissolução: 25 minutos
Temperatura de Ensaio: 30°C	
Viscosímetro: Ubbelohde 1B	
Data de Realização: 07/06/2023	
Equipamento(s):	Banho Viscosimétrico da Quimis Balança Analítica Mettler Toledo, modelo ME204/A
Norma de Referência:	ASTM D4603:2018 – “Standard Test Method for Determining Inherent Viscosity of Poly(Ethylene Terephthalate) (PET) by Glass Capillary Viscometer”

Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Figura 33 – Resultados do ensaio de Viscosidade

Amostra	Medidas do tempo de escoamento da solução (t e t ₀) (s)					Viscosidade Intrínseca (dL/g)
	1	2	3	4	Média	
Branco (t₀)	67,1	67,1	67,1	67,1	67,1	---
AFK234244	89,9	89,5	89,6	89,4	89,9	0,600
	88,4	88,4	88,3	88,4	88,4	0,572

Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

O resultado da análise de viscosidade intrínseca foi realizado nos flocos de PET e indicou o valor de 0,586 dL/, que é inferior ao valor normalmente aceito para resinas que se destinam a fabricação de frascos por meio de injeção-sopro, em torno de 0,73 dL/g (Mancini, S. D. et al,2004). Porém, a viscosidade obtida para este estudo é suficiente para a moldagem por injeção convencional.

5.6 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é o método padrão de teste para Propriedades de tração de plásticos. O ensaio de tração é utilizado para determinar a curva Tensão x Deformação e medir as propriedades de módulo de elasticidade, tensão na ruptura e deformação na ruptura. Essas propriedades são importantes para o controle e especificação de materiais plásticos e para pesquisa e desenvolvimento. O ensaio pode ser realizado em corpos de prova, filmes, peças e produtos. Foi realizado o teste em 7 amostras conforme padrões estabelecidos pela norma ASTM D638 como mostra a figura 34.

Figura 34 - Equipamento de ensaio a tração Instron EMIC, modelo 23-30



Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Na figura 35 estão apresentadas as condições do ensaio e figura 3 estão apresentados os resultados do ensaio de tração.

Figura 35 - Condições do ensaio de Tração

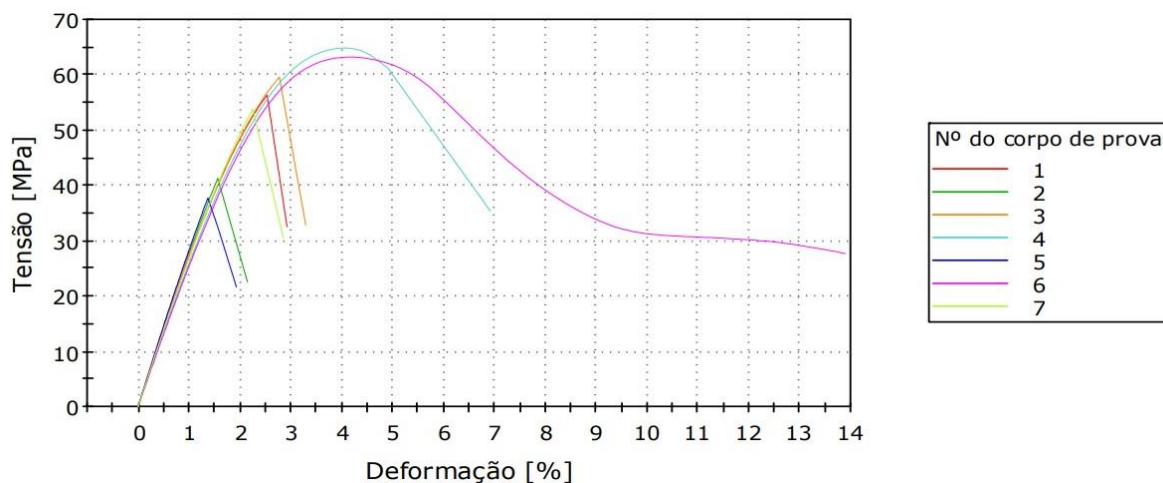
Temperatura do Laboratório: 21,6°C	Umidade do Laboratório: 44%
Temperatura do Ensaio: 23°C	Número de Corpos de Prova: 07
Célula de Carga: 5 kN	Comprimento Inicial (L₀): 50 mm
Velocidade do Ensaio: 50 mm/min	Corpo de Prova: Tipo I
Distância entre Garras: 115 mm	Extensômetro: até a ruptura
Dimensões dos Corpos de Prova:	Largura: (12,93 ± 0,03) mm
	Espessura: (3,28 ± 0,01) mm
Preparação dos Corpos de Prova:	<input checked="" type="checkbox"/> Injeção
	<input type="checkbox"/> Usinagem
	<input type="checkbox"/> Prensagem
	<input type="checkbox"/> Estampagem
	<input type="checkbox"/> Recorte
	<input type="checkbox"/> Enviados pelo Cliente
Data de Realização: 07/06/2023	
Equipamento:	Instron EMIC, modelo 23-30 Extensômetro de pequenas deformações, marca Instron EMIC, Tipo 1
Norma de Referência:	ASTM D638:2022 - "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics"

Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

A figura 36 mostra as curvas Tensão x Deformação da amostra, indicando o regime elástico, tensão de escoamento e tensão de ruptura de 7 corpos de prova. Os corpos de prova apresentaram tensões de ruptura entre o intervalo de 37,83 e 64,65 Mpa (Afinko, 2023). O corpo de prova número 4 apresentou uma maior tensão de

ruptura e na figura 24 um padrão de ruptura cruzado, não caracterizando anormalidade no teste, mas um outlier estatístico.

Figura 36 - Curvas Tensão x Deformação da amostra AFK234244



Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Na figura 37 estão apresentados os resultados do ensaio.

Figura 37 - Resultados do ensaio de Tração

Tabela 13 - Resultados do ensaio de Tração.

Amostra	C.P.	Módulo Elástico* (GPa)	Tensão na Ruptura (MPa)	Deformação na Ruptura (%)
AFK234244	1	2,85	56,36	2,53
	2	2,90	41,38	1,56
	3	2,96	59,60	2,77
	4	2,73	64,65	4,26
	5	2,93	37,83	1,37
	6	2,62	63,10	4,37
	7	2,79	53,85	2,25
Média		2,83	53,82	2,73
Desvio Padrão		0,12	10,44	1,19

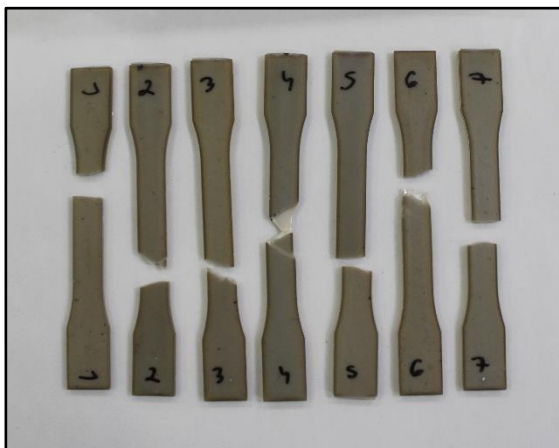
*Valor calculado entre 0,05% e 0,25% de deformação.

Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Na Figura 38 pode ser observada uma imagem dos corpos de prova da amostra AFK234244 após o ensaio de tração, onde se verifica ruptura em posições

fora da região da garra e na região do extensômetro, sem a existência de um ponto frágil em comum.

Figura 38 - Corpos de prova da amostra AFK234244 após o ensaio de tração



Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Analisando o valor de Módulo elástico obtido nos ensaios tração de 2,83 Gpa e comparando com os valores de diversos polímeros da Figura 39, conclui-se que o módulo de elasticidade do PET reciclado está dentro da faixa média de valores do PET virgem, o que evidencia a viabilidade do seu uso. A tensão de ruptura do acetato de celulose, que também é um polímero termoplástico fica em torno de 40 Mpa, próximo a média de 53,82 MPa apresentada nos resultados do PET reciclado.

Figura 39 - Módulo elástico de polímeros

Material	Módulo de elasticidade		Coeficiente de Poisson
	GPa	10 ⁶ psi	
Polímeros			
PVC (Cloro de polivinila):	2,41-4,14	0,35-0,60	0,38
Epóxi:	2,41	0,35	-
Fenólico:	2,76-4,83	0,40-0,70	-
Náilon 6,6:	1,59-3,79	0,230-0,550	0,39
Polibutileno tereftalato (PBT):	1,93-3,00	0,280-0,435	-
Policarbonato (PC):	2,38	0,345	0,36
Poliéster (termofixo):	2,06-4,41	0,30-0,64	-
Poliestireno (PS):	2,28-3,28	0,330-0,475	0,33
Poliéter-éter-cetona (PEEK):	1,10	0,16	-
Polietileno Alta densidade (HDPE):	1,08	0,157	-
Polietileno tereftalato (PET):	2,76-4,14	0,40-0,60	-
Polimetil metacrilato (PMMA):	2,24-3,24	0,325-0,470	-
Polipropileno (PP):	1,14-1,55	0,165-0,225	-

Fonte: Sonelastic, 2023

5.7 Ensaio de Impacto Izod

O ensaio de flexão por impacto com entalhe conforme ASTM D256 é utilizado em todos os plásticos rígidos com o objetivo de caracterizar o comportamento frente a estresses por impacto. A força de flexão repentina é aplicada em uma amostra entalhada fixada de forma unilateral por meio de impacto no lado estreito como é demonstrado no equipamento na figura 40. O resultado é apresentado como absorção energética da amostra relacionada à espessura, o que significa sua tenacidade ou resistência ao impacto. (Callister, 2007).

Figura 40 - Equipamento NZ Philpolymer, modelo XJC – 25D



Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

No ensaio de impacto, um corpo de prova é preparado de acordo com as especificações da norma ASTM D256. Durante o ensaio, o corpo de prova é fixado em uma máquina de ensaio de impacto, que aplica uma carga de impacto controlada por meio de um martelo ou pêndulo. A energia absorvida pelo corpo de prova durante o impacto é medida e registrada por meio de sensores ou transdutores específicos acoplados à máquina de ensaio. Essa energia absorvida é calculada com base nas medidas de deformação ou deslocamento resultantes do impacto. A quantidade de energia absorvida é um indicador importante da capacidade do material em resistir a impactos repentinos, que é a tenacidade. (Callister, 2007).

Os resultados do ensaio de impacto são interpretados considerando a energia absorvida, características da fratura e outros parâmetros relevantes. Em resumo, o ensaio de impacto é uma técnica fundamental para avaliar a resistência de materiais a cargas de impacto repentinas. Ele fornece informações cruciais sobre a capacidade de um material em resistir a impactos e absorver energia, auxiliando na seleção adequada de materiais e garantindo a segurança e o desempenho de componentes e estruturas em diversas indústrias. Na figura 41 estão apresentadas as condições do ensaio.

Figura 41 - Condições do ensaio de Impacto Izod

Temperatura do Laboratório: 23,2°C	Umidade do Laboratório: 40%
Temperatura de Ensaio: 23°C	Número de Corpos de Prova: 10
Pêndulo: 2,75 J	Entalhe: Sim
Dimensões dos Corpos de Prova:	Largura: (10,140 ± 0,026) mm
	Espessura: (3,38 ± 0,12) mm
Preparação dos Corpos de Prova:	<input checked="" type="checkbox"/> Injeção
	<input checked="" type="checkbox"/> Usinagem
	<input type="checkbox"/> Prensagem
	<input type="checkbox"/> Estampagem
	<input type="checkbox"/> Enviados pelo Cliente
Data de Realização: 07/06/2023	
Equipamento: NZ Philpolymer, modelo XJC – 25D	
Norma de Referência:	ASTM D256:2023 – “Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics”

Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Na Figura 42 pode ser observada uma imagem de um corpo de prova da amostra AFK234244 posicionado no equipamento de impacto.

Figura 42 - Corpo de prova da amostra AFK234244 no equipamento de impacto



Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Na figura 43 estão apresentados os resultados do ensaio com 10 corpos de prova e na figura 30 os corpos de prova após o ensaio. Os resultados apresentaram um desvio padrão de 5,98 J/m em torno da média 20,29 J/m, que é o grau de dispersão dos

valores da amostra de um material que passou por ciclos de uso, coleta e processamento.

Tipo de Fratura:

C = Quando ocorre quebra completa do corpo de prova.

Figura 43 – Resultados do ensaio de Impacto Izod

Amostra	C.P.	Energia Absorvida (J)	Resistência ao Impacto Izod		Tipo de Fratura
			J/m	kJ/m ²	
AFK234244	1	0,044	13,13	1,30	C
	2	0,091	27,74	2,74	C
	3	0,081	23,34	2,29	C
	4	0,089	26,57	2,63	C
	5	0,061	18,15	1,79	C
	6	0,057	17,38	1,72	C
	7	0,061	16,94	1,66	C
	8	0,039	10,89	1,08	C
	9	0,069	21,17	2,09	C
	10	0,091	27,58	2,71	C
Média		0,068	20,29	2,00	C
Desvio Padrão		0,019	5,98	0,59	

Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

A figura 44 mostra uma superfície de fratura similar em todos os corpos de prova, indicando corpos de prova homogêneos.

Figura 44 - Corpos de prova da amostra AFK234244 após o ensaio de impacto



Fonte: Relatório AFK234244, 2023.

Analisando-se o valor de resistência ao impacto IZOD nos ensaios de 20,29 J/m e comparando-se com os valores de amostras de PET e blendas PET/PEN da figura 45 com valores entre 14,9 e 31,6 J/m, pode-se assegurar que o material está com a resistência ao impacto dentro dos intervalos padrões de um polímero PET, o que evidencia sua aplicabilidade.

Figura 45 - Resultados de Resistencia ao impacto de polímeros PET

Material	Espessura do corpo de prova (mm)	Valor médio da Energia perdida no impacto (J)	Valor médio da Resistência ao Impacto Izod com entalhe (J/m)
PET Lote 1	3,425 ± 0,005	0,109	31,6
PET Lote 2	3,425 ± 0,005	0,102	29,8
PEN	3,450 ± 0,005	0,087	24,5
Blenda PET/PEN 70/30 injetada	3,475 ± 0,005	0,108	31,0
Blenda PET/PEN 70/30 extrudada e injetada	3,450 ± 0,005	0,052	14,9
Blenda PET/PEN 85/15 injetada	3,400 ± 0,005	0,106	31,3
Blenda PET/PEN 85/15 extrudada e injetada	3,500 ± 0,005	0,084	23,4

Fonte: Trombini, R. C., 2000.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo investigar as características do PET reciclado proveniente de embalagens descartadas adquirido das empresas de reciclagem, processando o material, submetendo a ensaios físico-químicos e mecânicos e assim, comparar e analisar suas propriedades para obter novos materiais ou novas matérias-primas, a partir de materiais que já foram utilizados e descartados. Para o uso adequado de polímeros novos e reciclados, é muito importante conhecer as propriedades desses materiais, tais como temperatura de fusão, grau de cristalinidade, pureza, transição vítrea e a história térmica. O termo história térmica é usado para descrever eventuais processos de aquecimento e resfriamento aos quais a amostra tenha sido eventualmente submetida. Através do conhecimento de tais propriedades, será possível utilizar/reutilizar os polímeros. Diante da importância da reciclagem como um processo de transformação que recoloca esses produtos no ciclo produtivo, a reciclagem reduz o consumo de recursos naturais, reduz as emissões de CO₂ e diminui o aquecimento global, diminui a poluição do solo e da água, e gera empregos. Reciclagem é entendida como uma alternativa, uma ferramenta dentro de um modelo econômico emergente conhecido como economia circular. Esta pesquisa objetiva caracterizar um material proveniente do lixo urbano, com disponibilidades mercadológicas e também ser um negócio rentável, mantendo a visão de que os recursos naturais não são infinitos e também para a economia poder continuar crescendo em um mundo limitado. O PET é o plástico mais reciclado em todo o mundo e o Brasil possui posição de destaque nesse contexto, com desempenho superior aos Estados Unidos e diversos países da União Europeia e Ásia. O índice de reciclagem brasileiro atingiu 56,4% das embalagens de PET descartadas pela população em 2021, um crescimento de 15,4% sobre o volume registrado em 2019 (Abipet, 2022).

Para análise de reprodutibilidade destes testes deve-se entender que no ciclo de uso e reciclagem deste material, são coletados diversos recipientes de diversas marcas onde a variabilidade depende do fornecedor e do processo de reciclagem adotado, porém os parâmetros de injeção e moldagem estão bem definidos. A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) colocou em discussão, com a sociedade, os critérios para a reciclagem de embalagens e equipamentos plásticos de Polietileno Tereftalato (PET). A proposta da Anvisa, aberta a contribuições até o dia 9

de outubro de 2023, trata do aproveitamento seguro desses produtos para a fabricação de novas embalagens de alimentos.

As caracterizações químicas (FTIR), físico-químicas (TG/DTG-DSC), revelaram a composição dos materiais comerciais e reciclados indicando principalmente que os materiais trabalhados eram polietileno tereftalato, não havendo misturas de outros polímeros, aditivos ou contaminantes, por se tratar de materiais reciclados. Os ensaios de calorimetria exploratória (DSC), espectroscopia Molecular por infravermelho (FTIR), termogravimetria (TG), indicaram que a estrutura do PET padrão foi mantida após estes ciclos.

Os resultados dos ensaios mecânicos mostraram o potencial do uso da matéria prima reciclada, com valores médios de viscosidade intrínseca de 0,586 dL/g, módulo de elasticidade de 2,83 GPa, tensão na ruptura de 53,82 Mpa, deformação na ruptura de 2,73%, e resistência ao impacto IZOD de 20,29 J/m, próximos aos materiais plásticos utilizados no mercado. Essa constatação confirma a viabilidade para o desenvolvimento de produtos com PET reciclado, principalmente em setores como os da construção civil, onde há uma ampla aplicação de diversos materiais e em constante inovação.

7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Partindo do que foi desenvolvido nesse estudo, os trabalhos futuros podem abranger diversas aplicações, baseando-se nas características físicas, químicas e mecânicas necessárias.

Trabalhos anteriores similares já foram desenvolvidos com caracterização de outras propriedades do PET-R, que vem a somar mais informações úteis e ampliam a aplicabilidade deste material. No artigo PROPOSTA PARA O USO DO POLI(ETILENO TEREFALATO) - PET RECICLADO EM COBERTURAS DE EDIFICAÇÕES COMO SOLUÇÃO DE ENGENHARIA PARA OTIMIZAÇÃO DO CONFORTO AMBIENTAL NO INTERIOR DAS EDIFICAÇÕES, foram feitas análises térmica e mecânica, caracterização morfológica dos materiais e imagens digitais obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de PET-R. A adição de 10% em massa de PEAD às blendas de PET-R provocou um acréscimo de 10% no valor de limite de resistência à ruptura. (Souza, André Ricardo de, 2018).

Aplicações com materiais combinados: São os materiais obtidos pela combinação entre materiais naturais e artificiais. São combinados numa escala macroscópica para formar um terceiro material. Como exemplos são concretos e argamassas. O PET tem uma matriz polimérica que não interage com materiais cimentícios, que atuam por cristalização. Mas concretos e argamassas de base asfálticas, aceitam perfeitamente o PET reciclado, desde que o PET reciclado tenha uma granulometria próxima da areia. Equipamentos como moinho de panela trituram os flocos de PET até granulometrias próximas a materiais como areia e argila, tornando possível sua adição em concretos e argamassas asfálticas, melhorando as propriedades de absorção de água do material combinado.

Aplicações como materiais de vedação. São aqueles que não têm função estrutural, servindo para isolar e fechar os ambientes nos quais são empregados. Criados para impedir a passagem de maneira estática ou dinâmica, de líquidos, gases e sólidos particulados de um meio para outro. Exemplos de materiais: tijolos de vedação e vidros. Placas, filmes e elementos com encaixe podem ser obtidos com a injeção do PET reciclado, que é impermeável, resistente a intempéries e ambientes corrosivo e possui alta durabilidade.

Materiais com características estruturais, que suportam as cargas e demais esforços atuantes na estrutura, como a madeira, o aço e o concreto. A injeção do PET reciclado em moldes com formato semelhantes a ripas de madeira onde estes elementos moldados podem ser analisados, quanto ao suporte de carga. A norma ISO 178 descreve a determinação das propriedades de flexão em plásticos. No ensaio de flexão de 3 pontos, a amostra é posicionada sobre dois apoios paralelos e flexionada. Esse tipo de ensaio fornece informações valiosas sobre a resistência à flexão, à rigidez e o comportamento dos materiais poliméricos. A laminação de várias peças moldadas com PET reciclado possibilita obter um elemento de maior dimensão, com maior suporte de carga e capaz de vencer vãos maiores.

Aplicações destinadas a um material de revestimento, formando painéis de um material reciclado resistente a água. Com aplicações semelhantes aos pisos vinílicos, painéis de PVC e MDF, tapetes flexíveis e peças intertravadas.

Pequenos calços, suportes e cunhas também são pertinentes, devido aos resultados apresentados nos ensaios mecânicos.

REFERÊNCIAS

ABIPET - **Associação Brasileira da Indústria do PET**. Disponível em <https://abipet.org.br/>. Acessado em 20 de setembro de 2022.

ABIPLAST - A Associação Brasileira da indústria do plástico, **4ª Pesquisa Anual de índice de Reciclagem de Plástico no Brasil**. Disponível em https://www.abiplast.org.br/publicacoes/pesquisa_reciclagem_picplast/. Acessado em 10 de julho de 2023.

ABRECON - A Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. **70% do entulho no Brasil é descartado incorretamente**. Disponível em <https://abrecon.org.br/artigos/70-do-entulho-no-brasil-e-descartado-incorretamente>. Acessado em 8 de julho de 2023.

AFINKO – **Afinko Soluções em Polímeros**- <https://afinkopolimeros.com.br/servicos/ensaios-laboratoriais/ensaios-quimicos>. Acessado em 10 de março de 2023.

Alves de Figueiredo Pessôa, Vitor. **Reciclagem e Reutilização de Materiais Poliméricos Plásticos** / Vitor Alves de Figueiredo Pessôa. – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2018. Acessado em 10 de fev. de 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D638 – 10: **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. West Conshohocken: Astm International, 2014. 16 p. Acessado em 15 de fev. de 2022.

AQUINO, José Lourenço Santos. **Desenvolvimento de compósitos de matriz cimentícia utilizando resíduos de politereftalato de etileno (PET) e de areia de britagem na produção de concreto**. 2013. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2013. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2349>

AWAJA, F.; PAVEL, D. **Recycling of PET**. European Polymer Journal. v.41, p.1453–1477, 2005. Acessado em 5 de nov. de 2022.

Bannach, G., Perpétuo, G. L., Cavalheiro, É. T. G., Cavalheiro, C. C. S., & Rocha, R. R.. (2011). **Efeitos da história térmica nas propriedades do polímero pet: um experimento para ensino de análise térmica**. Química Nova, 34(10), 1825–1829. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011001000016>. Acessado em 5 de fev. de 2022.

CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros**: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2 ed. São Paulo, BRA, Artliber Editora, 2006. Acessado em 5 de março de 2022.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering**. New York, John Wiley & Sons, 2007. Acessado em 5 de fev. de 2022.

Ciolacu, F. C. L.; Choudhury, N. R.; Dutta, N. & Voelcker, N. H. - **Macromolecules**, 39, p.7872 (2006). Acessado em 5 de dez. de 2022.

Edge, M.; Wiles, R.; Allen, N. S.; McDonald, W. A. & Mortlock, S. V. - **Polym. Degrad. Stab.** 53, p.141 (1996). Acessado em 5 de fev. de 2022.

FOTI, D., PAPARELLA, F. **Impact behavior of structural elements in concrete reinforced with PET grids**. Mechanics Research Communications. Reino Unido, v. 57, 2014, p. 57-66, abr. 2014. ISSN: 0093-6413 DOI:10.1016/j.mechrescom.2014.02.007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechrescom.2014.02.007> Acesso em: 12 out. 2020.

INOVASOCIAL - Plataforma sobre Inovação Social. **Soluções-de-impacto/ciclo-de-vida-garrafa-plastica**. Disponível em <https://inovasocial.com.br/>. Acessado em 12 de setembro de 2022.

Mancini, S. D. et al. - **Variação da viscosidade intrínseca do poli (tereftalato de etileno) de embalagens**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 14, nº 2, p. 69-73, 2004. Acessado em 5 de fev. de 2022.

Nunes, E. de C. D., Agnelli, J. A. M., & Rossi, R. A. (1998). **Poli (Etileno Naftalato) - PEN: uma revisão do seu histórico e as principais tendências de sua aplicação mundial**. *Polímeros*, 8(2), 55–67. <https://doi.org/10.1590/S0104-14281998000200009>

O que são polímeros. Manual da química, 10 de julho de 2023. Disponível em <https://www.manualdaquimica.com/quimica-organica/o-que-sao-os-polimeros.htm>. Acessado em 10 de setembro de 2023.

Para que servem os polímeros confira as principais aplicações. Polyexcel, 10 de julho de 2023. Disponível em <https://polyexcel.com.br/industria/para-que-servem-os-polimeros-confira-as-principais-aplicacoes/>. Acessado em 10 de setembro de 2023.

Pavia, D.L.; Lampman, G.N.; Kriz, G.S. e Vyvyan, K.J. **Introdução à Espectroscopia**, 1ª ed. Editora Cengage Learning, - Tradução da Quarta Edição Americana, 2010. Acessado em 5 de julho de 2022.

Pelisser, F., Montedo, O. R. K., Gleize, P. J. P., & Roman, H. R. (2012). **Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete**. Acessado em 8 de fev. de 2022.

PLASTICS, M. **Thermoset and Thermoplastic Differences**. Disponível em: <http://www.modorplastics.com/thermoset-vs-thermoplastics>. Acessado em 05 de abr. de 2023.

POLITEREFTALATO DE ETILENO. In: **WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre**. Flórida: Wikimedia Foundation, 2022. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Politereftalato_de_etileno&oldid=62966911. Acessado em 5 de fev. de 2022.

PROPEQ – Projeto e Pesquisa em Engenharia Química. **Reciclagem de PET**. Disponível em <http://www.propeq.com/reciclagem-de-pet/>. Acessado em 10 de maio de 2023.

Santos, A. S. F., Agnelli, J. A. M., & Manrich, S. (1999). **Estudo da influência de resíduos catalíticos na degradação de plásticos reciclados (Blenda HDPE/PP e**

PET) provenientes de lixo urbano. Polímeros, 9(4), 189–194. <https://doi.org/10.1590/S0104-14281999000400031>. Acessado em 5 de fev. de 2022.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Reciclagem de garrafas PET na construção civil.** Disponível em <https://sebrae.com.br/>. Acessado em 15 de julho de 2023.

Souza, André Ricardo de, 1980 - **Proposta para o uso do poli (etileno tereftalato) - pet reciclado em coberturas de edificações como solução de engenharia para otimização do conforto ambiental no interior das edificações: análise térmica e mecânica.** / André Ricardo de Souza. – Belo Horizonte, 2018. Acessado em 5 de fev. de 2023.

Spinacé, M. A. - "**Poli (tereftalato de etileno): reprocessamento por extrusão e metodologias de caracterização**", Teste de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Brasil, (2000). Acessado em 5 de nov. de 2022.

Romão, Wanderson & Spinacé, Márcia & De Paoli, Marco Aurelio. (2009). **Poli(Tereftalato de Etileno), PET: Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem.** Polimeros-ciencia E Tecnologia - POLIMEROS. 19. 10.1590/S0104-14282009000200009. Acessado em 10 de agosto de 2022.

Trombini, R. C., Agnelli, J. A. M., Tafuri, R. M. **Comportamento Mecânico do PET, do PEN e das blendas poliméricas PET/PEN.** Departamento de Engenharia de Materiais Universidade Federal de São Carlos (2000). Acessado em 5 de dez. de 2022.

Wikipedia, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2023. **Politereftalato de etileno.** Disponível em https://pt.wikipedia.org/wiki/Politereftalato_de_etileno/. Acessado em 15 de julho de 2023.