

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE MAUÁ**

CURSO DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

**ÉRICA APARECIDA DE FARIA
GABRIELA FRANCISCA DO CARMO SILVA
JOÃO PEDRO FANTONI**

**CARACTERIZAÇÃO E RECICLAGEM DE CARRETÉIS PLÁSTICOS DE INDÚSTRIA DE
CIRCUITOS ELETRÔNICOS**

MAUÁ/SP

2024

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE MAUÁ**

**CARACTERIZAÇÃO E RECICLAGEM DE CARRETÉIS PLÁSTICOS DE INDÚSTRIA DE
CIRCUITOS ELETRÔNICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à FATEC Mauá como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnólogo em Polímeros.

Orientador: Prof. Esp. Afonso Henriques Neto

MAUÁ/SP

Catálogo-na-Publicação – Biblioteca Fatec Mauá

668.4

F224c Faria, Érica Aparecida de.

Caracterização e reciclagem de carretéis plásticos de indústria de circuitos eletrônicos / Érica Aparecida de Faria, Gabriela Francisca do Carmo Silva, João Pedro Fantoni. – 2024.
53 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Esp. Afonso Henriques Neto.

Trabalho de conclusão de curso (Curso Superior de Tecnologia em Polímeros) – Faculdade de Tecnologia de Mauá.

Referências: p. 51-53.

1. Caracterização. 2. Poliestireno. 3. Reciclagem. 4. Carretéis plásticos. I. Silva, Gabriela Francisca do Carmo. II. Fantoni, João Pedro. III. Henriques Neto, Afonso. IV. Título.

CDD 23. : Plásticos 668.4

Elaborada por Tatiana Sambinelli CRB-8 SP-011003/O

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE MAUÁ

CARACTERIZAÇÃO E RECICLAGEM DE CARRETÉIS PLÁSTICOS DE INDÚSTRIA DE
CIRCUITOS ELETRÔNICOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado à FATEC Mauá como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnólogo em Polímeros.

Aprovação em:  / _____ / 2024

Orientador: Prof. Esp. Afonso Henriques Neto
FATEC Mauá

Avaliadora: Profa. Me. Gleisa Pitareli
FATEC Mauá

Avaliador: Prof. Dr. André Lúcio Grande
FATEC Mauá

DEDICATÓRIA

Erica Aparecida de Faria

Dedico essa conquista aos meus filhos. A Kimberly, que passou tantos apuros ainda na barriga e que com tão pouco tempo de vida me ensinou que posso ser paciente e forte para não desistir. Também ao Luiz Gustavo e Maria Fernanda, que mesmo com toda saudade do mundo eu sempre dizia “não vim até aqui para desistir agora”.

Essa conquista é nossa!

Gabriela Francisca do Carmo Silva

Dedico essa conquista ao meu esposo, Carlos Eduardo, pelo apoio constante e fundamental nos momentos difíceis. À minha mãe, Simone, que sempre me incentivou a ir além, e aos meus irmãos e minha sogra, Sandra, pelo apoio e inspiração. Minha profunda gratidão à amiga Erica, pela brilhante ideia do tema do nosso trabalho de conclusão de curso e pelo apoio essencial em cada etapa dessa jornada. Esta conquista é fruto do nosso esforço conjunto e do apoio mútuo que nos fortaleceu. Agradeço aos amigos e familiares que foram nossa base até o final.

Essa conquista é nossa!

João Pedro Fantoni

Dedico essa conquista à minha mãe, Maria, que sempre me apoiou nesse projeto e esteve ao meu lado em todos os momentos. Ela foi minha companheira que lutou muito por mim e, hoje, sou o que sou graças a ela. Dedico também ao meu pai, que é muito importante na minha vida. À minha irmã, Letícia, que me ajuda muito, sempre está ao meu lado e está seguindo uma carreira brilhante com um futuro promissor. À minha prima Ana Clara, que infelizmente veio a falecer após constantes paradas cardiorrespiratórias; que Deus a tenha, pois ela era como uma irmã para mim. Agradeço também às minhas amigas Gabriela e Érica, que acreditaram em mim e me deram a oportunidade de desenvolver este projeto, compartilhando um capítulo muito bonito de nossas vidas. Agradeço a Deus por me proporcionar este momento mágico, por me dar forças para não desistir e por me fazer persistir até o fim.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de iniciar expressando nossa profunda gratidão a Deus por nos guiar e abençoar durante toda a jornada do nosso curso de Polímeros. Em meio aos desafios da pandemia, a união e a solidariedade da nossa turma foram fundamentais para enfrentarmos os estudos online. Os momentos compartilhados durante os cafés fortaleceram nossos laços, tornando nossa sala um ambiente ainda mais unido e acolhedor.

Não podemos deixar de mencionar as valiosas aulas ministradas aos sábados pelo professor André Lúcio, que foram verdadeiramente inspiradoras. Também gostaríamos de expressar nossa profunda gratidão ao estimado amigo Luís Tomas, cujo apoio e conhecimento foram inestimáveis ao longo dessa jornada.

Agradecemos sinceramente a cada um dos nossos professores pela dedicação exemplar e pelo apoio incansável ao longo do processo de conclusão do nosso trabalho de fim de curso. Este período representou um dos desafios mais significativos em nossa trajetória acadêmica, e foi graças à colaboração e incentivo de todos que conseguimos superar os obstáculos e alcançar este marco importante.

Queremos estender um agradecimento especial ao nosso Orientador, Professor Afonso Henriques, por sua prontidão em abraçar o tema do nosso trabalho e por seu constante apoio e orientação ao longo do desenvolvimento do projeto. Suas palavras de sabedoria e paciência foram fundamentais para o nosso progresso.

Também desejamos expressar nossa gratidão ao Coordenador Antônio José de Moura Junior, bem como a Annalisa, da empresa Petropol, Renan, estudante do curso de Polímeros, e Jean, da empresa Letska, pela colaboração e suporte fornecidos em diferentes aspectos do nosso trabalho.

Por fim, somos imensamente gratos às aulas e orientações da professora Gleisa, que nos guiou com maestria durante suas aulas.

A todos que contribuíram de alguma forma para o sucesso deste trabalho, nosso mais sincero obrigado. Seu apoio e incentivo foram essenciais para a conclusão deste importante capítulo em nossas vidas acadêmicas.

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo sobre a "Caracterização e Reciclagem de Carretéis Plásticos de Indústria de Circuitos Eletrônicos". Nesse trabalho, abordamos a importância da reciclagem de materiais poliméricos, com foco no poliestireno (HIPS), que é amplamente utilizado na indústria de placas de circuitos eletrônicos. O trabalho destaca a problemática do descarte inadequado desses carretéis plásticos, apontando para os impactos ambientais e os desafios associados. Além disso, são discutidos os benefícios da reciclagem, como a redução de resíduos destinados aos aterros sanitários, a preservação dos recursos naturais, a economia de água e energia, a geração de empregos e a criação de uma economia circular. O estudo descreve detalhadamente o processo adotado, incluindo a coleta e preparação dos carretéis plásticos, a separação por cor, a lavagem, a moagem e a moldagem por injeção para a obtenção de corpos de prova. Além disso, são especificados os métodos utilizados para os ensaios mecânicos, como o teste de tração, ensaio de densidade e identificação da resina. A norma ISO 1043 é empregada para identificar os tipos de plásticos, enquanto a ASTM D 792/A é utilizada para o ensaio de densidade. O ensaio de tração é conduzido de acordo com a norma ISO 527, visando avaliar as propriedades mecânicas dos corpos de prova. O trabalho também aborda a importância da reciclagem terciária e quaternária, destacando os processos de despolimerização e reciclagem energética como alternativas viáveis para a gestão sustentável dos resíduos plásticos. Além disso, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios, como a densidade dos materiais, resistência à tração e a identificação das resinas utilizadas. O poliestireno demonstrou propriedades mecânicas satisfatórias para várias aplicações industriais. Sua resistência à tração, flexão e impacto o torna um material adequado para uso em uma ampla gama de produtos e componentes.

Palavras-chave: Caracterização; poliestireno; reciclagem; carretéis plásticos.

ABSTRACT

The present work presents a study on the "Characterization and Recycling of Plastic Reels from the Electronic Circuits Industry". In this work, we address the importance of recycling polymeric materials, focusing on polystyrene (HIPS), which is widely used in the electronic circuit board industry. The work highlights the problem of inappropriate disposal of these plastic spools, pointing to the environmental impacts and associated challenges. Furthermore, the benefits of recycling are discussed, such as reducing waste sent to landfills, preserving natural resources, saving water and energy, creating jobs and creating a circular economy. The study describes in detail the process adopted, including the collection and preparation of plastic spools, separation by color, washing, grinding and injection molding to obtain test specimens. In addition, the methods used for mechanical tests are specified, such as tensile testing, density testing and resin identification. The ISO 1043 standard is used to identify types of plastics, while ASTM D 792/A is used for density testing. The tensile test is conducted in accordance with the ISO 527 standard, aiming to evaluate the mechanical properties of the specimens. The work also addresses the importance of tertiary and quaternary recycling, highlighting depolymerization and energy recycling processes as viable alternatives for the sustainable management of plastic waste. In addition, the results obtained in the tests are presented, such as material density, tensile strength and identification of the resins used. Polystyrene has demonstrated satisfactory mechanical properties for various industrial applications. Its tensile, flexural and impact resistance makes it a suitable material for use in a wide range of products and components.

Keywords: description; polystyrene; recycling; plastic spools.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fórmula de estrutura Molecular do PS	18
Figura 2 - Classificação das cadeias poliméricas	20
Figura 3 - Representação da molécula do monômero estireno e a macromolécula do polímero poliestireno	21
Figura 4 - Esquema de obtenção de plásticos a partir do petróleo	22
Figura 5 - Molécula de Etileno para produção do Poliestireno	23
Figura 6 - Fórmula estrutural da molécula de estireno	23
Figura 7 - Gravimetria dos materiais recuperados em 2022 pelo sistema de logística reversa de embalagens em geral	28
Figura 8 - Fluxograma do processo de reciclagem mecânica	30
Figura 9 - Identificação e Simbologia de Resinas ABNT NBR 13230:2008	32
Figura 10 - Objetos fabricados com poliestireno	33
Figura 11 - Carretéis de PS	34
Figura 12 – Material Moído	35
Figura 13 – Injetora	36
Figura 14 – Corpos de Provas	37
Figura 15 - Ensaio de densidade	39
Figura 16 – Ensaio de tração	40
Figura 17 – Ensaio Índice de Fluidez	41
Figura 18 - Equipamento de ensaio Calorimetria Exploratória Diferencial – DSC	42
Figura 19 – Resultado Ensaio de DSC – PSAI preto	43
Figura 20 – Resultado Ensaio de DSC – PSAI branco	43
Figura 21 – Resultado Ensaio de DSC – PSAI azul	44
Figura 22 – Ensaio de Impacto, amostras entalhadas	45
Figura 23 – Corpos de prova pós ensaio de Impacto	47
Figura 24 – Resultado obtido para Índice de Fluidez – HIPS azul	48
Figura 25 – Resultado obtido para Índice de Fluidez – HIPS branco	48
Figura 26 – Resultado obtido para Índice de Fluidez – HIPS preto	49
Figura 27 – Resultado obtido para Índice de Fluidez – HIPS	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais características no processo de polimerização	24
Tabela 2: Características reológicas dos materiais	25
Tabela 3: Características do poliestireno (HIPS)	26
Tabela 4: Resultados obtidos para ensaios mecânicos	46
Tabela 5: Datasheet HIPS	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABREMA- Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
ABS – Acrilonitrila – butadieno - estireno
ASA – Acrilato de acrilonitrila estireno
ASTM – Sociedade Americana de Testes e Materiais
BASF – Badische Anilin und Sodafabrik
BR – Borracha
CBE - Companhia Brasileira de Estireno
CED - Calorimetria exploratória diferencial
CPs – Corpos de prova
DSC - Calorimetria Exploratória Diferencial
EDN – Estireno do Nordeste
EPA - Agência de Proteção Ambiental dos EUA
EPS – Poliestireno Expandido
GLP – Gás liquefeito de petróleo
GPPS – Poliestireno Cristal
HDPE – Polietileno de alta densidade
HIPS – Poliestireno de Alto Impacto
ISO – Organização Internacional de Normatização
LDPE – Polietileno de baixa densidade
MBS – Metilmetacrilato Butadieno Estireno
NBR – Norma Brasileira
NR (VULC) - Borracha natural vulcanizada
NR (CRUA) – Borracha natural crua
PA – Poliacetal
PC – Policarbonato
PE – Poliestireno
PEAD - Polietileno de alta densidade
PEBD – Polietileno de baixa densidade
PET – Associação Brasileira de Normas Técnicas

PHD – Processamento Homologação e Desenvolvimento

PMMA – Polimetacrilato

PP – Polipropileno

PS – Poliestireno

PVC – Policloreto de vinila

RSU – Resíduo Sólido Urbano

SAN – Estireno Acrilonitrila

Tg – Temperatura de transição vítrea

Tm – Temperatura de fusão cristalina

Sumário

DEDICATÓRIA.....	4
AGRADECIMENTOS.....	6
RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	9
LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	12
1 INTRODUÇÃO.....	16
2 Fundamentação teórica.....	18
2.1 <i>Poliestireno origem</i>	18
2.1.1 FORMULA MOLECULAR DO POLIESTIRENO (PS).....	19
2.1.2 POLÍMEROS.....	20
2.1.3 FONTE MATERIA PRIMA POLIESTIRENO.....	23
2.1.4 PROCESSOS DE OBTENÇÃO DO MONÔMERO ESTIRENO.....	24
2.1.5 PROCESSO DE PREPARAÇÃO DO POLÍMERO.....	25
2.1.6 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS POLÍMEROS.....	26
3 RECICLAGEM.....	28
3.1 TIPOS DE RECICLAGEM DE PLÁSTICOS.....	29
3.1.1 SEPARAÇÃO DOS RESÍDUOS PLÁSTICOS.....	32
4 BENEFÍCIOS DA RECICLAGEM.....	34
5 METODOLOGIA DE PESQUISA.....	35
5.1 <i>Materiais</i>	35
5.1.1 MÉTODOS.....	37
5.1.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIO.....	38
5.1.3 IDENTIFICAÇÃO DA RESINA.....	39
5.1.4 ENSAIO DE DENSIDADE.....	39
5.1.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA ATRAÇÃO.....	40
5.1.6 ENSAIO ÍNDICE DE FLUIDEZ.....	42
5.1.7 RESISTÊNCIA A FLEXÃO E MÓDULO DEFLEXÃO.....	42
5.1.8 ENSAIO DE CALORIMETRIA EXPLORATORIA DIFERENCIAL (DSC).....	43
5.1.9 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY.....	45
6 RESULTADOS.....	47

7 conclusões.....	51
REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

Todo material polimérico descartado de forma inadequada causa impacto ao meio ambiente. O Poliestireno (PS), é um polímero amplamente utilizado em diversas aplicações.

Carretéis de poliestireno são descartados diariamente em lixo comum por empresa de placas eletrônicas.

Ainda um dos maiores problemas do lixo na natureza é a contaminação dos oceanos, a mortandade de animais marinhos que pode levar a extinção de algumas espécies. Ainda que a etapa de maior impacto no ciclo de vida do Poliestireno (PS) é a produção das matérias primas, uma vez que o material é constituído de um polímero aromático formado a partir de monômeros de estireno, por ser uma pequena molécula formada por um único mero, as moléculas de monômeros de estireno se unem e formam as cadeias longas do poliestireno. Além disso, o poliestireno pode ter em sua produção aditivos, como o butadieno, que dá ao material diferentes propriedades. Para reduzir os efeitos negativos na produção do PS, é essencial a busca por alternativas mais sustentáveis em sua produção e descarte. Essas substâncias são classificadas pela EPA (Agência de Proteção Ambiental dos EUA) como prováveis cancerígenos humanos. Por não ser um produto biodegradável pode levar centenas de anos para se decompor no meio ambiente. Gerando poluição visual e até entupimento de bueiros causando enchentes em épocas de chuva.

Os potes descartados no meio ambiente podem acumular água de chuva, se tornando um criadouro para o mosquito da dengue, representando um sério problema de saúde pública. Uma das soluções para minimizar o impacto causado por este polímero ao meio ambiente é a reciclagem.

Os materiais de poliestireno são reciclados através da reciclagem mecânica, onde os resíduos plásticos são convertidos em grânulos que podem ser utilizados na produção de outros produtos.

Normalmente as empresas que reciclam o poliestireno após a coleta do material é feita a caracterização do mesmo por vias de ensaios de laboratório, que são classificadas de quatro formas ou tipos: Poliestireno de Alto Impacto (PSAI ou

HIPS), Cristal ou Standard (GPPS), Poliestireno Expandido (EPS) e Poliestireno resistente ao calor.

A maior preocupação é preservar o meio ambiente e destinar corretamente esse material para as indústrias de reciclagem, garantindo a disponibilidade de recursos naturais para as gerações futuras. Por ser um material limpo e de fácil reprocessamento, com um alto valor agregado. Visando os três pilares da sustentabilidade: econômico, ambiental e social.

A reciclagem evita a poluição ambiental, diminui a quantidade de resíduos nos aterros sanitários, gera empregos para a população não qualificada e incentiva a produção de produtos feitos com materiais reciclados, estimulando a concorrência nas empresas por ser gerar um produto de qualidade e menor valor agregado em seu processamento.

Para fomentar o problema dos carretéis de poliestireno descartados em lixo comum, ponderamos a possibilidade de coletar, caracterizar e reciclar esses carretéis, tendo em vista mitigar os impactos ambientais e viabilizar a sustentabilidade no ciclo de vida desse material.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

2.1 POLIESTIRENO ORIGEM

O poliestireno (PS) é polímero que é feito a partir de uma substância chamada estireno. O estireno pode ser encontrado no petróleo, mas também pode ser encontrado em plantas e frutas, e tem um cheiro doce. O estireno foi descoberto em 1839 por um farmacêutico alemão chamado Eduard Simon, que o destilou de uma resina vegetal e o chamou de "estírol". Mais tarde, em 1920, um químico alemão chamado Hermann Staudinger percebeu que a resina de Simon era composta por longas cadeias de estírol. Foi então que Staudinger criou o conceito de moléculas gigantes, chamando-as de "macromoléculas", e sugeriu que o PS era um agrupamento dessas cadeias de estireno com uma massa molecular alta.

A descoberta do estireno como um monômero é creditada a Newman, que em 1786 isolou o estireno através da destilação de uma resina sólida chamada "líquido âmbar", que era obtida de árvores nativas do Extremo Oriente e Califórnia.

Em 1930, na Alemanha, a IG Farben industrie foi a primeira a operar comercialmente com sucesso a produção de poliestireno em uma planta industrial. Nos Estados Unidos, a Dow Chemical Company foi a primeira a produzir poliestireno em escala comercial, em 1938, e hoje é líder no mercado de PS. No Brasil, foi em 1949, a inauguração da primeira fábrica de Poliestireno, a Bakol S.A., em São Paulo.

A partir de então, a produção comercial de poliestireno de alto impacto foi iniciada. Atualmente, no Brasil, a Dow é a maior produtora de poliestireno da América Latina, tendo inaugurado sua produção em 1973 no complexo industrial do Guarujá, em São Paulo. Em 1996, a Dow adquiriu a Estireno do Nordeste (EDN). A BASF, que possui plantas em operação na Bélgica, Espanha e Coréia, adquiriu uma fábrica de poliestireno em São Paulo e começou a comercializá-lo no país a partir de 1997.

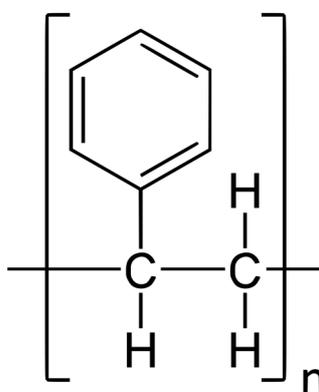
A Innova, localizada no Polo Petroquímico de Triunfo, começou a operar em 2000. A Videolar, em Manaus, que antes usava poliestireno como matéria-prima, inaugurou uma planta de produção em 2002. Em 2009, a CBE (Companhia Brasileira de Estireno), pertencente ao grupo Unigel, começou a operar com poliestireno.

2.1.1 FÓRMULA MOLECULAR DO POLIESTIRENO (PS)

O poliestireno é um material plástico feito a partir de uma substância chamada estireno. O estireno passa por um processo chamado polimerização, que pode ser feito de diferentes maneiras, como misturando-o em uma massa, em uma solução líquida, em suspensão ou emulsão.

O poliestireno é resultado da ligação entre os monômeros de estireno. Na polimerização, a ligação carbono-carbono pi (do grupo de vinilo) é quebrada e uma nova ligação carbono-carbono simples é formada, anexando um outro monômero de estireno para a cadeia. Essa nova ligação é muito mais forte do que a ligação anterior, tornando mais difícil de despolimerizar o poliestireno. Geralmente, são necessários alguns milhares de monômeros para uma cadeia de poliestireno, que lhe dá um peso molecular de 100.000 a 400.000, e uma densidade de 1050 kg/m³.

Figura 1 - Fórmula de estrutura Molecular do PS (n - número de unidades repetitivas)



Fonte: <https://vestibulares.estrategia.com/public/questoes/Considerere-formula155e459525/>

O poliestireno, ou isopor, como é conhecido no Brasil, é um polímero aromático sintético feito com o monômero de estireno, um líquido derivado da indústria petroquímica. O poliestireno pode ser rígido ou espumado, mas geralmente é usado na sua forma branca, dura e quebradiça. Levando em consideração seu peso, é uma resina muito barata, sendo bastante usada como uma eficiente barreira contra o oxigênio e vapor de água, tendo um ponto de fusão relativamente baixo. O poliestireno é um dos plásticos mais utilizados no mundo, sendo produzidas milhões

de toneladas anualmente. O poliestireno pode ser naturalmente transparente, mas geralmente é colorido com o uso de corantes.

2.1.2 POLÍMEROS

Polímeros são macromoléculas formadas a partir da reação entre moléculas menores, chamadas genericamente de monômeros, ligadas por meio de ligações covalentes. As reações que transformam as moléculas de monômero em polímero são chamadas de reações de polimerização e as unidades repetitivas ao longo das cadeias poliméricas, resultantes da incorporação dos monômeros, são chamadas de meros (MANO e MENDES, 1999).

A palavra polímero vem do grego, poly (muitas) e meros (partes), são moléculas muito grandes formadas pela conexão de muitas moléculas menores, denominadas monômeros.

Podemos classificar os polímeros quanto sua origem: naturais e os sintéticos. Os naturais sintetizados pela natureza como madeira, lã, seda, borracha natural, celulose, diamante, grafite entre outros, alguns podem ser submetidos a processos de modificação pelo homem através de reações químicas, os polímeros naturais passam a ser chamados de polímeros artificiais. Sendo o caso do acetato de celulose, nitrato de celulose etc. Polímeros sintéticos são sintetizados pelo homem. Exemplo: PE, PS, PVC, ácido poli fosfórico.

Quanto a solubilidade e fusibilidade do polímero, temos os termoplásticos que são os polímeros com a capacidade de amolecer e fluir quando sujeitos a um aumento de temperatura e pressão, tornando possível moldá-los e podem ser solubilizados em solventes compatíveis. Podem ser reprocessados, sem perder muitas propriedades. Esta alteração é uma transformação física, reversível.

Os termoplásticos podem ser: Amorfos (baixa resistência química; plastificam rápido; baixa resistência a tração; transparentes) ou semicristalinos (translúcidos ou opacos; excelente resistência química; alta resistência atração; alto ponto de fusão). Alguns exemplos de termoplásticos amorfos são: poliestireno (PS), policloreto de vinila (PVC), polimetil metacrilato (PMMA). Exemplos de termoplásticos semicristalinos: poli tereftalato de etileno (PET), polietileno (PE), poliamida (Náilon).

Os materiais termorrígidos, por sua vez, são insolúveis, infusíveis e não recicláveis por via mecânica, uma vez que não fundem reversivelmente quando submetidos a variação de temperatura. Na maior parte das vezes, isto se deve ao fato de as cadeias macromoleculares estarem unidas por meio de ligações cruzadas (CANEVAROLO, 2006).

Quanto ao tipo de cadeias temos as lineares: em que a cadeia polimérica é constituída apenas de uma cadeia principal. É formada pela polimerização de monômeros bifuncionais, podendo exigir a ajuda de catalisadores Estero específicos.

Cadeias ramificadas: da cadeia principal partem prolongamentos, que podem ser longos ou curtos, formados pelo mesmo mero que compõe a cadeia principal ou por um outro mero formando diferentes arquiteturas; sendo as principais arquiteturas, aleatória, radial e pente.

Cadeias com ligações cruzadas: as cadeias poliméricas estão ligadas entre si através de segmentos de cadeia unidos por forças primárias covalentes fortes. Em função da quantidade de ligações cruzadas médias por volume unitário, pode-se subdividir esta classificação em polímeros com baixa densidade de ligações cruzadas (exemplo: borracha vulcanizada) ou polímeros com alta densidade de ligações cruzadas (exemplo: baquelite). Estas ligações cruzadas amarram uma cadeia às outras impedindo seu livre deslizamento. Termofixos são inicialmente líquidos que, durante a formação das ligações cruzadas, passam pelo ponto de gel, região onde o líquido se torna extremamente viscoso e gradativamente endurece até tornar-se um sólido rígido.

Figura 2 - Classificação das cadeias poliméricas.

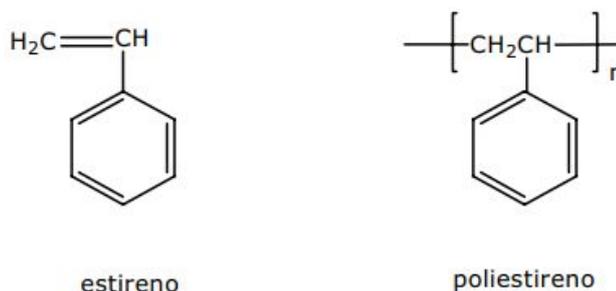


Fonte: CANEVAROLO Jr. Sebastião V. *Ciências dos Polímeros São Paulo: 2ª edição Artiber. 2006.*

Quanto ao método de preparação: O segundo tipo de classificação dos polímeros foi sugerido por Carothers em 1929. Divide-os em duas grandes classes: polímeros de adição e de condensação.

Polímeros de adição são aqueles em que, durante a sua formação (isto é, reação dos monômeros), não há perda de massa na forma de compostos de baixo peso molecular. Assumindo-se conversão total, o peso de polímero formado é igual ao peso de monômero adicionado. Normalmente, estes polímeros têm cadeia carbônica. Exemplos: PE, PP, PVC, PMMA etc. (CANEVAROLO,2006)

Figura 3 - Representação da molécula do monômero estireno e a macromolécula do polímero poliestireno.



Fonte: *internet.*

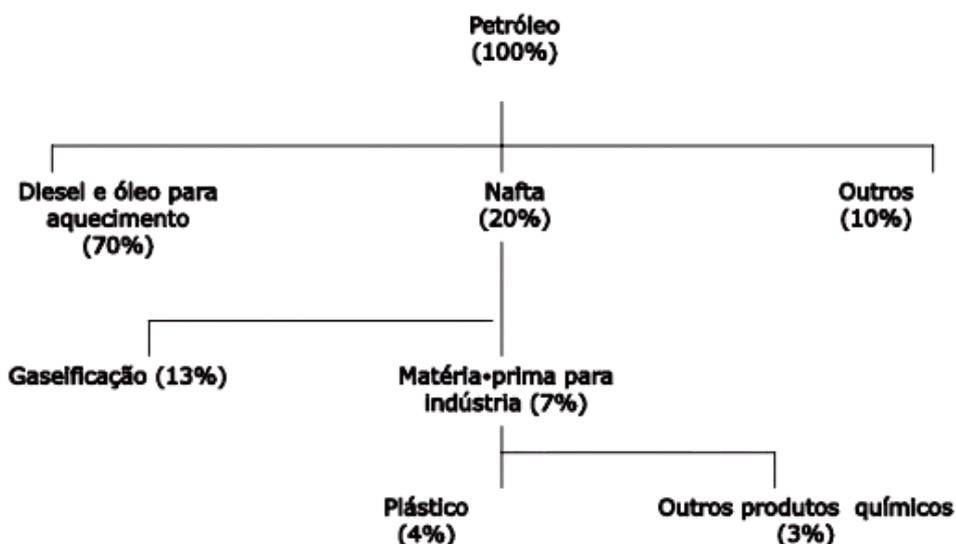
Polímeros de condensação são aqueles originários da reação de dois grupos funcionais reativos com a eliminação de moléculas de baixo peso molecular (água, amônio, HCl etc.). Como exemplo, podemos citar a polimerização do náilon 6,6 (hexametileno adipamida) em que há a condensação, em meio aquoso, do radical amina com o radical ácido dos materiais iniciais (hexametileno diamina e ácido adípico) formando uma ligação amida e eliminação de uma molécula de água. (CANEVAROLO,2006).

2.1.3 FONTE MATERIA PRIMA POLIESTIRENO

2.1.3.1 PETRÓLEO

De todos os produtos naturais, o petróleo é a fonte mais importante. Por meio da destilação fracionada do óleo cru, várias frações podem ser obtidas (GLP, nafta, gasolina, querosene, óleo Diesel, graxas parafínicas, óleos lubrificantes e, por fim, piche), sendo que a fração de interesse para polímeros é a nafta. Este, após um craking térmico apropriado (pirólise a aproximadamente 800°C e catálise), gera várias frações gasosas contendo moléculas saturadas e insaturadas. As moléculas insaturadas (etileno, propileno, butadieno, buteno, isobutileno, etc) são separadas e aproveitadas para a síntese de polímeros. (CANEVAROLO,2006).

Figura 4 - Esquema de obtenção de plásticos a partir do petróleo.



Fonte: <https://pt.slideshare.net/arceariane87/apresentao-plastico>

A fração nafta resultante do processo de craqueamento térmico (aquecimento na presença de catalisadores), dá origem a várias substâncias, entre elas, etileno, propileno, butadieno, buteno, isobutileno, denominados petroquímicos básicos.

Figura 5 - Molécula de Etileno para produção do Poliestireno.

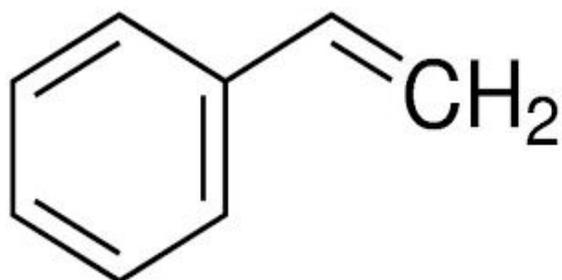
Etileno	→		→	PE e copolímeros
+ Cloro	→	Cloreto de vinila	→	PVC
+ Benzeno	→	Estireno	→	PS
+ Oxigênio	→	Óxido de etileno	→	Poliéteres e Poliésteres

Fonte: *Próprios autores.*

2.1.4 PROCESSOS DE OBTENÇÃO DO MONÔMERO ESTIRENO

O estireno é um hidrocarboneto aromático insaturado com aspecto de líquido oleoso incolor, que polimeriza com facilidade na presença de um iniciador. O estireno é amplamente utilizado na indústria petroquímica como solvente de resinas, além de ser a principal matéria-prima para a fabricação de polímeros estirênicos.

Figura 6 - Fórmula estrutural da molécula de estireno.



Fonte: *Internet.*

“Mais de 80% do estireno utilizado em todo o mundo é produzido industrialmente pela desidrogenação catalítica de etilbenzeno na presença de vapor d'água.” (MIRANDA,2016 p.15 apud ROSSETTI et al., 2005)

2.1.5 PROCESSO DE PREPARAÇÃO DO POLÍMERO

Tabela:1 Principais características no processo de polimerização.

CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE POLIMERIZAÇÃO		
Processo	Características	Exemplo
Poli adição	<ul style="list-style-type: none"> • Reação em cadeia, 3 componentes reacionais: iniciação, propagação e terminação. 	LDPE HDPE PP PS BR etc.
	<ul style="list-style-type: none"> • Mecanismo hemolítico ou heterolítico ou por coordenação 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Não há subprodutos da reação 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de reação rápida, com formação imediata de polímeros 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Concentração de monômero diminui progressivamente 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Grau de polimerização alto, da ordem de 10^3 	
Policondensação	<ul style="list-style-type: none"> • Reação em etapas 	PET PA PC PR etc.
	<ul style="list-style-type: none"> • Mecanismo heterolécito 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Há subprodutos da reação 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de reação lenta, sem formação imediata de polímeros 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Concentração de monômero diminui rapidamente 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Grau de polimerização médio, da ordem de 10^3 	

Fonte: MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. *Identificação de Plásticos, Borrachas e Fibras*. São Paulo: Editora Blucher, 2008.

2.1.6 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS POLÍMEROS

As propriedades tecnológicas dos polímeros, avaliadas em composições moldáveis de borrachas ou plásticos, ou em fibras, dependem da formulação e do processamento do material com que se fabricam os corpos de prova, que serão submetidos a ensaios específicos. A morfologia da massa moldada varia, para a mesma composição e equipamento, conforme a história térmica a que foi submetida, que afeta diretamente os resultados dos ensaios. Para a mesma composição moldável, essas variáveis determinam a transição entre o comportamento dúctil e o comportamento frágil, observados em muitos polímeros. Portanto, é de fundamental importância considerar sempre as condições de processamento usadas na moldagem das peças. (MANO, MENDES 2007)

Tabela 2: Características reológicas dos materiais.

Características reológicas gerais de alguns materiais de uso comum							
Material	Características reológicas						Observação
	Deformação predominante						
	Duração		Grau		Natureza		
	Temporária	Permanente	Elevado	Baixo	Elástica	Plástica	
AÇO	+	-	-	+	+	-	Dúctil
MADEIRA	-	+	-	+	+	-	Dúctil
VIDRO	+	-	-	+	+	-	Frágil
CERÂMICA	+	-	-	+	+	-	Frágil
NR (CRUA)	-	+	-	+	+	+	Borrachoso
NR (VULC.)	+	-	+	-	+	-	Borrachoso
LDPE	-	+	+	-	+	+	Borrachoso
PP	-	+	+	-	+	+	Dúctil
PS	-	+	-	+	+	+	Frágil
PMMA	-	+	-	+	+	+	Dúctil
PET	-	+	+	-	+	+	Dúctil
PR (RETIC.)	+	-	-	+	+	-	Dúctil

Fonte: MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. *Identificação de Plásticos, Borrachas e Fibras*. São Paulo: Editora Blucher, 2008.

De um modo geral, os materiais sólidos podem ser de imediato reconhecidos à temperatura ambiente pelas suas características de deformação antes da ruptura, através de sua duração (temporária ou permanente), grau (elevado ou baixo) e natureza (elástica ou plástica). A tabela 2 ilustra esses conceitos, pela apresentação de uma série de materiais bem conhecidos, poliméricos ou não, e suas características gerais reológicas, reconhecíveis de imediato pela tenacidade, fragilidade ou aspecto borrachoso, quantificadas de forma simples, vaga, tal como deverá ser a apreciação por uma pessoa sem formação especializada.

Tabela 3: Características do poliestireno (PS)

Peso Molecular	300.000
Densidade	1,05 – 1,06
Índice de refração	1,59
T_g 90° - 100°C	
Cristalinidade	Muito baixa
Termoplástico, incolor, transparente	

Fonte: MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. *Identificação de Plásticos, Borrachas e Fibras*. São Paulo: Editora Blucher, 2008.

Propriedades marcantes: rigidez; semelhança ao vidro; alta resistência química; baixa resistência a solventes orgânicos; baixa resistência às intempéries; menor custo. Aplicações típicas: utensílios domésticos rígidos, transparentes ou não, de uso generalizado; brinquedos; escovas; embalagens rígidas para cosméticos. Sob a forma celular, no isolamento ao frio, na embalagem de equipamentos, em pranchas flutuadoras.

Copolímeros industriais do estireno:

- Copolímeros de estireno e butadieno (HIPS);
- Copolímero de estireno e acrilonitrila (SAN);

- Copolímero de estireno, acrilonitrila e butadieno (ABS);
- Copolímero de estireno, butadieno e metacrilato de metila (MBS);
- Copolímero de estireno, butadieno, acrilonitrila e acrilato de alquila (ASA).

(ZANIN e MANCINI, 2009)

3 RECICLAGEM

Reciclar é um processo essencial que implica na reutilização de materiais descartados, a fim de reintegrá-los à cadeia produtiva, promovendo sua valorização e reutilização. O principal objetivo dessa prática é preservar os recursos naturais e melhorar a qualidade de vida das comunidades, reduzindo o impacto ambiental e promovendo o desenvolvimento sustentável.

Plásticos são artefatos fabricados a partir de resinas sintéticas, conhecidos como polímeros, derivados do petróleo. O grande desafio enfrentado atualmente com relação à disposição final do plástico, encontra-se no fato de sua resistência à biodegradação, devido principalmente à sua natureza química. Uma das soluções que vem ganhando apoio de grande número de entidades envolvidas com a gestão ambiental refere-se ao reaproveitamento do plástico descartado no lixo urbano. (GRIPPI S., 2001)

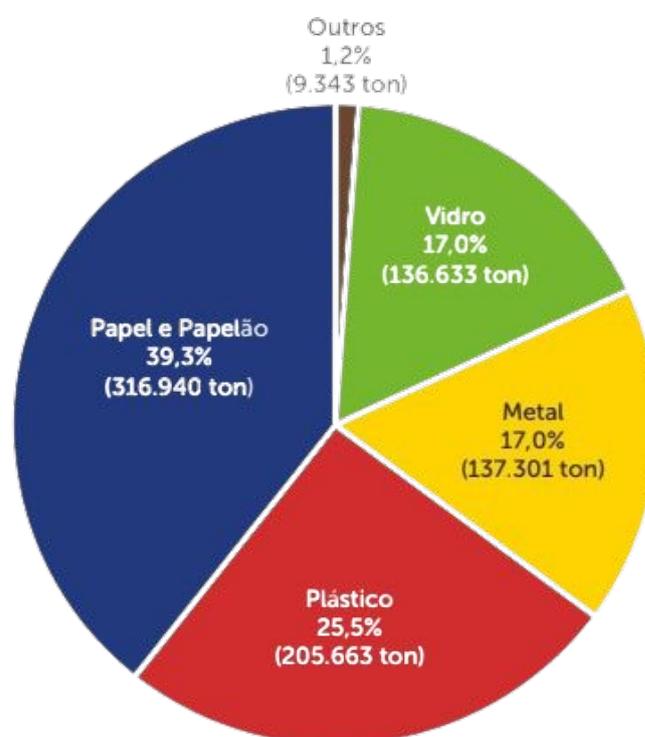
Reciclagem é o resultado de uma série de atividades através das quais materiais que se tornariam lixo, ou estão no lixo, são desviados, sendo coletados, separados e processados para utilizados como matéria-prima na manufatura de outros bens, feitos anteriormente apenas com matéria-prima virgem. Os benefícios da reciclagem são:

- Diminuição da quantidade de lixo a ser desnecessariamente aterrado.
- Preservação dos recursos naturais.
- Economia proporcional de energia.
- Diminuição da poluição ambiental.
- Geração de empregos, diretos e indiretos. (GRIPPI S., 2001)

Conforme publicado pela ABREMA (Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente), em 2022 foram coletados 93% dos resíduos sólidos gerados no Brasil, o que corresponde a 71,7 milhões de toneladas. Dessas, 27,9 milhões foram enviadas para os mais de 3.000 lixões que se estima haver no país. Somados a essa quantidade, os 7% de resíduos não coletados, que equivalem a 5,3 milhões de toneladas, também foram lançados em locais de disposição incorreta. Com isso, estima-se que cerca de 33,3 milhões de toneladas de resíduos tiveram destinação ambientalmente inadequada no Brasil em 2022. Com relação à disposição final ambientalmente adequada, os índices estão quase estagnados: a porcentagem de RSU enviados para aterros sanitários passou de 60,5% em 2021 para 61,1% em 2022. Aliando esses números à baixa oferta de serviços de coleta seletiva porta a porta, o cenário atual de gestão de resíduos sólidos no Brasil revela um modelo de economia linear e ainda distante da universalização. ABREMA (Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, 2023)

Em 2022, a análise gravimétrica realizada pela ABREMA referente aos materiais recuperados revelou que as embalagens de papel e papelão representaram 39,3% do total. Depois, o plástico é encontrado com uma participação de 25,5%, seguido por metais e vidro, ambos com 17,0% cada. Adicionalmente, aproximadamente 1,2% do total de embalagens era composto por outros materiais recicláveis.

Figura 7 - Gravimetria dos materiais recuperados em 2022 pelo sistema de logística reversa de embalagens em geral



Fonte: Central de Custódia da Logística Reversa de Embalagens (2023). – Acesso 10/04/2024

3.1 TIPOS DE RECICLAGEM DE PLÁSTICOS

A Sociedade Americana de Ensaio de Materiais (ASTM, sigla em inglês) normalizou uma divisão dos tipos de reciclagem de plásticos, de modo a uniformizar os conceitos quanto ao tipo de reciclagem. Sendo elas:

1. Primária:

Quando a matéria-prima é de fonte absolutamente confiável e limpa, que são os resíduos da indústria de plásticos. O processo utilizado envolve seleção dos resíduos, moagem (material em flocos), lavagem, secagem e reprocessamento em equipamentos como injetoras e extrusoras. No caso de filmes plásticos, pode haver uma etapa extra de aglutinação, necessária para aumentar a densidade dos flocos. O produto é o material reciclado com propriedades semelhantes à resina virgem.

2. Secundária:

Quando a matéria-prima é de resíduos sólidos urbanos e o processo também se baseia em seleção, moagem, lavagem, secagem e reprocessamento, incluindo aglutinação, no caso de filmes. A matéria-prima da reciclagem secundária pode, eventualmente, ser um resíduo industrial, porém, por definição, o produto é um material reciclado com propriedades finais inferiores à resina virgem. (ZANIN e MANCINI, 2004).

3. Terciária:

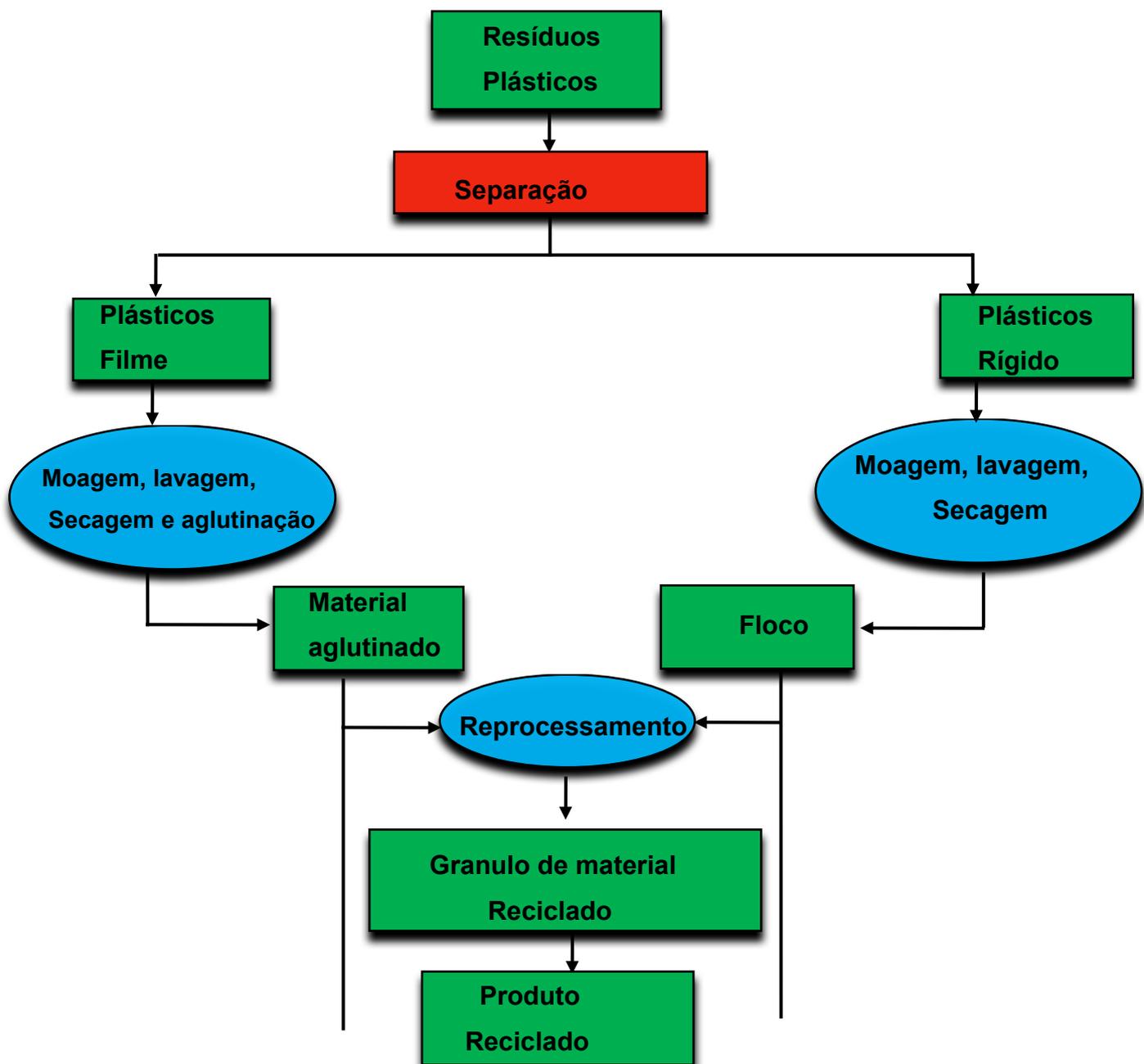
Quando o processo utilizado para reciclar o plástico tem por base a despolimerização, ou seja, por processo químico é promovida a decomposição química controlada do material, que posteriormente poderão ser submetidos a novos processos de polimerização.

4. Quaternária:

A reciclagem quaternária é a reciclagem energética, ou seja, a destruição do resíduo plástico por combustão, para obter energia térmica (Mano & Bonelli, 1995). A reciclagem quaternária se distingue da incineração porque, ao contrário desta última, utiliza resíduos plásticos como fonte de energia na produção de eletricidade, proporcionando um reaproveitamento energético dos materiais.

A incineração com recuperação de energia consiste na queima controlada das embalagens plásticas, recuperando o seu alto conteúdo calorífero, com vista à produção de energia elétrica. Os resíduos de plásticos apesar de não ultrapassarem 7 % da totalidade dos RSU, contribuem com 30 % da energia produzida pelos RSU, pois os plásticos possuem um valor energético comparável ao do petróleo e do carvão (Araújo 2006, *apud et al* Azapagic, et al., 2003).

Figura 8 - Fluxograma do processo de reciclagem mecânica





Fonte: GRIPPI, Sidney. *Lixo: Reciclagem e Sua História: Guia para as Prefeituras Brasileiras*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

Dentro da divisão da ASTM está embutida uma outra divisão que diz respeito ao processo de reciclagem que o plástico sofrerá, que divide a reciclagem de plásticos em:

5. Mecânica:

Quando o plástico passa por etapas de seleção de cor e tipo, moagem, lavagem, secagem, aglutinação e reprocessamento, originando os grânulos que podem ser utilizados na produção de novos materiais. Para melhorar as propriedades finais acrescenta-se aditivos.

6. Química:

Quando o plástico passa pela despolimerização visando à destruição da estrutura polimérica, inclusive da cadeia principal, servem de matéria-prima para a criação de produtos de elevada qualidade. Tem uma maior flexibilidade sobre a composição e é mais tolerante a impurezas, e não requer uma triagem tão minuciosa.

7. Energética:

Tecnologia que faz a reciclagem de plásticos por meio de sua transformação em energia térmica e elétrica, através da incineração, permitindo o aproveitamento do poder calorífico armazenado nos plásticos. Esse tipo de reciclagem permite também que os plásticos sejam aproveitados como combustível.

3.1.1 SEPARAÇÃO DOS RESÍDUOS PLÁSTICOS

Para a separação dos resíduos plásticos, são empregadas diversas metodologias, todas fundamentadas nas características dos próprios polímeros. Essa etapa é crucial, pois é necessário reduzir as impurezas a níveis inferiores a 1% (em massa). A presença de macro contaminantes, como vidro, papel, metal ou outros polímeros, mesmo em concentrações pequenas pode alterar as propriedades do polímero (Araújo, 2006 *et al* Andrady, 2003).

Conforme o método de coleta, as exigências do mercado e os custos de mão de obra, a separação dos polímeros pode ser conduzida manualmente ou de forma automatizada. A identificação dos tipos de polímeros é uma prática essencial para simplificar esse processo e é aplicada em vários segmentos da indústria de reciclagem de polímeros.

Para auxiliar na identificação dos distintos tipos de plástico, no Brasil, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) estabeleceu na Norma NBR 13.230 um sistema de rotulagem de produtos plásticos. Esse sistema é representado por um símbolo composto por três setas em sequência, indicando o tipo de plástico utilizado na fabricação do produto.

- PET = Poli (tereftalato de etileno)
- PEAD = Polietileno de alta densidade
- PVC = Poli (cloreto de vinila)
- PEBD = Polietileno de baixa densidade
- PP = Polipropileno
- PS = Poliestireno
- OUTROS

Figura 9 - Identificação e Simbologia de Resinas – ABNT NBR 13230:2008



Fonte: Mundo educação: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/alerta-para-uso-plasticos.htm>

4 BENEFÍCIOS DA RECICLAGEM

Um dos benefícios da reciclagem é auxiliar na diminuição do volume de resíduos destinados aos aterros sanitários, resultando em economia de água e energia, além de contribuir para a redução da poluição e a preservação dos recursos naturais.

Consequentemente, a reciclagem também reduz os custos relacionados à limpeza pública e promove a criação de empregos e geração de renda por meio da doação de materiais recicláveis para cooperativas.

Apesar de o Brasil possuir um território grande o bastante, chegará um tempo em que não haverá local disponível para efetuar a deposição dos rejeitos. Uma das saídas será investir na reciclagem. (Araújo, 2006 apud *et al* Calderoni, 1999).

O petróleo é uma fonte de energia e matéria-prima que enfrenta o desafio da escassez. A prática da reciclagem desempenha um papel crucial na redução do uso desse recurso, uma vez que, durante o processo de fabricação de um produto, uma parte do material virgem é substituída por material reciclado.

Figura 10- Objetos fabricados com poliestireno



Fonte: <https://www.zonaplastica.com/poliestireno/>

5 METODOLOGIA DE PESQUISA

5.1 MATERIAIS

A indústria de placas de circuitos eletrônicos sediada em Ribeirão Pires enfrenta diariamente o desafio do descarte inadequado dos carretéis plásticos que recebem como embalagem para os componentes eletrônicos. Grande parte desses carretéis são feitos de Poliestireno (PS), representando uma parcela significativa dos resíduos gerados pela empresa. Diante da falta de um destino apropriado para o descarte desse material, identificamos uma oportunidade de investigar a viabilidade de reciclagem.

Com autorização do proprietário da empresa, coletamos e pesamos 30 kg desses carretéis plásticos. Em seguida, procedemos à separação por cor e à limpeza, removendo etiquetas com uma espátula de aço e resíduos de cola com óleo de amêndoas e esponja abrasiva doméstica. Posteriormente, realizamos a lavagem com detergente neutro e secagem com flanela. Os carretéis foram então enviados para uma empresa especializada para serem moídos e transformados em grânulos, que serão utilizados na produção de corpos de prova por injeção.

Este estudo visa contribuir para a gestão sustentável dos resíduos gerados pela indústria, além de explorar alternativas para a reciclagem de materiais plásticos, promovendo práticas ambientalmente responsáveis e reduzindo o impacto negativo no meio ambiente.

Figura 11- Carretéis de PS



Fonte: *Próprios autores.*

Após o processo de moagem, os carretéis de poliestireno foram transformados em grânulos. Esses grânulos foram encaminhados para uma empresa terceirizada especializada, onde foram submetidos ao processo de moldagem por injeção. Esse procedimento foi realizado com o objetivo de preparar os corpos de prova necessários para a realização de ensaios mecânicos e outras caracterizações relevantes para a pesquisa em questão.

Essa etapa é crucial para garantir a qualidade e a padronização dos corpos de prova, permitindo uma análise precisa e confiável dos materiais estudados. Foram utilizadas três cores (branco, azul e preto) de amostras de Poliestireno de Alto Impacto nos ensaios

Figura 12 – Material Moído



Fonte: Imagens da Empresa Letska

Para ensaios foram obtidos corpos de prova através de moldagem por injeção utilizando uma injetora Pavan Zanetti modelo TRX- 100 com capacidade de 100 toneladas.

Figura 13 - Injetora



Fonte: Site da Empresa Opera Trix.

5.1.1 MÉTODOS

Este estudo foi conduzido seguindo os procedimentos descritos nas normas relevantes para cada ensaio mecânico realizado.

Para a realização dos ensaios e preparação dos corpos de prova, adotou-se o método preconizado pelas normas ASTM e ISO:

ISO1043 - Plásticos — Símbolos e termos abreviados;

ASTM D792/A - Métodos de teste padrão para densidade e gravidade específica (densidade relativa) de plásticos por deslocamento;

ISO 527 – Ensaio de tração em plásticos;

ISO 528 – Alongamento na ruptura;

ISO 529 – Módulo de tração;

ISO 179 – Resistência ao impacto e ao impacto com entalhe conforme Charpy;

ISO 178 – Resistência a flexão;

ASTM D3418 - Método de teste padrão para temperaturas de transição de polímeros por calorimetria de varredura diferencial;

Os resultados obtidos foram analisados com base nos parâmetros normativos pertinentes, garantindo coerência.

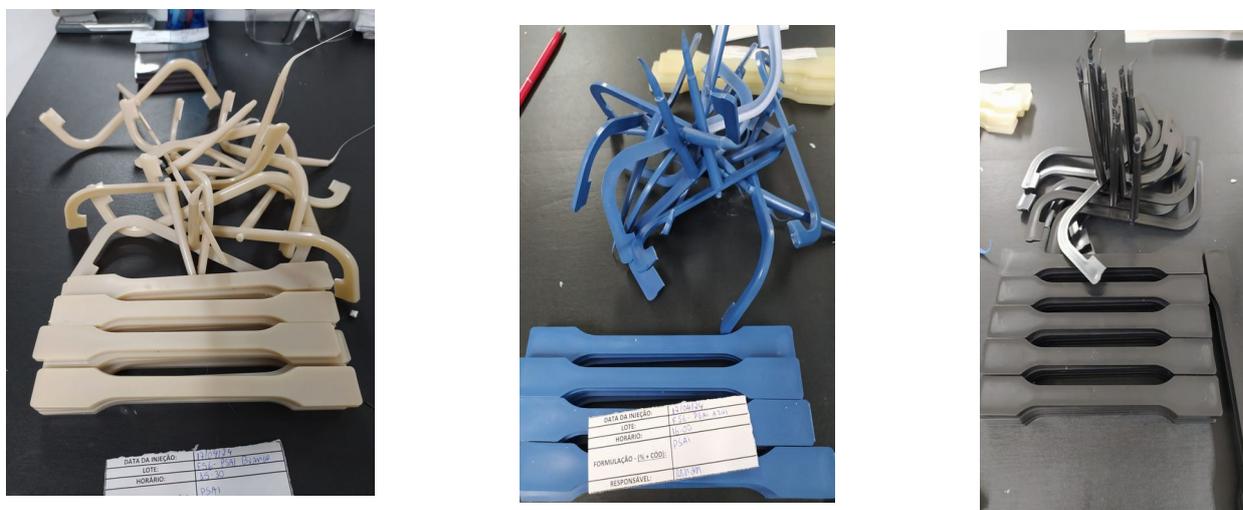
5.1.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIO

Os corpos de prova (CPs) para o ensaio de tração foram fabricados com uma geometria retangular, seguindo as especificações da norma ISO 527-1/-2

Para garantir a máxima homogeneização, os CPs foram produzidos por moldagem por injeção a uma temperatura de 185°C a 200°C, tempo de resfriamento de 16 s e tempo total de ciclo de 26 s. A irregularidade dos “chips” de material moído dificultou um pouco a injeção dos CPs sobretudo no PSAI Branco.

Posteriormente, para o ensaio de tração, as dimensões dos CPs foram medidas utilizando um paquímetro analógico com uma precisão de 0,01mm. Foram registradas as medidas de comprimento, largura e espessura dos CPs, garantindo a conformidade com os padrões exigidos para o teste de tração.

Figura 14 – Corpos de provas



Fonte: Imagens da Empresa Petropol.

5.1.3 IDENTIFICAÇÃO DA RESINA

Utilizamos teste de chama para identificação da resina. Esse teste consiste na queima do material polimérico em uma chama, sendo feitas observações sobre o comportamento da chama. Cada tipo de material apresenta comportamento específico quando queimados.

Há possibilidade de não ocorrer a queima, ou a combustão ser difícil sendo extinta quando retirado da chama, ou ocorrer a combustão na chama, mas não fora, ou ainda a combustão ser rápida, continuando mesmo fora da chama. Além disso, é possível verificar algumas propriedades da chama, como por exemplo, sua coloração, presença ou não de fuligem e o odor emanado.

Com base nas características observadas é possível identificar o tipo de material polimérico que está sendo testado.

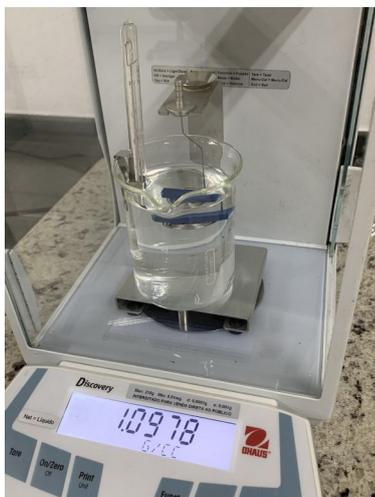
Fizemos uso da norma ISO 1043, que define termos abreviados para os polímeros básicos utilizados em plásticos, símbolos para componentes destes termos e símbolos para características especiais dos plásticos.

Nela inclui apenas aqueles termos abreviados que passaram a ser de uso estabelecido e seu objetivo é prevenir a ocorrência de mais de um termo abreviado para um determinado plástico e para evitar que um determinado termo abreviado seja interpretado em mais de uma maneira.

5.1.4 ENSAIO DE DENSIDADE

Seguimos as normas da ASTM D 792/A, para ensaio de densidade, no método de medição de volume por deslocamento, onde a aferição da densidade através do volume deslocado é um método eficaz e simples, podendo ser utilizado para polímeros com diferentes geometrias, tanto em sua forma sólida quanto plastificada. O método consiste em pesar a amostra no ar e posteriormente submergir a amostra em um recipiente com um fluido à temperatura de 23°C. A densidade é então calculada pelo equipamento.

Figura 15- Ensaio de densidade



Fonte: *Imagens da Empresa Petropol.*

5.1.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO

O Ensaio de tração é amplamente empregado para obter informações cruciais sobre a resistência dos materiais, bem como para verificar a conformidade de materiais por meio da comparação das propriedades determinadas no ensaio com os requisitos estabelecidos em projeto. Durante o ensaio, uma carga uniaxial crescente é aplicada a um corpo de prova específico, enquanto são registradas as variações no comprimento.

O ensaio de tração é utilizado para determinar a curva Tensão x Deformação e medir as propriedades de Resistência à Tração, Módulo de Elasticidade, Tensão no Escoamento, Tensão na Ruptura, Deformação no Escoamento, Deformação na Ruptura etc.

Conforme descrito na norma ISO 527, o ensaio de tração uniaxial e flexão em três apoios foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaios EMIC DL 3000. Para tração adotou-se a norma ASTM D 638 com velocidade de afastamento de 10 mm/min. O teste de flexão em três apoios foi realizado conforme ASTM D 790, com 64 mm de distância entre os apoios e taxa de deformação de 1,6 mm/min.

O objetivo do ensaio foi avaliar a qualidade dos corpos de prova e identificar a região de comportamento elástico e viscoelástico dos materiais, conforme mencionado por RIBEIRO, 2009. Durante o ensaio, foram determinados os valores do módulo a partir da porção linear da curva de tensão versus deformação. Esta abordagem permite uma análise mais precisa das propriedades mecânicas dos materiais, especialmente em relação à sua capacidade de resistir a forças externas e deformações.

Figura 16 – Ensaio de tração

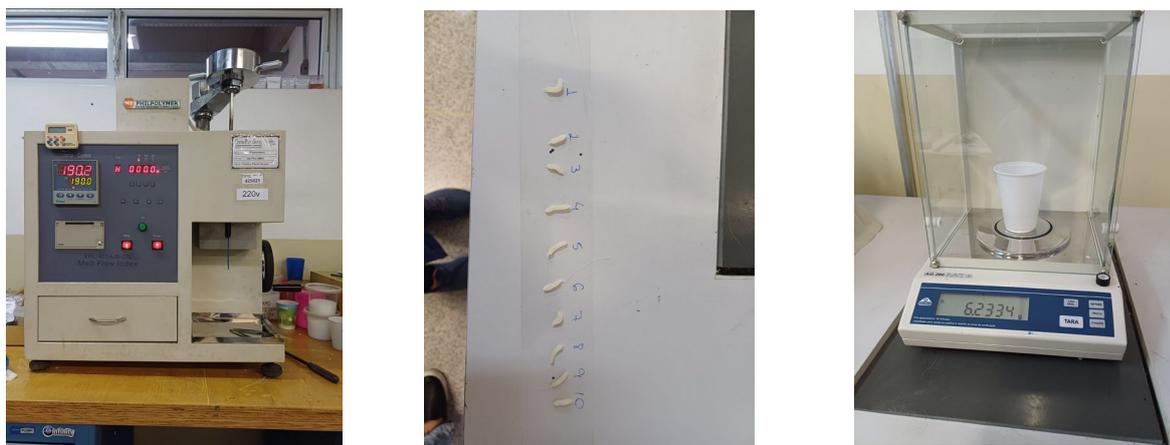


Fonte: *Imagens da Empresa Petropol.*

5.1.6 ENSAIO ÍNDICE DE FLUIDEZ

O índice de fluidez foi determinado conforme ASTM D 1238, na condição de 190 °C/5 kg, em um plastômetro marca HZ POLYMER, modelo Melt Flow Index, os ensaios foram feitos no laboratório da Fatec Mauá.

Figura 17 – Ensaio Índice de Fluidez



Fonte: *Laboratório de Polímeros Fatec Mauá.*

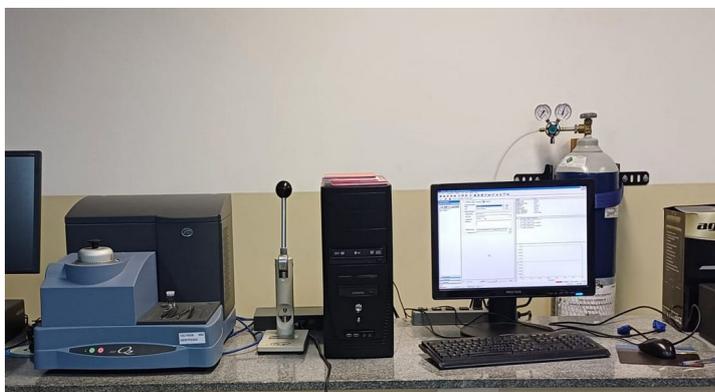
5.1.7 RESISTÊNCIA A FLEXÃO

O ensaio de flexão é utilizado para determinar as propriedades de Resistência à Flexão, Módulo de Elasticidade, Deformação sob Flexão etc. Essas propriedades são importantes para o controle de qualidade e para avaliar o desempenho dos materiais plásticos quando submetidos a uma carga de flexão. O ensaio pode ser realizado tanto em temperatura ambiente, quanto nas condições de temperaturas elevadas ou negativas. Seguimos a Norma ISO178 para o ensaio de flexão em uma Máquina Universal de Ensaio EMIC DL 3000 com velocidade de 2mm/min.

5.1.8 ENSAIO DE CALORIMETRIA EXPLORATORIA DIFERENCIAL (DSC)

Os ensaios de calorimetria exploratória diferencial (CED) foram realizados em um equipamento DSC-Q20 da marca TA Instruments, seguindo a norma ASTM D3418. A taxa de aquecimento foi de 20 °C/min, em dois ciclos de aquecimento. O primeiro aquecimento foi efetuado da temperatura ambiente até 200 °C, mantendo-se cada amostra nesta temperatura por 10 minutos. Os eventos térmicos das amostras ensaiadas foram determinados no segundo aquecimento, que foi realizado na faixa de temperatura de 40 a 250 °C.

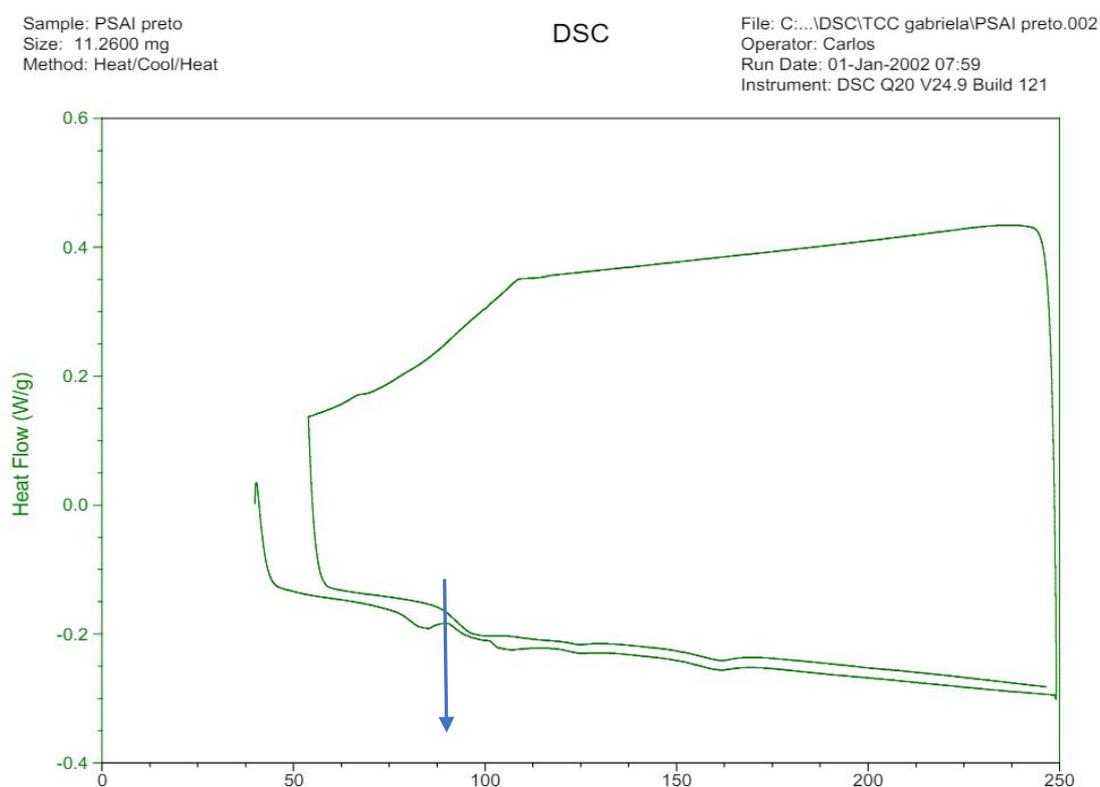
Figura 18 - Equipamento de ensaio Calorimetria Exploratória Diferencial – DSC



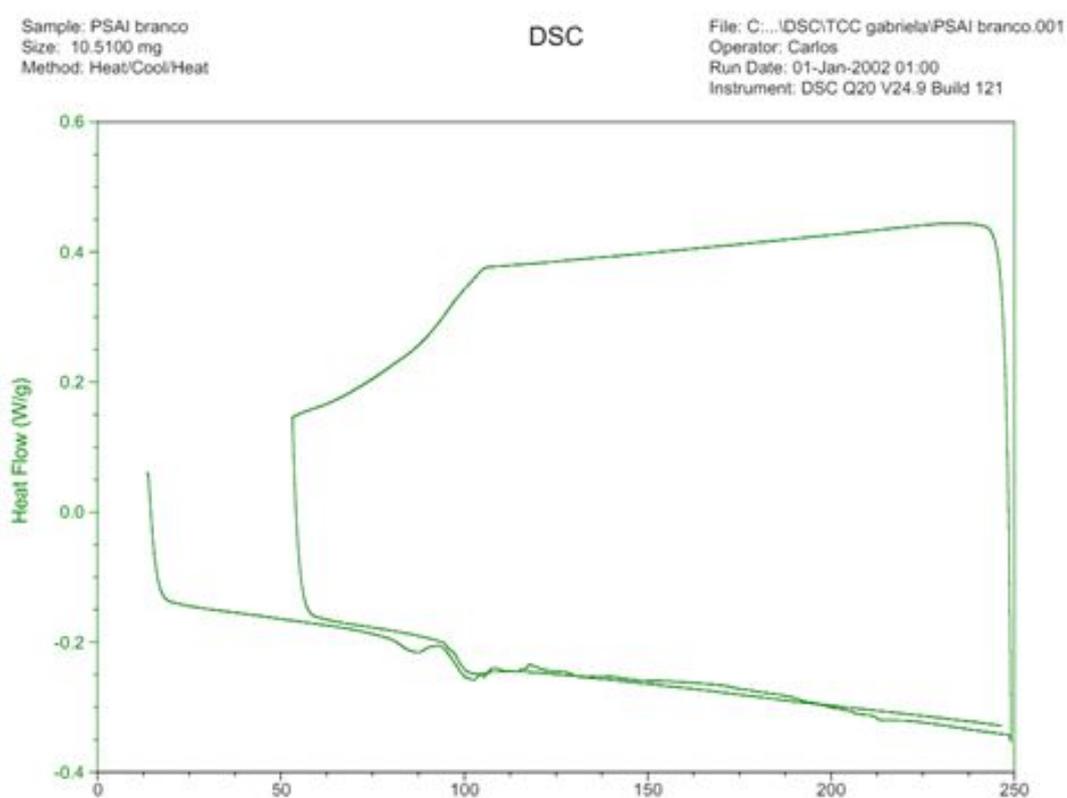
Fonte: Laboratório de Caracterização da Fatec Mauá

A calorimetria diferencial de varredura é uma técnica amplamente utilizada para estudar as transições térmicas e as propriedades térmicas dos materiais poliméricos, fornecendo informações valiosas sobre seu comportamento térmico.

Os ensaios de DSC foram realizados em um analisador térmico com atmosfera controlada, seguindo as diretrizes e padrões recomendados para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados. O poliestireno foi aquecido a uma taxa constante em uma faixa de temperatura específica, enquanto as mudanças de calor foram registradas.

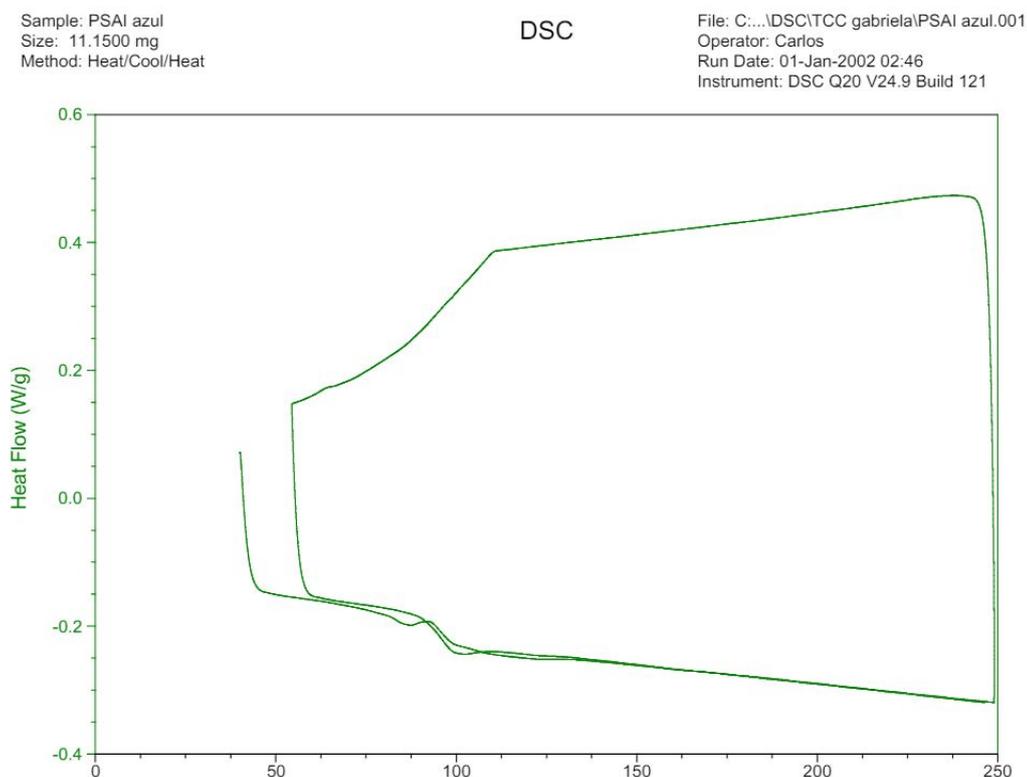
Figura 19 – Resultado Ensaio de DSC – PSAI preto

Fonte: Laboratório de Caracterização da Fatec Mauá

Figura 20 – Resultado Ensaio de DSC – PSAI branco

Fonte: *Laboratório de Caracterização da Fatec Mauá*

Figura 21 – Resultado Ensaio de DSC – PSAI azul



Fonte: *Laboratório de Caracterização da Fatec Mauá*.

5.1.9 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

O ensaio de Impacto Charpy com entalhe foi realizado adotando-se a norma ISO 179. O ensaio é realizado em pêndulo de impacto. O corpo de prova é fixado num suporte, na base da máquina. O martelo do pêndulo com uma borda de aço endurecido de raio específico é liberado de uma altura pré-definida, causando a ruptura do corpo de prova pelo efeito da carga instantânea. A altura de elevação do martelo após o impacto dá a medida da energia absorvida pelo corpo de prova. No ensaio Charpy o corpo de prova é bi apoiado como uma viga simples, com um entalhe central. O corpo de prova é posicionado de forma que o entalhe fique na face oposta à face de impacto. O posicionamento do entalhe é tal que o impacto ocorre na região de maior tensão a seção transversal média do corpo de prova

Figura 22 – Ensaio de Impacto, amostras entalhadas.



Fonte: *Imagens da Empresa Petropol.*

6 RESULTADOS

Tabela 4: Resultados obtidos para ensaios mecânicos

Análises	Método	Unidade	Resultados		
			PSAI BRANCO	PSAI PRETO	PSAI AZUL
IDENTIFICAÇÃO DA RESINA/ RESIN ID	ISO 1043		PSAI	PSAI	PSAI
DENSIDADE/ DENSITY	ASTM D 792/A	g/cm ³	1,03	1,06	1,10
RESISTENCIA A TRAÇÃO/ TENSILE STRENGTH	ISO 527	MPa	25,16	26,77	21,49
ALONGAMENTO NA RUPTURA/ ELONGATION AT BREAK	ISO 528	%	39,87	21,20	26,43
MÓDULO DE TRAÇÃO/TENSILE MODULUS	ISO 529	MPa	1470,00	1774,00	1654,00
IMPACTO CHARPY C/ ENTALHE NOTCHED CHARPY IMPACT	ISO 179	Kj/m ²	7,98	4,51	4,41
RESISTÊNCIA A FLEXÃO/ FLEXURAL STRENGTH	ISO 178	MPa	46,1	50,44	43,22
MÓDULO DE FLEXÃO/ FLEXURAL MODULUS	ISO 178	MPa	2170,00	2446,00	2278,00

Fonte: *Laboratório PHD Petropol.*

Tabela 5: Datasheet Poliestireno de Alto Impacto

Property, Test Condition	Standard	Unit	Values
Rheological Properties			
Melt Volume Rate, 200 °C/5 kg	ISO 1133	cm ³ /10 min	5.5
Mechanical Properties			
Izod Notched Impact Strength, 23 °C	ISO 180/A	kJ/m ²	10
Charpy Notched Impact Strength, 23° C	ISO 179	kJ/m ²	13
Charpy Unnotched, 23° C	ISO 179	kJ/m ²	120
Charpy Unnotched, -30° C	ISO 179	kJ/m ²	70
Tensile Stress at Yield, 23° C	ISO 527	MPa	30
Tensile Strain at Yield, 23° C	ISO 527	%	1.6
Tensile Strain at Break, 23° C	ISO 527	%	30
Tensile Modulus	ISO 527	MPa	2050
Elongation at Break (MD)	ISO 527	%	-
Flexural Strength	ISO 178	MPa	44
Flexural Modulus	ISO 178	MPa	2100
Hardness, Ball Indentation	ISO 2039-1	MPa	83
Thermal Properties			
Vicat Softening Temperature VST/B/50 (50N, 50°C/h)	ISO 306	°C	90
Vicat Softening Temperature, VST/A/50 (10N, 50°C/h)	ISO 306	°C	98

Fonte: *INEOS styrolutions.*

Relatório:

O presente relatório descreve os resultados obtidos a partir de ensaios mecânicos realizados no poliestireno. O poliestireno é um polímero amplamente utilizado devido às suas propriedades físicas e químicas versáteis, e compreender seu comportamento mecânico é crucial em várias aplicações industriais.

Os ensaios mecânicos foram conduzidos de acordo com os padrões ISO (527; 528; 529; 179; 178) para garantir a precisão e consistência dos resultados. Foram realizados ensaios de tração, flexão e impacto para avaliar diferentes aspectos do comportamento mecânico do poliestireno.

Os resultados dos ensaios de tração indicam uma resistência significativa do poliestireno, com uma força máxima de 25,16 MPa (branco); 26,77 MPa (preto); 21,49 MPa (azul) e um módulo de elasticidade de 1470,00; 1774,00; 1654,00 Mpa nas cores dos materiais respectivos (branco; preto; azul), demonstrando sua capacidade de suportar cargas antes da ruptura.

Os ensaios de flexão revelaram uma resistência à flexão de 46,1 MPa (branco); 50,44 MPa (preto); 43,22 MPa (azul), sugerindo uma boa capacidade de resistir a forças aplicadas perpendicularmente à superfície. Além disso, o ensaio de impacto mostrou uma energia de impacto de 7,98 KJ/m² (branco); 4,51 KJ/m² (preto); 4,41KJ/m² (azul), indicando a capacidade de absorção de energia do material.

Figura 23 – Corpos de prova pós ensaio de Impacto

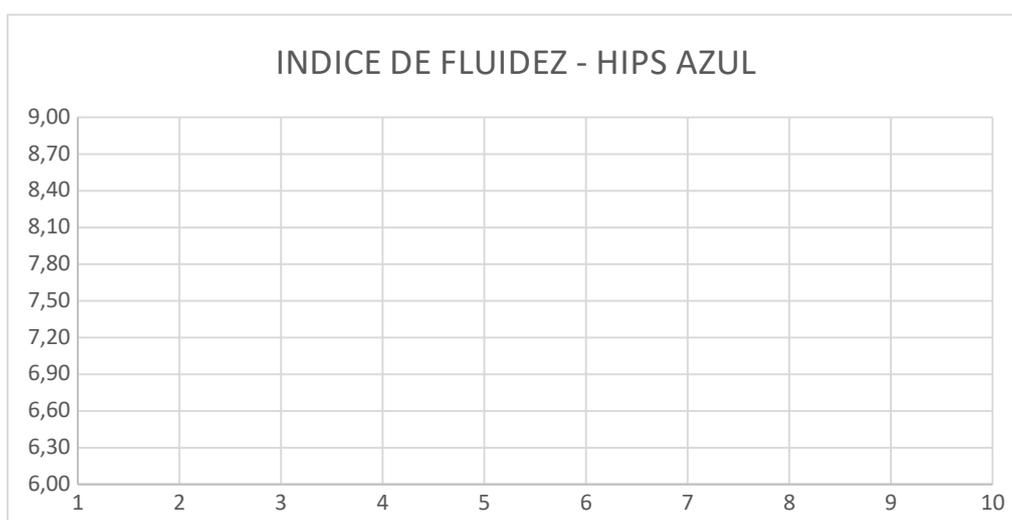


Fonte: *Imagens da Empresa Petropol.*

Os ensaios de índice de fluidez foram realizados de acordo com os padrões ASTM D1238 para garantir a precisão e reprodutibilidade dos resultados.

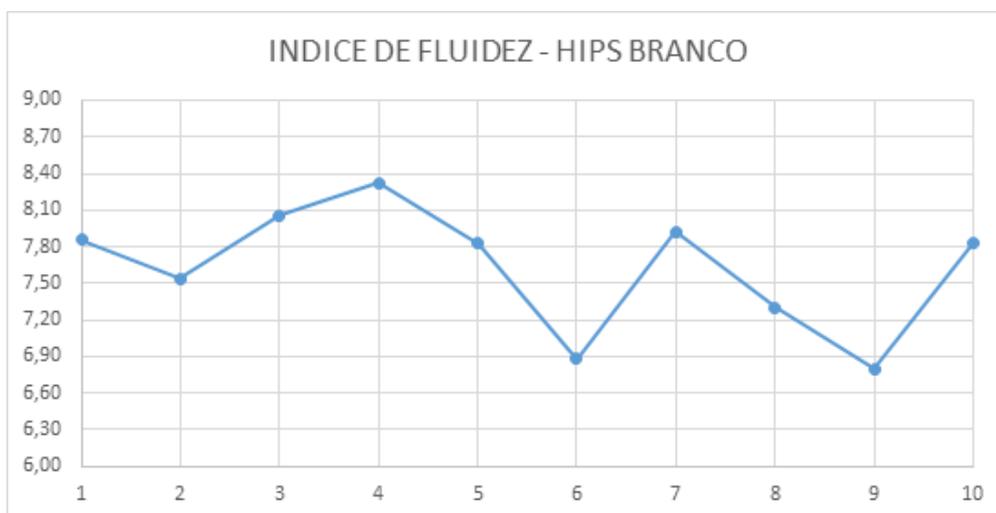
Os resultados dos ensaios de índice de fluidez do poliestireno indicam uma medida da capacidade de processamento do material sob condições específicas de temperatura e carga. O ensaio foi feito à 190°C /5Kg. O MFR (índice de fluidez em massa) fornece informações complementares sobre a fluidez do polímero e são úteis para diferentes aplicações industriais.

Figura 24 – Resultado obtido para Índice de Fluidez – HIPS azul



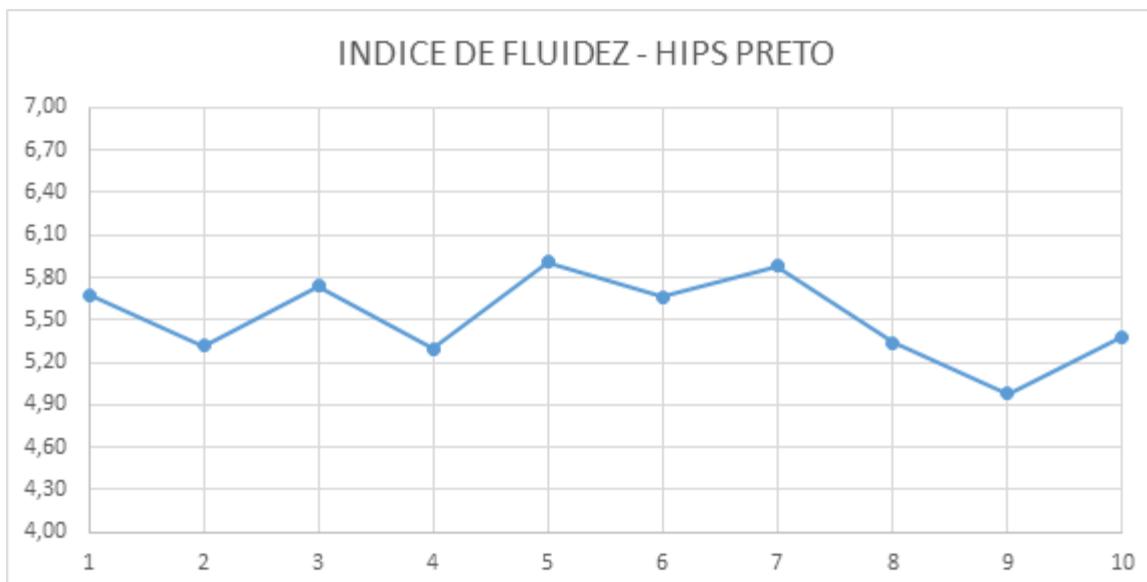
Fonte: *Laboratório de Caracterização Fatec Mauá.*

Figura 25 – Resultado obtido para Índice de Fluidez – HIPS branco



Fonte: *Laboratório de Caracterização Fatec Mauá.*

Figura 26– Resultado obtido para Índice de Fluidez – HIPS preto



Fonte: Laboratório de Caracterização Fatec Mauá.

BRANCO	AZUL	PRETO
7,6 ± 1,5	7,8 ± 1,2	5,5 ± 0,9
Média ± 3 Desvios Padrão		

Figura 27– Resultado obtido para Índice de Fluidez – HIPS

MATERIAL POLIESTIRENO BRANCO		MATERIAL POLIESTIRENO AZUL		MATERIAL POLIESTIRENO PRETO	
PESO (g)	MFI (g/10')	PESO (g)	MFI (g/10')	PESO (g)	MFI (g/10')
0,1965	7,86	0,2080	8,32	0,1420	5,68
0,1885	7,54	0,2035	8,14	0,1330	5,32
0,2015	8,06	0,1803	7,21	0,1435	5,74
0,2080	8,32	0,2010	8,04	0,1324	5,30
0,1957	7,83	0,2050	8,20	0,1477	5,91
0,1720	6,88	0,1848	7,39	0,1415	5,66
0,1980	7,92	0,1860	7,44	0,1470	5,88
0,1825	7,30	0,1969	7,88	0,1335	5,34
0,1700	6,80	0,1980	7,92	0,1245	4,98
0,1957	7,83	0,1965	7,86	0,1345	5,38
MÉDIA	7,63	MÉDIA	7,84	MÉDIA	5,52
Desv.Pad.	0,50	Desv.Pad.	0,37	Desv.Pad.	0,30

Fonte: Próprios autores.

7 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, podemos concluir que o poliestireno demonstrou propriedades mecânicas satisfatórias para várias aplicações industriais. Sua resistência à tração, flexão e impacto o torna um material adequado para uso em uma ampla gama de produtos e componentes.

Assim como também podemos concluir que o poliestireno demonstrou um índice de fluidez adequado para várias aplicações de processamento, como moldagem por injeção. A capacidade do poliestireno de fluir de forma consistente e previsível sob condições específicas é essencial para garantir a qualidade e a eficiência dos processos de fabricação.

REFERÊNCIAS

A.D. Jenkins - "Polymer Science", North Holland, London, 1972.

A.D. Jenkins - "Progress in Polymer Science", Pergamon, Oxford, 1970.

ABREMA: Apresenta informações sobre um panorama dos resíduos sólidos no Brasil em 2023, disponível em:

https://abespb.com.br/wp-content/uploads/2023/12/Panorama_residuos_BR_2022
acessado: 06/04/2024.

ALBUQUERQUE, Jorge A. C. Planeta Plástico. 1ª ed. Porto Alegre: Editora Sagra Luzatto, 2001.

ARAUJO, Marcus André Rego. Avaliação de desempenho de artefato de poliestireno de alto impacto reciclado / Marcus André Rego Araujo. 2006. Universidade do Estado do Rio de Janeiro Instituto de Química.

ASTM D3418 - Método de teste padrão para temperaturas de transição de polímeros por calorimetria de varredura diferencial; disponível em: www.astm.org/d3418-21, 02/05/2023.

ASTM D792-08 Densidade e Gravidade Específica (Densidade Relativa) de Plásticos Por Deslocamento, ed. 2020.

AZAPAGIC, A.; EMSLEY, A.; HAMERTON, I. Polymers the Environment and Sustainable Development. Guilford: John Wiley and Sons, p. 55, 84-87, 2003.

BIRLEY, A.W; HEATH, R.J; SCOTT, M, J. Plastic Materials, Properties and Applications. 2nd edition; Blackie and Son Limited, 1988.

BONELLI, C.M. Perfil de recicladora de plástico. Reciclagem & Negócios Plástico Granulado, CEMPRE, 1º ed., 1994.

CANEVAROLO Jr. Sebastião V. (ed.), "Técnicas de caracterização de polímeros", Artliber Editora Ltda, 2003.

CANEVAROLO Jr. Sebastião V. Ciência dos Polímeros. 1ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

CANEVAROLO Jr. Sebastião V. Ciências dos Polímeros São Paulo: 2ª edição Artliber. 2006.

CANEVAROLO Jr. Sebastião V., "Ciência dos polímeros. Um curso básico para tecnólogos e engenheiros", Artliber Editora Ltda, 2002.

CANEVAROLO, V., Sebastião, J.R., 2003. Técnicas De Caracterização De

Polímeros. Editora Artliber, 1ª ED. CARVALHO, A.JF., Notas de aula – Arquivo: A5-Poli-Identificação Polímeros- v01.pdf, Departamento de Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, (1º semestre 2012).

ENSAIOS MECÂNICOS; acessado em: <https://afinkopolimeros.com.br/servicos/ensaios-laboratoriais/ensaios-mecanicos/>

EW. Billmeyer, Jr. - "Textbook of Polymer Science", John Wiley, Singapore, 1984.
GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. Ensaios dos materiais. 2. ed. Rio de Janeiro: Gen, 2012.

GRIPPI, Sidney. Lixo: Reciclagem e Sua História: Guia para as Prefeituras Brasileiras. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

HARPER, A., and Nickels, K. 2008. Identifying Polymers. Queensland University of Technology.

ISO 178 – Ensaio de flexão de 3 pontos em plásticos, disponível em: Zwick Roell, acessado: www.zwickroell.com/pt/setores-da-industria/plasticos/compostos-para-moldagem-termoplasticos-e-termoendurecidos/ensaio-de-flexao-de-3-pontos-iso-178, 02/05/2024.

ISO 179-1 & ISO 179-2 resistência ao impacto e ao impacto com entalhe conforme Charpy, disponível em: disponível em Zwick Roell, acessado: 02/05/2024.

ZWICKROELL - www.zwickroell.com/pt/setores-da-industria/plasticos/compostos-para-moldagem-termoplasticos-e-termoendurecidos/charpy-forca-de-impacto-resistencia-ao-impacto-com-entalhe-iso-179-1-iso-179-2, acessado: 02/05/2024.

ISO 527-2 Ensaio de tração em plásticos, disponível em: Zwick Roell, acessado em: www.zwickroell.com/pt/setores-da-industria/plasticos/compostos-para-moldagem-termoplasticos-e-termoendurecidos/ensaio-de-tracao-iso-527-1-2, 02/05/2024.

M.R. Ort & O.D.. Deix - "Polymerization Procedures Laboratory", in H.F. Mark, N.M. Bikales, C.G Overberger & G. Menges, "Encyclopedia of Polymer Science and Engineering", V.12, John Wiley New York, 1988, pág. 541-555.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. Introdução a Polímeros. 2.ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

MANO, Eloísa B. Polímeros como Materiais de Engenharia. 1ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1991.

MANO, Eloisa Biasotto. Polímeros como materiais de engenharia. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. Introdução a Polímeros. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1999. MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. Identificação de Plásticos, Borrachas e Fibras. São Paulo: Editora Blucher, 2008.

MANRICH, Silvio. Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes para extrusão, injeção e moldes para injeção. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2013.

MENDES, A. M. Relatório de ensaio de tração com materiais poliméricos. 2007. Projeto de graduação (Curso de Engenharia Mecânica) - UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, 2007.

MICHAELI, Walter; GREIF, Helmut; KAUFMANN, Hans; VOSENBURGER, FranzJosef. Tecnologia dos Plásticos. 1ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1995.

MUNDO EDUCAÇÃO; acessado: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/alerta-para-uso-plasticos.htm>

N.F. Brockmeier - "Gas-Phase polymerization", in H.F. Mark, N.M. Bikales, C.G. Overberger and G. Menges, "Encyclopedia of Polymer Science and Engineering", V.7, John Wiley, New York, 1987, pág. 480-488.

OBJETOS DE PLÁSTICO; acessado: <https://www.zonaplastica.com/poliestireno/>

V. Menikheim - "Polymerization Procedures", in H.F. Mark, N.M. Bikales, C.G. Overberger & G Menges, "Encyclopedia of Polymer Science and Engineering", V.12, John Wiley, New York, 1988, pág. 504-541.

WIEBECK, Hélio; HARADA, Júlio. Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações. null: Artliber, 2005.

ZANIN, Maria; MANCINI, Sandro Donnini. Resíduos Plásticos e Reciclagem: Aspectos Gerais e Tecnologia. São Carlos. 2009.