

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

JESSICA THAYNA FERNANDES DA SILVA

Estudo da aplicação de ABS reciclado para a injeção de itens de aspecto visual

Lorena
2022

JESSICA THAYNA FERNANDES DA SILVA

Estudo da aplicação de ABS reciclado para a injeção de itens de aspecto visual

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de Lorena da Universidade
de São Paulo como requisito parcial para a
obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientador: José Renato Cassinelli

Lorena
2022

NÃO AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, SERÁ DISPONIBILIZADO AUTOMATICAMENTE APÓS 2 ANOS DA PUBLICAÇÃO

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, Jessica Thayna Fernandes da
Estudo da aplicação de ABS reciclado para a injeção
de Itens de aspecto visual / Jessica Thayna
Fernandes da Silva; orientador José Renato
Cassinelli. - Lorena, 2022.
66 p.

Monografia apresentada como requisito parcial
para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia
de Materiais - Escola de Engenharia de Lorena da
Universidade de São Paulo. 2022

1. Abs. 2. Reciclagem mecânica primária. 3.
Injeção. 4. Ensaios mecânicos. I. Título. II.
Cassinelli, José Renato, orient.

Dedico esse trabalho aos meus pais, que sempre me amaram, me apoiaram e incentivaram a minha buscar por conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar aos meus pais, Maria e Salvador, por todo o apoio, compreensão, amor e exemplo. Sem eles, eu não teria chegado até aqui.

Ao meu companheiro de vida, Ian, pelo apoio, incentivo, carinho e compreensão, principalmente, nos momentos difíceis.

Ao meu orientador José Renato Cassinelli por toda ajuda e suporte durante a realização desse trabalho.

À Mariana Sanz, Pericles Bosquetti, Flávio Vieira e Adonis Nascimento, que me auxiliaram na realização dos ensaios.

Aos professores da Escola de Engenharia de Lorena da USP que contribuíram com meu aprendizado ao longo desses anos.

Por fim agradeço aos amigos que encontrei na universidade, que fizeram a jornada ser mais leve, feliz e engraçada.

RESUMO

SILVA, J. T. F. Estudo da aplicação de ABS reciclado para a injeção de itens de aspecto visual. 2022. 66p. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2022.

Neste trabalho foi realizado um estudo acerca da utilização de ABS reciclado e readitivado na injeção de uma peça de aspecto visual utilizada em uma empresa fabricante de eletrodomésticos. Foram realizados testes para a avaliação de amarelamento e brilho, bem como envelhecimento térmico, índice de fluidez, tração, flexão e impacto. Os resultados mostraram que o índice de fluidez teve um aumento de apenas 4% no reciclado. Em relação ao amarelamento foi notado um comportamento similar tanto para amostra virgem quanto para a amostra reciclada e aditivada, tendo ambas um amarelamento mais acentuado após 50 horas. No entanto, a cor inicial da peça injetada com o ABS reciclado apresentou um tom azulado. O brilho apresentou bons resultados nos dois materiais. Em relação às propriedades mecânicas, pode-se notar que as alterações foram mínimas. Na tração, tanto nos corpos que não foram envelhecidos, quanto nos envelhecidos, houve alterações pouco significativas nas propriedades do reciclado. Na flexão, tanto nos corpos sem envelhecimento quanto com envelhecimento, as alterações também foram pouco significativas. No ensaio de impacto, os corpos que sofreram envelhecimento apresentaram uma queda de 13% na resistência ao impacto nas amostras de ABS reciclado, enquanto os que não foram envelhecidos sofreram uma queda de apenas 5% no reciclado. Em suma, o material reciclado apresenta um grande potencial de reutilização, sendo necessário somente um ajuste de cor no momento da aditivação para que fique menos azulado e não ocorra diferença de tonalidade em relação às cores de outros itens.

Palavras-chave: ABS, reciclagem mecânica primária, injeção, ensaios mecânicos

ABSTRACT

SILVA, J. T. F. Study of the application of recycled ABS for the injection of items with a visual appearance. 2022. 66p. Undergraduate thesis – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2022.

In this work, a study was carried out on the use of recycled and re-added ABS in the injection of a piece with a visual aspect. Tests were carried out to evaluate yellowing and gloss, as well as aging, tensile, bending, impact and melt index tests. The results showed that the melt index had an increase of only 4% in the recycling. Regarding yellowing, a similar behavior was observed for both the virgin sample and the recycled and additive sample, both having a more pronounced yellowing after 50 hours. However, the initial color of the part injected with recycled ABS presented a bluish tone. The gloss showed good results in both materials. Regarding the mechanical properties, it was noted that the changes were minimal. In the tensile test, in both non-aged and aged bodies, there were little significant changes in recycled properties. In bending, both in bodies without aging and with aging, the changes were also negligible. In the impact test, bodies that underwent aging showed a 13% drop in recycled ABS samples, while those that were not aged experienced a drop of only 5% in recycled ABS. In short, the recycled material has a great potential for reuse, requiring only a color adjustment at the time of additivation so that it becomes less bluish and there is no difference in tone in relation to the colors of other items.

Keywords: ABS, primary mechanical recycling, injection, mechanical testing

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Representações esquemáticas de estruturas moleculares (a) linear, (b) ramificada, (c) com ligações cruzadas e (d) em rede (tridimensional).	17
Figura 2 — Estrutura química de termoplásticos (A) e termofixos (B).....	19
Figura 3 — Exemplo esquemático de um homopolímero.....	20
Figura 4 — Exemplo esquemático de um bipolímero	20
Figura 5 — Exemplo esquemático de um terpolímero	20
Figura 6 — Exemplo esquemático de copolímeros	21
Figura 7 — Desenho esquemático com etapas da reciclagem mecânica	25
Figura 8 — Origem do Plástico reciclado em 2018	27
Figura 9 — Origem do Plástico reciclado em 2019.	28
Figura 10 — Diagrama esquemático de uma extrusora	29
Figura 11 — Diagrama esquemático de um equipamento de moldagem por injeção	29
Figura 12 — Rosca utilizada no processo de injeção e extrusão	30
Figura 13 — Esquema com monômeros, polimerização e estrutura do ABS.....	31
Figura 14 — Corpo de prova para ensaio de flexão conform ASTM D256-02	34
Figura 15 — Desenho esquemático de plastômetro utilizado em Ensaio de Índice de Fluidez (IF ou MFI).	35
Figura 16 — Plastômetro utilizado para determinar o Índice de Fluidez	35
Figura 17 — Bandeja com corpos de prova para teste de envelhecimento	37
Figura 18 — Brilhômetro 60° GARDNER	38
Figura 19 — Câmera de envelhecimento QUV-B.....	38
Figura 20 — Lâmpada UV-B TL-40W	39
Figura 21 — Espectrofômetro Colorimétrico	40
Figura 22 — Sistema CIELAB de cores	40
Figura 23 — Amostras de ABS posicionadas para o ensaio QUV-B.....	41
Figura 24 — Visão geral das amostras no ensaio QUV-B.	41
Figura 25 — Aparelho universal EMIC preparado para ensaio de tração	43
Figura 26 — Aparelho universal EMIC com corpo de prova de tração.....	43
Figura 27 — Aparelho universal EMIC preparado para ensaio de flexão.....	44
Figura 28 — Apoio com valor calculado e distribuído	45
Figura 29 — Corpo de prova de flexão posicionado no Aparelho universal EMIC...	45
Figura 30 — Máquina CEAST 9050 da INSTRON	46
Figura 31 — Resultados dos índices de fluidez	47
Figura 32 — Comparação de tonalidade entre a peça injetada com ABS reciclado e outro item do produto	48
Figura 33 — Comparação de tonalidade entre a peça injetada com ABS virgem e outro item do produto	48
Figura 34 — Amarelamento em amostras de ABS virgem e de ABS reciclado.....	50

Figura 35 — Evolução de DE nas amostras.....	50
Figura 36 — Curvas obtidas no teste de tração para o ABS virgem a zero hora	51
Figura 37 — Curvas obtidas no teste de tração para o ABS reciclado a zero hora..	51
Figura 38 — Curvas obtidas no teste de tração para o ABS virgem envelhecido	53
Figura 39 — Curvas obtidas no teste de tração para o ABS reciclado envelhecido.	53
Figura 40 — Curvas obtidas no teste de flexão para o ABS virgem a zero hora.....	56
Figura 41 — Curvas obtidas no teste de flexão para o ABS reciclado a zero hora ..	56
Figura 42 — Curvas obtidas no teste de flexão para o ABS virgem envelhecido.....	57
Figura 43 — Curvas obtidas no teste de flexão para o ABS reciclado envelhecido .	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Ocorrência de produção industrial de alguns polímeros	15
Tabela 2 — Parâmetros utilizados na injeção dos corpos de prova.....	33
Tabela 3 — Relação da quantidade final dos corpos de prova	34
Tabela 4 — Parâmetros utilizados no ensaio de fluidez.....	36
Tabela 5 — Separação dos corpos de prova para os ensaios	36
Tabela 6 — Parâmetros utilizados para amostras do teste de envelhecimento acelerado QUV-B	39
Tabela 7 — Fórmulas para cálculo de DE.....	42
Tabela 8 — Resultados da medição do brilho realizada nas amostras.....	47
Tabela 9 — Tabela com resultados obtidos do ABS virgem	49
Tabela 10 — Tabela com resultados obtidos do ABS reciclado.....	49
Tabela 11 — Resultados de amarelamento para ABS virgem	49
Tabela 12 — Resultados de amarelamento para ABS reciclado.....	49
Tabela 13 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de tração dos corpos a zero hora.....	52
Tabela 14 — Média dos resultados obtidos no ensaio de tração para o ABS virgem zero hora e envelhecido	54
Tabela 15 — Média dos resultados obtidos no ensaio de tração para o ABS reciclado zero hora e envelhecido	54
Tabela 16 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de tração dos corpos envelhecidos.	55
Tabela 17 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de flexão dos corpos a zero hora.....	56
Tabela 18 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de flexão dos corpos envelhecidos	57
Tabela 19 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de flexão dos corpos de ABS virgem a zero hora e envelhecido	58
Tabela 20 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de flexão dos corpos de ABS reciclado a zero hora e envelhecido.....	58
Tabela 21 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de impacto dos corpos a zero hora.	58
Tabela 22 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de impacto dos corpos envelhecidos.	59
Tabela 23 — Média de resultados obtidos através do ensaio de impacto para as amostras virgens a zero hora e envelhecidas	59
Tabela 24 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de impacto para as amostras recicladas a zero hora e envelhecidas.....	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVO	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	BREVE HISTÓRICO DOS POLÍMEROS	15
3.2	ESTRUTURA MOLECULAR	16
3.3	COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	18
3.3.1	Termoplásticos	18
3.3.2	Termorrígidos	18
3.4	COPOLÍMEROS.....	19
3.5	ADITIVOS.....	22
3.6	RECICLAGEM.....	22
3.6.1	Classificação da matéria-prima utilizada na reciclagem	23
3.6.2	Classificação da Reciclagem de Polímeros	24
3.6.3	Reciclagem Mecânica	24
3.6.4	O plástico e a reciclagem no Brasil: uma visão geral	26
3.7	PROCESSO DE EXTRUSÃO E INJEÇÃO DE POLÍMEROS	28
3.8	ABS (ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO).....	30
3.9	RECICLABILITY DO ABS	32
4	MATERIAIS E METODOLOGIA	33
4.1	MATERIAIS	33
4.2	INJEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	33
4.3	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	33
4.4	ÍNDICE DE FLUIDEZ	34
4.5	ENVELHECIMENTO TÉRMICO.....	36
4.6	ANÁLISE DO BRILHO.....	37
4.7	ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO – QUV - B	38
4.8	ENSAIO DE TRAÇÃO	42
4.9	ENSAIO DE FLEXÃO	44
4.10	ENSAIO DE IMPACTO IZOD	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1	ÍNDICE DE FLUIDEZ	47
5.2	ANÁLISE DO BRILHO.....	47
5.3	ENVELHECIMENTO ACELERADO – QUV - B	48
5.4	ENSAIO DE TRAÇÃO	51
5.4.1	Amostras a zero hora	51
5.4.2	Amostras pós envelhecimento térmico a 70°C e 500h	52
5.5	ENSAIO DE FLEXÃO	55
5.5.1	Amostras a zero hora	55
5.5.2	Amostras pós envelhecimento térmico a 70°C e 500h	56

5.6	ENSAIO DE IMPACTO.....	58
5.6.1	Amostras a zero hora.....	58
5.6.2	Amostras pós envelhecimento térmico a 70°C e 500h.....	59
6	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Os polímeros termoplásticos, quando submetidos ao calor, podem ser moldados e apresentam características como boa aparência, resistência ao impacto e outras. O que, associado com seu baixo custo, faz com que os termoplásticos sejam utilizados em uma diversa gama de produtos e aplicações (SPINACÉ et al, 2005). Com os polímeros foi possível realizar viagens espaciais, produzir carros e jatos mais leves, além de serem utilizados na medicina, em incubadoras e na fabricação de equipamentos. (PARKER, 2022)

O uso desses polímeros se popularizou após a Segunda Guerra Mundial e seu consumo vem crescendo a cada dia, substituindo os materiais antes mais comuns, como vidro, madeira e metais (ROSA, 2018). No entanto, justamente por seu baixo custo de obtenção, esses materiais são muitas vezes descartados após seu primeiro uso. Há uma crescente preocupação com o destino final desses materiais, que muitas vezes acabam por ser descartados na natureza, poluindo rios, oceanos e florestas. (PARKER, 2022)

A reciclagem mecânica apresenta-se como uma boa opção para esses polímeros, já que é um processo simples e barato. No Brasil a reciclagem do plástico cresce a cada dia, no entanto a maior parte dos polímeros reciclados no Brasil são do tipo PCR (Post-Consumer-Recycle), enquanto os PIR (Post-Industrial-Resin) representam uma menor quantidade (SPINACÉ et al, 2005).

A reciclagem mecânica primária pode ser utilizada para a reciclagem dos PIR (Post-Industrial-Resin), já que esses resíduos não estão contaminados por outros polímeros (SPINACÉ et al, 2005). Segundo Carvalho (2009 apud CÂNDIDO, 2011), apesar das grandes companhias já entenderem a reciclagem como uma forma de economia e de compromisso com meio ambiente e o aquecimento global, ainda poucos materiais reciclados são utilizados na fabricação de peças de maior valor agregado.

O ABS é um terpolímero composto de acrilonitrila, butadieno e estireno, e cada um de seus monômeros contribui de diferentes formas para alcançar as propriedades desejadas. Devido ao seu baixo custo e boas propriedades, o seu uso se popularizou em empresas automotivas e de aplicações domésticas (LANDI, 2003)

Através de ensaios, esse trabalho avaliou a possibilidade de utilizar ABS reciclado para injeção de uma peça de aspecto visual utilizada no ramo de eletrodomésticos. Para isso foi avaliado o índice de fluidez do reciclado, bem como aspectos visuais, como amarelamento, cor e brilho do reciclado em relação ao virgem.

Além disso, foram injetados corpos de prova para realização de ensaios mecânicos, como tração, flexão e impacto. As avaliações acerca do comportamento mecânico foram realizadas em duas frentes: a primeira em corpos de prova que não foram submetidos ao envelhecimento (chamados neste trabalho de “corpos a zero hora”) e a segunda em corpos que foram submetidos ao ensaio de envelhecimento térmico em estufa.

2 OBJETIVO

Analisar e comparar as características do ABS reciclado ao ABS virgem, através de ensaios mecânicos e de envelhecimento, com a finalidade de utilizar esse polímero para a injeção de uma peça de aspecto visual utilizada em uma empresa que fabrica eletrodomésticos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BREVE HISTÓRICO DOS POLÍMEROS

A palavra polímero, que em grego significa poli (muitos) + meros (iguais), são macromoléculas compostas de meros que se repetem na cadeia e que se ligam através de ligações covalentes. Polímeros naturais, como a lã, são utilizados desde a antiguidade. Com as Grandes Navegações e a descoberta do continente americano, houve também a descoberta da borracha extraída da Seringueira (*Hevea Brasiliensis*) (CANEVAROLO, 2013). Hermann Staudinger, cientista alemão nascido em 1881, ganhou o prêmio Nobel de Química ao demonstrar a existência de macromoléculas (SACK, 2022).

Muitos dos polímeros utilizados são sintéticos, tendo sido sintetizados a partir dos monômeros, que são pequenas moléculas orgânicas. Um dos primeiros polímeros sintetizados em laboratório que se tem conhecimento é o polietileno, o qual foi desenvolvido em 1934 na Inglaterra, porém seu uso somente se tornou popular durante a Segunda Guerra Mundial, em que, devido às suas propriedades, foi aplicado na forma de isolante elétrico nos radares militares. Mais tarde em 1950, Karl Ziegler sintetizou um polietileno mais rígido, o qual deu origem às famosas garrafas plásticas, amplamente utilizadas nos dias de hoje. Por conta do seu baixo custo de produção e suas boas propriedades, se popularizaram após a Segunda Guerra Mundial. (SOUZA, 2008) e (CALLISTER, 2012)

Tabela 1 — Ocorrência de produção industrial de alguns polímeros

Polímero	1 ^a Ocorrência	1 ^a Prod. Industrial
PVC	1915	1933
PS	1900	1936/7
PEDB (LDPE)	1933	1939
Nylon	1930	1940
PEAD (HDPE)	1953	1955
PP	1954	1959
PC	1953	1958

Fonte: CANEVAROLO (2013).

3.2 ESTRUTURA MOLECULAR

A reação de síntese dos polímeros é conhecida como polimerização, há a formação de cadeias longas que possuem um alto peso molecular. Para que a polimerização aconteça é preciso que os monômeros se liguem entre si, formando essas cadeias, para isso o mero precisa ter no mínimo funcionalidade 2, ou seja ter ao menos dois pontos nos quais possam ocorrer reações (CANEVAROLO, 2013). Vale lembrar que nem todas as cadeias irão ter o mesmo comprimento, resultando em uma distribuição de comprimento de cadeia com pesos moleculares diferentes, das quais se obtém o peso molecular médio. O comprimento das cadeias poliméricas, ou seja, sua massa molecular, pode afetar algumas propriedades do polímero, como o módulo da elasticidade e a resistência. Essa característica é muito utilizada na indústria para se obter polímeros com diferentes características levando em conta sua aplicação (CANEVAROLO, 2013) (CALLISTER, 2012).

Outro fator que tem influência nas propriedades físicas de um polímero é sua estrutura molecular, que pode ser linear, ramificada, com ligações cruzadas ou em rede (figura 1). Os polímeros podem ter a presença de mais de um tipo de estrutura molecular, no entanto será classificado de acordo com a que é dominante. (CALLISTER, 2012).

Os polímeros lineares possuem a estrutura molecular mais simples e suas cadeias são compostas por unidades repetitivas que se unem em uma única linha, gerando apenas uma cadeia principal. Os monômeros utilizados nesse tipo de estrutura são bifuncionais e as cadeias resultantes são flexíveis e podem apresentar ligações de hidrogênio de Van der Waals entre si (CANEVAROLO, 2013) e (CALLISTER, 2012).

Já os ramificados são polímeros em que, durante a polimerização, há uma substituição de um átomo de hidrogênio ou um monômero da cadeia principal por uma outra cadeia que pode ser longa ou curta (CALLISTER, 2012).

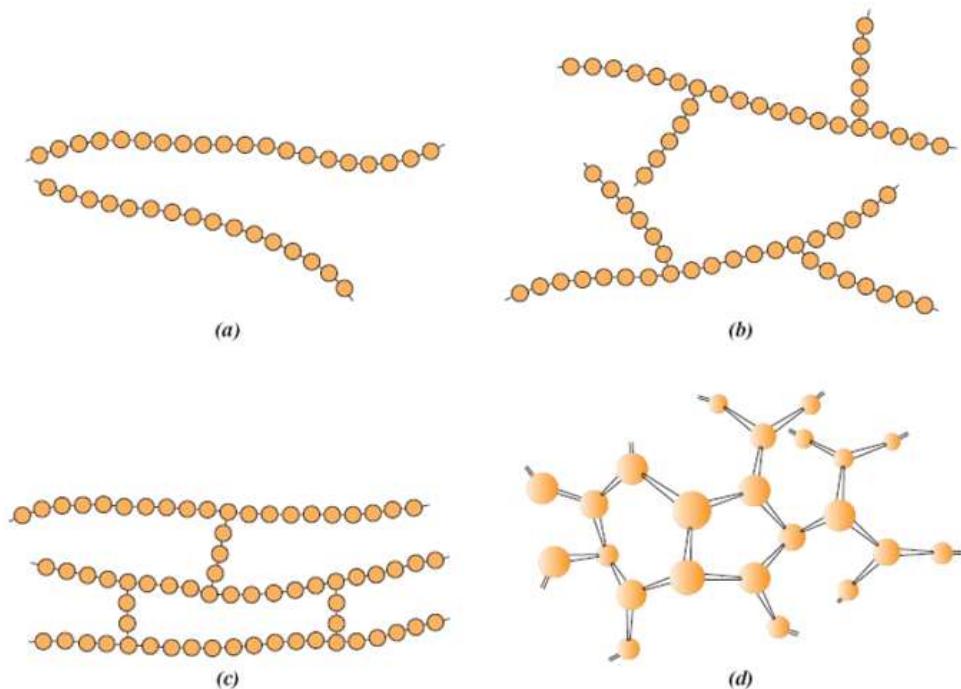
As ramificações formam diferentes tipos de arquiteturas, tendo-se três estruturas como principais: aleatória (ramificações de tamanhos variados), estrelada (ramificações que saem do mesmo ponto e possuem tamanhos diferentes) e pente (ramificações que se originam sempre da cadeia principal e possuem um tamanho fixo) (CANEVAROLO, 2013).

Nos polímeros com estrutura ramificada, ocorre uma diminuição na massa específica do polímero, já que há uma menor compactação da cadeia devido às ramificações (CALLISTER, 2012).

Durante a polimerização, pode ocorrer a adição de átomos ou moléculas covalentes, os quais vão unir cadeias lineares através de ligações covalentes, que dão origem aos polímeros com estrutura molecular com ligações cruzadas. Essas conexões podem surgir em várias direções e leva a formação de polímeros com baixa densidade de ligações cruzadas e polímeros com alta densidade de ligações cruzadas (CANEVAROLO, 2013) (CALLISTER, 2012).

Quando o polímero possui muitas ligações cruzadas, esse também poderá ser classificado como um polímero com estrutura em rede. Esse tipo de estrutura também pode surgir devido a presença de ligações covalentes, sendo necessárias três ou mais ligações para isso (CALLISTER, 2012).

Figura 1 — Representações esquemáticas de estruturas moleculares (a) linear, (b) ramificada, (c) com ligações cruzadas e (d) em rede (tridimensional).



Fonte: CALLISTER (2012).

3.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO

Os polímeros podem ser classificados de diversas formas e uma delas é em relação ao comportamento mecânico. Nessa categoria temos três grandes subgrupos: os elastômeros, as fibras e os plásticos. Os plásticos são polímeros que em sua temperatura de utilização encontram-se no estado sólido e podem ser divididos em termoplásticos e termorrígidos. (CANEVAROLO, 2013).

3.3.1 Termoplásticos

Os termoplásticos constituem a maior parte dos polímeros comerciais e são formados por cadeias lineares, que se encontram na forma de cordões soltos, mas agregados, como em um novelo de lã (GORNI, 2013). Também é possível haver cadeias ramificadas, desde que as ramificações sejam flexíveis (CALLISTER, 2012). Em suma, essas cadeias estão ligadas entre si por ligações secundárias (GONCALVEZ, 2021).

Quando aquecidos e submetidos a pressão, esses polímeros amolecem e fluem devido ao aumento do movimento molecular, que leva a diminuição das forças secundárias. Quando a pressão e a temperatura são retiradas, voltam a se solidificar (CANEVAROLO, 2013) (CALLISTER, 2012).

Essa característica torna possível a moldagem desses polímeros e também sua reciclagem, já que uma nova aplicação de calor e pressão reinicia o ciclo e a sua principal capacidade é a de fundir-se diversas vezes. (CANEVAROLO, 2013).

3.3.2 Termorrígidos

Os termorrígidos também são chamados de termofixos, são polímeros com cadeias em rede, sendo rígidos e frágeis. Comparados com os termoplásticos, são mais duros, resistentes e mais estáveis em questões de dimensões (CALLISTER, 2012). Por conta de suas características, esses polímeros são moldados quando ainda estão como pré-polímeros (CANEVAROLO, 2013).

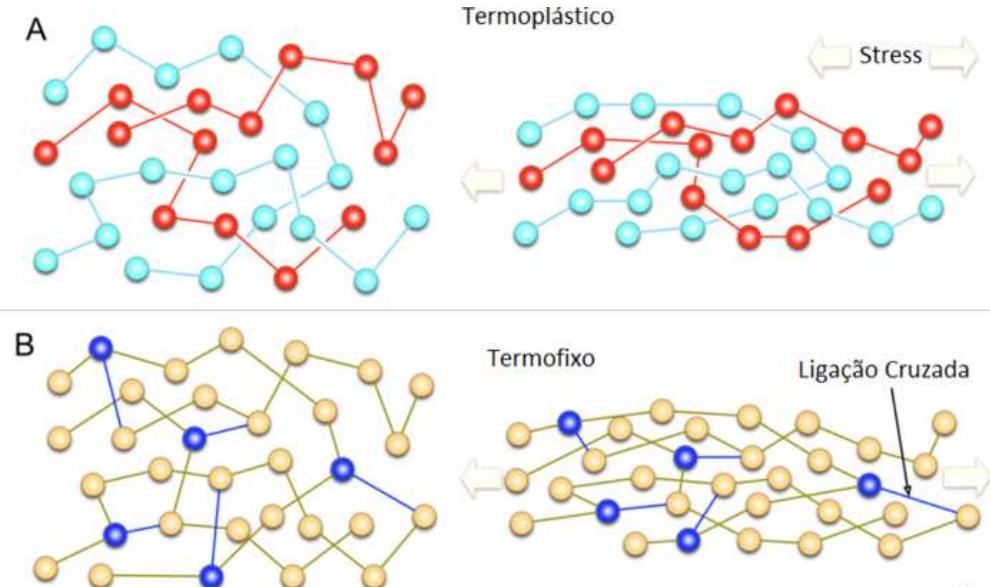
Quando submetidos a calor e pressão amolecem, tornando possível a sua moldagem, assim como os termoplásticos. No entanto, a diferença substancial é

que, ao contrário dos termoplásticos, esses polímeros tornam-se permanentemente rígidos após a sua formação, o que faz com que sua reciclagem não seja possível (CANEVAROLO, 2013). Isso ocorre, pois, suas cadeias em rede formam ligações covalentes, as quais durante o tratamento térmico prendem as cadeias umas nas outras. O processo químico que dá origem a essas ligações cruzadas é chamado de cura ou reticulação, e é irreversível. Portanto um novo ciclo de calor e pressão não causa efeito nesses materiais. (CALLISTER, 2012) (GONCALVEZ, 2021).

Essas ligações podem ser quebradas se o polímero acabado for submetido a uma alta temperatura que leva a degradação. (MARINHO, Jean R. D. 2005). Assim os termofixos possuem uma maior temperatura de degradação quando comparado com os termoplásticos, além de uma alta temperatura de uso contínuo (GONCALVEZ, 2021).

A figura 2 mostra de forma esquemática a diferença entre termoplásticos (A) e termorrígidos (B).

Figura 2 — Estrutura química de termoplásticos (A) e termofixos (B).



Fonte: CCDM (2021).

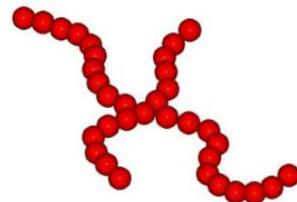
3.4 COPOLÍMEROS

Os homopolímeros são polímeros constituídos por apenas um tipo mero, como, por exemplo, o poliestireno (PS) e o polipropileno (PP). No entanto, quando

um polímero é formado por mais de um tipo de unidade repetitiva (mero), este é chamado de copolímero (CALLISTER, 2012). A reação de síntese que dá origem a esses materiais é chamada de copolimerização.

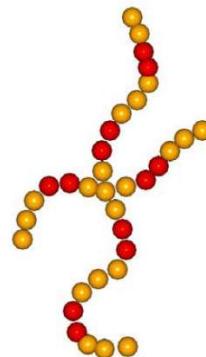
Caso o copolímero seja formado por dois meros, ele é chamado de bipolímero (Figura 4), se houver três meros na composição, o copolímero é chamado de terpolímero (Figura 5) e assim por diante. Um exemplo de bipolímero é o etileno-acrilico, e de terpolímero é o acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) (PARENTE, 2006).

Figura 3 — Exemplo esquemático de um homopolímero



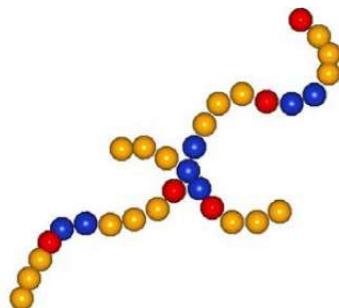
Fonte: PARENTE (2006).

Figura 4 — Exemplo esquemático de um bipolímero



Fonte: PARENTE (2006).

Figura 5 — Exemplo esquemático de um terpolímero



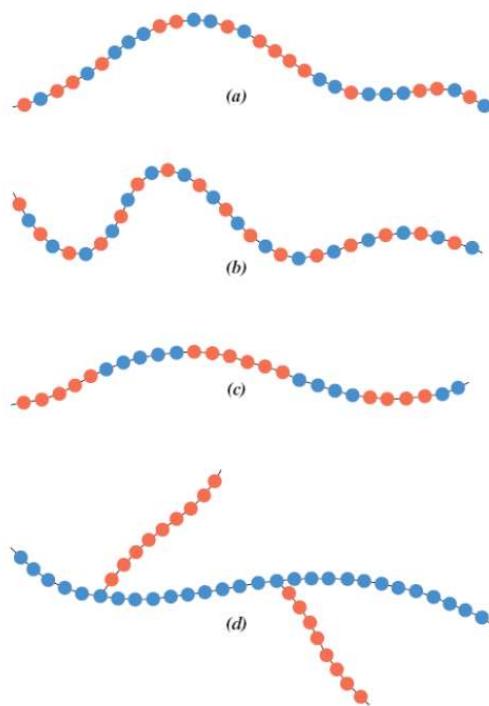
Fonte: PARENTE (2006).

Esses materiais foram desenvolvidos para que fosse possível combinar ou aprimorar as propriedades dos homopolímeros, os quais são polímeros com apenas um tipo de mero (CALLISTER, 2012).

Os copolímeros são classificados em quatro grupos:

- Copolímeros Aleatórios (Figura 6 (a)): as unidades repetitivas estão distribuídas aleatoriamente, assim não há uma sequência definitiva dos meros; (CALLISTER, 2012) e (GONCALVEZ, 2021).
- Copolímeros Alternados (Figura 6 (b)): as unidades repetitivas alteram de posição ao longo da cadeia; (CALLISTER, 2012) e (GONCALVEZ, 2021).
- Copolímeros em Bloco (Figura 6 (c)): as unidades repetitivas se agrupam em blocos e se repetem ao longo da cadeia; (CALLISTER, 2012) e (GONCALVEZ, 2021).
- Copolímeros Enxertados (Figura 6 (d)): quando se há o enxerto de ramificações laterais que são compostas por um homopolímero diferente do que compõe a cadeia principal. Essas ramificações se unem a cadeia principal por ligações covalentes; (CALLISTER, 2012) e (GONCALVEZ, 2021).

Figura 6 — Exemplo esquemático de copolímeros



Fonte: CALLISTER (2012).

3.5 ADITIVOS

Os aditivos são utilizados quando se faz necessário alterar as propriedades físicas, químicas ou mecânicas de um polímero. Entre os aditivos mais comuns é possível citar:

- Cargas: São materiais baratos, como talco, por exemplo, que quando adicionados substituem parte do polímero, deixando o custo final mais baixo. Em geral elas são adicionadas no material quando pretende-se melhorar propriedades mecânicas como limites de resistência a tração e compressão, resistência à abrasão, tenacidade etc (CALLISTER, 2012).
- Plastificantes: São aditivos que quando adicionados reduzem a temperatura de transição vítreia, alteram a flexibilidade, ductilidade, e tenacidade dos polímeros, levando também a uma redução na dureza e na rigidez. Isso permite que o polímero seja utilizado em aplicações que necessitam das propriedades, como por exemplo a produção de lâminas finas ou filmes, tubos, capas de chuva e etc (CALLISTER, 2012).
- Estabilizantes: Como o próprio nome diz, ajuda a estabilizar os polímeros diminuindo a sua deterioração que pode ocorrer por exposição à luz [em especial a radiação ultravioleta (UV)] e a oxidação (CALLISTER, 2012).
- Corantes: Podem ser adicionados na forma de pigmentos ou matizes, conferem cor, assim como opacidade aos polímeros (CALLISTER, 2012).
- Retardantes de chama: são aditivos que atuam aumentando a resistência do polímero à chama, através da interferência no processo de combustão, por meio da fase gasosa, ou pela iniciação de uma reação de combustão que gera menos calor (CALLISTER, 2012).

3.6 RECICLAGEM

A reciclagem consiste em reaproveitar os materiais que são descartados no processo produtivo e também os materiais provenientes de produtos descartados (CÂNDIDO, 2011).

Como dito anteriormente, os termoplásticos são recicláveis devido às suas características mecânicas quando submetidos ao aquecimento. Com o aumento de seu consumo, a reciclagem passa a ser uma necessidade para que se diminua a quantidade de resíduos plásticos que são descartados e vão parar em aterros sanitários ou na natureza, além disso, a reciclagem faz com que o uso do polímero virgem diminua, consequentemente diminuindo a demanda pelas matérias-primas como o petróleo (THAKUR, 2015 apud AGOSTINI, 2018).

Segundo Carvalho (2009 apud CÂNDIDO, 2011), apesar de atualmente as empresas verem a reciclagem como fator importante para maximizar os lucros e também contribuir para o meio ambiente e sociedade, ainda há pouca utilização do reciclado para a fabricação de novas peças. A raiz disso se encontra na falta de dados técnicos e simulações das condições de uso do produto.

3.6.1 Classificação da matéria-prima utilizada na reciclagem

A matéria-prima utilizada na reciclagem pode ter origem doméstica, sendo chamadas de plásticos reciclados pós consumo ou PCR (Post-Consumer-Recycle), podendo ser domésticos ou não domésticos. Nesses materiais estão presentes embalagens plásticas, carcaças plásticas de eletrônicos e linha branca, entre outros (RESINAS, 2021).

O plástico reciclado pode ter origem industrial também, como peças com defeito, galhos e borras de injeção. O material que provém desse segmento é chamado de pós-industrial ou PRI (Post-Industrial-Resin) (RESINAS, 2021). Esse tipo de plástico quando reciclado, gera itens com melhores propriedades que os PCR, isso pois por não terem sido consumidos ainda, não sofreram fortes degradações e perdas de propriedades, por não terem tido contato com produtos de limpeza, óleos, graxas, por exemplo. Assim podem ser reprocessados, voltando novamente ao processo produtivo (SPINACÉ, 2005).

3.6.2 Classificação da Reciclagem de Polímeros

A reciclagem de polímeros pode ser classificada em quatro categorias, sendo elas a primária, secundária, terciária, também chamada de química, e a quaternária, também conhecida como energética (ASTM D5033-00, 2000).

Tanto a reciclagem primária como a secundária, são conhecidas como reciclagem mecânica ou física, o que as diferencia é que na reciclagem primária, a matéria-prima utilizada é PRI, enquanto na secundária a matéria-prima utilizada é PCR (SPINACÉ, 2005).

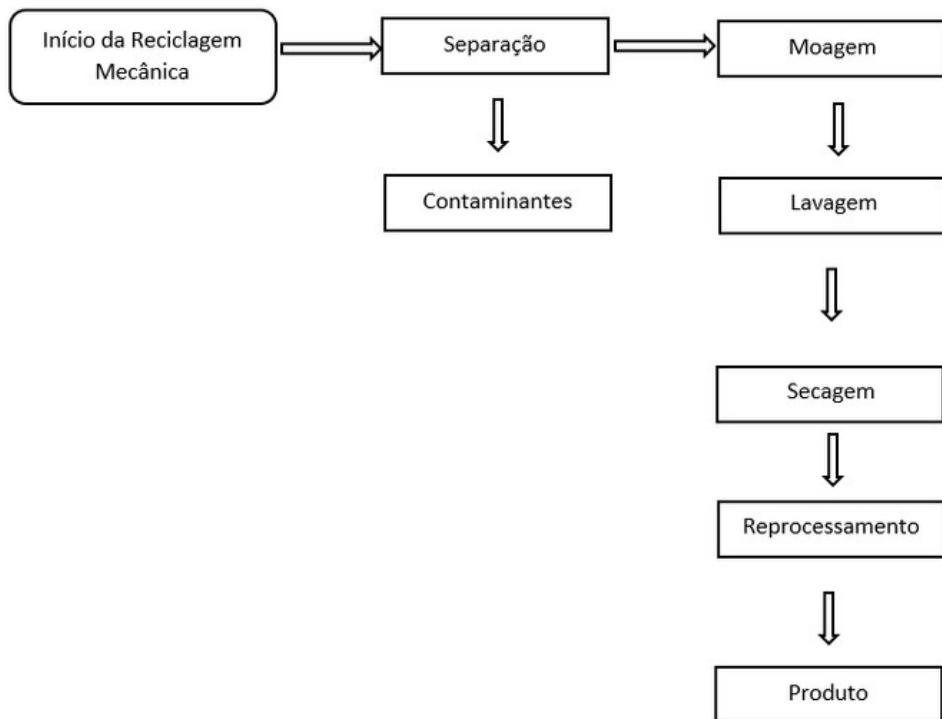
Assim a reciclagem primária, através de processamentos padrões, converte o resíduo industrial em produtos com características semelhantes às virgens. Enquanto a secundária, ao utilizar um processo ou a combinação de processos, converte resíduos pós-consumo em produtos com uma menor exigência quando comparados ao produto originado do polímero virgem. (SPINACÉ, 2005).

3.6.3 Reciclagem Mecânica

Dentro da reciclagem de materiais poliméricos industriais, a reciclagem mecânica se destaca, nela o material é reprocessado por extrusão, injeção, termoformagem, moldagem por compressão entre outras. No entanto não é possível encontrar detalhes, especificações sobre o processo nas indústrias, isso pois, como esperado, as companhias que trabalham nesse setor tendem a proteger seus procedimentos por meio de patentes (DE ARAUJO e CORREA, 2020).

A reciclagem mecânica pode ser dividida em 5 etapas, sendo elas separação do resíduo polimérico, moagem, lavagem, secagem e reprocessamento, representadas esquematicamente na figura 7. Vale lembrar que esses passos podem sofrer mudanças conforme o tipo e origem do polímero. Com essas etapas, as industriais buscam conseguir propriedades aceitáveis e mais próximas possíveis do material virgem, para que assim o reciclado possa ser utilizado novamente nas plantas fabris (DE ARAUJO e CORREA, 2020) e (SPINACÉ, 2005).

Figura 7 — Desenho esquemático com etapas da reciclagem mecânica



Fonte: O autor (2022).

A etapa de separação pode ser tanto de forma manual quanto automatizada e consiste em separar o material que será reciclado, eliminando as impurezas, que ficam limitadas a 1% m/m. Essa separação é feita baseada na identificação da simbologia presente no material ou, caso não seja possível, através de testes baseados nas características do polímero, como o odor do vapor de queima, a aparência da chama, temperatura de fusão e solubilidade. A separação também pode ser feita por diferença de densidade (SPINACÉ, 2005).

Essa etapa é de grande importância pois a presença dos chamados macro contaminantes como o vidro, metal, papel e até mesmo outros polímeros, pode causar alterações nas propriedades do reciclado (SPINACÉ, 2005).

Após a etapa de separação, vem a etapa de moagem, na qual o material passa por moinhos com facas rotativas e tem seu tamanho reduzido para que seja mais bem acomodado quando for extrusado ou injetado. Nos moinhos, o material também é peneirado, sendo muito importante a uniformidade em relação ao tamanho para que a fusão também ocorra de forma uniforme. Depois tem-se a etapa de lavagem seguida da secagem e, posteriormente, quando necessário e conforme

aplicação final, são adicionados os aditivos como antioxidantes, plastificantes, cargas de reforço, agentes de acoplamento, etc (SPINACÉ, 2005).

Ao fim da formulação, o polímero pode ser reprocessado da extrusão, injeção ou termoformagem. Como normalmente o polímero reciclado é heterogêneo devido a degradação sofrida nas etapas da reciclagem mecânica, o arranjo mais utilizado é realizar a extrusão seguida da injeção ou termoformagem. Isso porque quando utilizado somente os dois últimos, o material não é corretamente homogeneizado como ocorreria numa extrusão e isso interfere na performance final do produto gerado (SPINACÉ, 2005).

Vale ressaltar que os materiais reciclados quando comparados ao material virgem, normalmente, possuem propriedades inferiores. Essa perda de propriedades se deve a degradação que ocorre no polímero durante o reprocessamento (AGOSTINI, 2018). Além disso, os materiais poliméricos que são reciclados através da reciclagem mecânica por extrusão convencional possuem um limite em relação a quantas vezes (ciclos) conseguem ser reciclados mantendo suas propriedades mecânicas (SPINACÉ, 2005).

3.6.4 O plástico e a reciclagem no Brasil: uma visão geral

Com o grande aumento no consumo de plástico após a Segunda Guerra Mundial e suas diversas aplicações (eletrodomésticos, construções, embalagem de alimentos, etc), tornou-se praticamente impossível para os seres humanos imaginar uma vida sem plásticos. No entanto, a praticidade e o baixo custo que esses materiais apresentam, levou ao descarte fácil. (PARKER, 2022)

Segundo matéria “The World's Plastic Pollution Crisis Explained” do National Geographic, metade dos plásticos existentes no mundo foi produzida nos últimos 15 anos, sendo que a produção subiu de 2,3 milhões de toneladas em 1950 para 448 milhões de toneladas em 2015. Além disso 40% dos materiais plásticos produzidos, como sacolas plásticas e embalagens de alimentos, são utilizados apenas uma vez antes de serem descartados (PARKER, 2022)

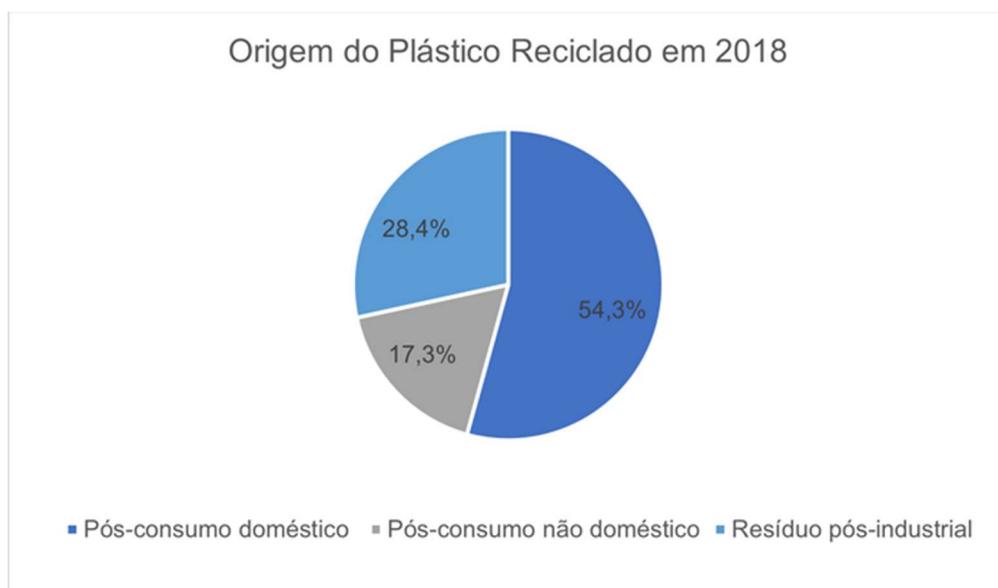
No Brasil, a reciclagem de plástico vem crescendo e além do seu aspecto ambiental, também possui um aspecto social, sendo geradora de renda para milhares de pessoas. Um estudo encomendado pelo Plano de Incentivo à Cadeia do

Plástico (PICPlast), uma iniciativa criada pela ABIPLAST e Braskem, e realizado pela MaxiQuim, foi possível mapear a indústria de reciclagem de plástico no Brasil. No Brasil, em 2018, foram mapeadas 716 empresas que trabalham com reciclagem mecânica de plásticos, sendo que para a obtenção dos dados foram entrevistadas 20% dessas indústrias. Segundo o estudo, 3,4 milhões de toneladas de plástico pós-consumo foram geradas em 2018, sendo que apenas 757 mil toneladas foram recicladas mecanicamente. Apesar da baixa porcentagem em relação ao total, quando comparado a 2016 houve um crescimento de 37% na quantidade de plástico reciclado (ABIPLAST, 2020)

No panorama de 2019, realizado também pela MaxiQuim a pedido da PICPlast, houve uma diminuição nas empresas recicadoras em cerca de 3% e cerca de 24% das empresas foram entrevistadas. Foi observado um crescimento de 5,2%, em relação a 2018 de resíduos plásticos na reciclagem, além de uma diminuição de 15,1% na perda de resíduos plásticos durante o processo. (PICPLAST, 2019)

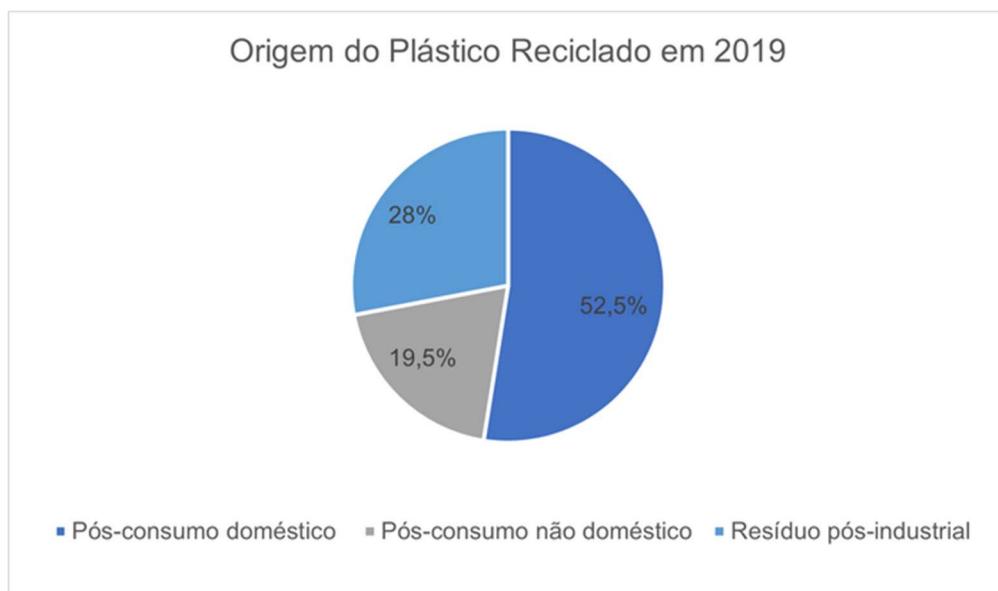
As figuras 8 e 9 mostram a origem do plástico reciclado em 2018 e em 2019, respectivamente, segundo o PICPlast. É possível notar que a menor porcentagem, em ambos os anos, é referente a resíduos pós-industriais.

Figura 8 — Origem do Plástico reciclado em 2018



Fonte: O autor (2022).

Figura 9 — Origem do Plástico reciclado em 2019.



Fonte: O autor (2022).

3.7 PROCESSO DE EXTRUSÃO E INJEÇÃO DE POLÍMEROS

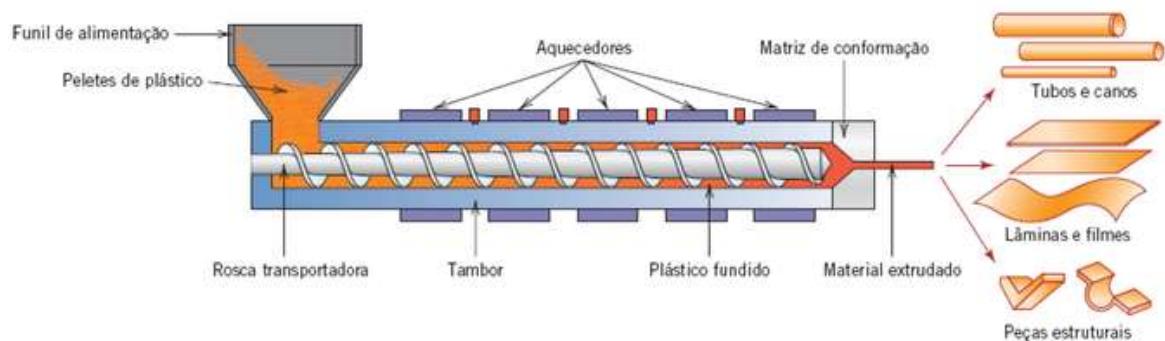
A injeção e extrusão de polímeros estão entre os métodos mais comuns de moldagem de polímeros plásticos. Em ambas as técnicas o polímero em forma de grânulos ou peletes é submetido a uma alta temperatura e pressão, as quais fazem o material escoar para o interior do equipamento, preenchendo e assumindo a forma da cavidade de um molde (CALLISTER, 2012).

Na extrusão, o material polimérico é inserido através do funil e transportado até a rosca ou parafuso sem fim. Nessa etapa o material é transportado através de um cilindro, o qual é aquecido por resistências elétricas. Nessa etapa o material é compactado, fundido e conformado, conforme passa pelas três zonas da rosca (alimentação, compressão e dosagem). (CALLISTER, 2012). O perfil da rosca, a velocidade de rotação e a temperatura de fusão do material utilizados são parâmetros importantes para a extrusão e que devem ser observados (CÂNDIDO, 2011).

Por fim o material é forçado através de um orifício da matriz, ocorrendo assim a extrusão. O material extrudado é solidificado através de sopradores de ar, borriço de água ou por um banho. Os materiais que são gerados através dessa técnica são

segmentos contínuos com seção transversal de geometria constante, como barras, tubos, filamentos, etc (CALLISTER, 2012).

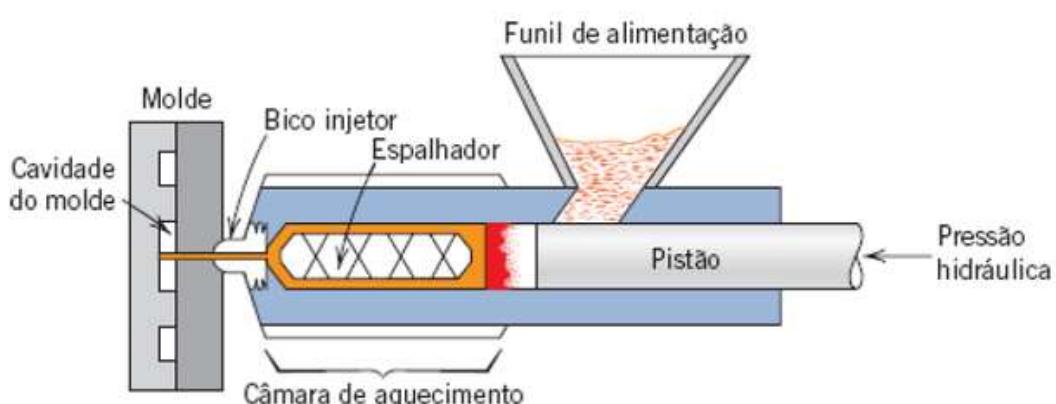
Figura 10 — Diagrama esquemático de uma extrusora



Fonte: CALLISTER (2012).

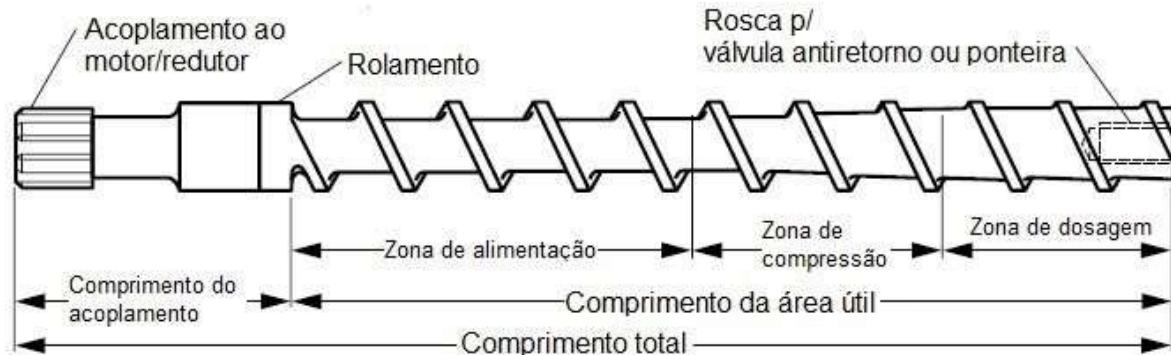
Já na injeção, o material é alimentado por uma moega, a qual o transporta para dentro do cilindro ou canhão. Lá o polímero é empurrado, por um pistão, êmbolo ou rosca, para uma câmera de aquecimento, onde é forçado ao redor de um espalhador. Nessa etapa o material se funde e através do bico injetor, o qual faz a conexão entre o canhão e a bucha do molde, é empurrado para o interior da cavidade do molde. Após a solidificação da peça, o molde se abre e a peça é ejetada (CALLISTER, 2012) e (CÂNDIDO, 2011).

Figura 11 — Diagrama esquemático de um equipamento de moldagem por injeção



Fonte: CALLISTER (2012).

Figura 12 — Rosca utilizada no processo de injeção e extrusão



Fonte: A INJETORA (2022).

A grande diferença entre a injeção e a extrusão está na movimentação da rosca, no caso na extrusão a rosca gira, sendo a pressão gerada pela diminuição dos sulcos presentes em cada zona. Já na injeção, a rosca se movimenta para frente e para trás, comprimindo o material fundido (HARPER, 2003 apud A EXTRUSORA).

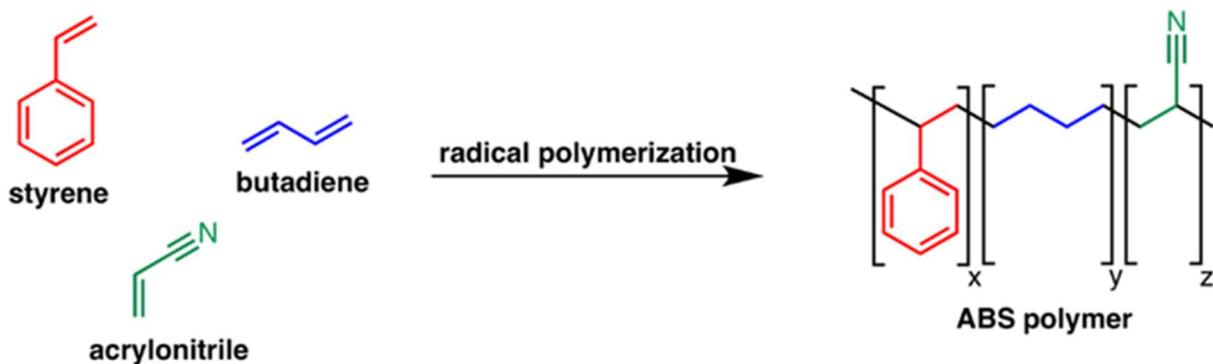
3.8 ABS (ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO)

Desenvolvido em 1948 nos EUA, o ABS (acrilonitrila butadieno estireno) é terpolímero de engenharia, com características termoplásticas, sendo formado por três monômeros: a acrilonitrila (entre 15% a 35%) e o estireno (45% a 75%) que são componentes termoplásticos amorfos e o butadieno (entre 5% a 30%) um elastômero. O ABS é composto por duas fases, uma sendo a fase amorfá de copolímero de SAN (acrilonitrila e estireno), a matriz, na qual a fase de borracha de polibutadieno está dispersa (BALDERAS, 2003)

A presença e quantidade de cada um desses monômeros contribui para a formação das propriedades do ABS. A presença de acrilonitrila influencia na resistência térmica e química, resistência à fadiga, dureza e rigidez. Já o estireno é responsável pelo fácil processamento, o brilho, a dureza e a rigidez, enquanto o butadieno gera ductilidade a baixa temperatura, resistência ao impacto, estabilidade térmica e bom acabamento artificial (BALDERAS, 2003). Então, um aumento no teor do butadieno leva a um aumento na resistência ao impacto, mas abaixa o fluxo, diminuindo também a processabilidade. Já um aumento no teor do estireno, causa

um efeito contrário, ou seja, gera um melhor fluxo e processabilidade, mas abaixa a resistência ao impacto (ROSA, 2011).

Figura 13 — Esquema com monômeros, polimerização e estrutura do ABS.



Fonte: PLÁSTICO (2022).

De acordo com Carvalho (2009 apud CÂNDIDO, 2011), devido a presença de três monômeros diferentes no ABS, têm-se três temperaturas distintas de início de degradação, sendo elas 340°C para o butadieno, 350°C para o estireno e 400°C para a acrilonitrila.

O ABS é fornecido, na maioria das vezes na forma de grânulos, podendo ser de diversas cores e pode ser obtido por três métodos:

- Mistura de polímeros: Esse método consiste em misturar mecanicamente um copolímero de SAN e dispersá-lo em butadieno-acrilonitrila (BAN). As proporções utilizadas são de 60 a 70 partes de SAN com 40 a 30 partes de BAN, sendo que as quantidades utilizadas de cada um vão depender das propriedades que se deseja conseguir. Esse método é utilizado para aplicações que necessitam de boa aparência e resistência a produtos químicos (BALDERAS, 2003).
- Copolimerização do tipo enxerto: O ABS nesse método é obtido através da polimerização em emulsão de SAN na presença de polibutadieno (PB) ou de BAN. Esse processo resulta em um ABS de alto brilho, excelente impacto, fluidez, com alta resistência à tração. Comparado com o método anterior, há uma compatibilidade e homogeneidade entre as fases muito maior. (BALDERAS, 2003).

- Terpolimerização simultânea: É a mistura direta dos três monômeros. Esse método gera uma resistência ao impacto e tenacidade menor do que os métodos anteriores. (BALDERAS, 2003).

3.9 RECICLABILIDADE DO ABS

O ABS pode ser reciclado através da reciclagem mecânica sem que ocorram grandes perdas de propriedades. No entanto, os ciclos de reprocessamento podem provocar degradação termoxidativa ou termomecânica, o que gera uma redução nas propriedades mecânicas (BALDERAS, 2003) e (BOSQUETTI et al, 2013).

A degradação do ABS está ligada a presença de borracha (butadieno), que possui cadeias insaturadas, as quais em contato com raios luminosos são degradadas e formam grupos cromóforos que geram o amarelamento da superfície. Assim, quanto maior a quantidade de polibutadieno, maior será a quantidade de insaturações nas moléculas, e consequentemente maior será a tendência a degradação (AGOSTINI, 2018).

Segundo a literatura, apesar de reciclável o ABS tem uma perda de propriedades severa após cinco ciclos de reciclagem (moagem e injeção). Em ensaios realizados por Rahimi, Esfahanian e Moradi (2014 apud AGOSTINI, 2018), é possível dizer que o reprocessamento afeta principalmente a resistência ao impacto, a qual diminui conforme o polímero era submetido a mais ciclos. Isso ocorre principalmente devido à quebra dos laços de polibutadieno.

4 MATERIAIS E METODOLOGIA

4.1 MATERIAIS

Para a realização deste trabalho foi utilizado ABS virgem cedido por uma empresa fabricante de eletrodomésticos no interior de São Paulo. O ABS reciclado foi obtido através de peças que não atenderam às especificações nessa mesma empresa. O material foi moído, readitivado com um Master e peletizado em uma empresa parceira.

Foi avaliado como o ABS reciclado se porta quando comparado ao ABS virgem, levando em conta a utilização em um item injetado de aspecto visual.

4.2 INJEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram injetados em uma injetora MJ35, segundo as especificações das normas dos ensaios mecânicos. Foram injetados 30 corpos de prova de tração e 60 corpos de prova de flexão para cada material. A tabela 2 mostra os parâmetros de injeção utilizados.

Tabela 2 — Parâmetros utilizados na injeção dos corpos de prova

Parâmetro	Valor
Temperatura de Injeção (°C)	180 a 210
Velocidade de Injeção (%)	30
Pressão de Injeção (%)	50
Tempo de Injeção (s)	2
Velocidade /Pressão de contrapressão (%)	60
Tempo de contrapressão (s)	4
Tempo de resfriamento (s)	14

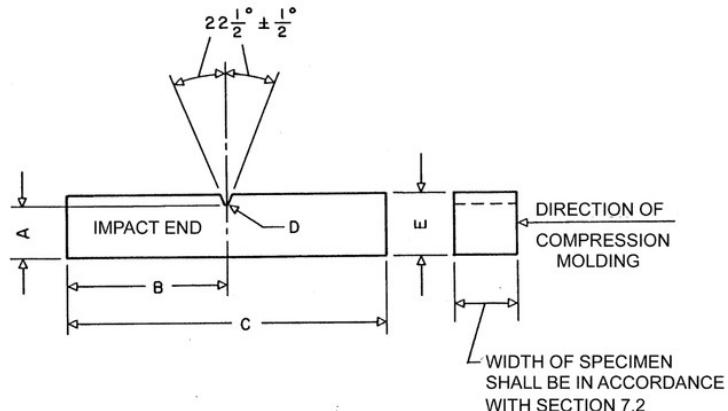
Fonte: O autor (2022).

4.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Devido à presença de marcas de fluxo em alguns corpos de prova, foi realizada uma seleção após a injeção, onde esses materiais foram descartados para que não ocorressem alterações nos resultados dos ensaios.

Os corpos de prova que foram utilizados nos ensaios de impacto foram produzidos a partir do corte do corpo de prova de flexão, no qual foi realizado um entalhe de 2,54mm conforme pedido na ASTM D256-02 (figura 14).

Figura 14 — Corpo de prova para ensaio de flexão conforme ASTM D256-02



Fonte: ASTM D256-02.

A tabela 3 mostra a relação final de corpos de prova.

Tabela 3 — Relação da quantidade final dos corpos de prova

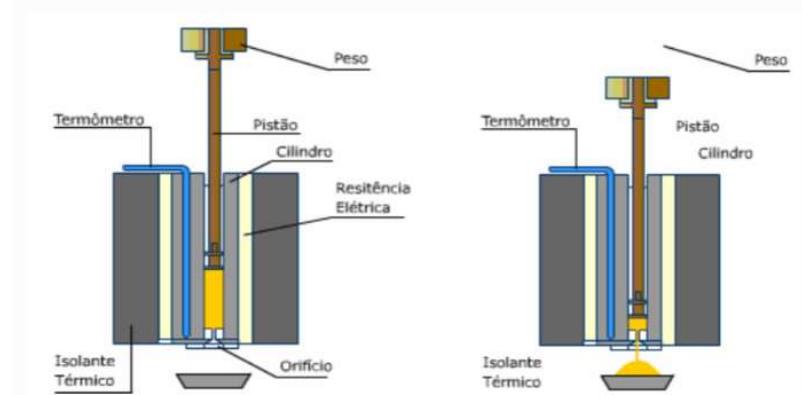
Corpo de prova	ABS Virgem	ABS Reciclado
Tração	14	14
Flexão	14	14
Impacto	20	20

Fonte: O autor (2022).

4.4 ÍNDICE DE FLUIDEZ

O índice de fluidez é um ensaio feito através de um plastômetro (figura 15) e a partir dos resultados obtidos é possível entender a facilidade de fluxo do polímero. Assim, quanto maior o índice de fluidez, menor será a viscosidade. Além disso, o tipo de cadeia presente no polímero exerce influência nesse valor; por exemplo, cadeias poliméricas ramificadas diminuem o índice de fluidez, visto que as ramificações levam a resistência à deformação plástica. A realização desse ensaio é importante já que funciona como parâmetro de controle de qualidade para os processos de injeção e extrusão (BRUCK, 2022).

Figura 15 — Desenho esquemático de plastômetro utilizado em Ensaio de Índice de Fluidez (IF ou MFI).



Fonte: VIDAL et al. (2018).

O ensaio foi realizado conforme a ASTM D1238, na mesma empresa em que os corpos de prova foram injetados. O método de teste utilizado foi o método A, no qual o material extrudado foi cortado e pesado. Para a realização do ensaio foi utilizado um Plastômetro (figura 16) com os parâmetros mostrados na tabela 4.

Figura 16 — Plastômetro utilizado para determinar o Índice de Fluidez



Fonte: O autor (2022).

Tabela 4 — Parâmetros utilizados no ensaio de fluidez.

Parâmetro	Valor
Temperatura (°C)	200
Carga total incluindo o pistão (g)	5000
Pressão aproximada (kgf/cm ³)	7,03

Fonte: O autor (2022).

O índice de fluidez foi calculado conforme a relação à abaixo:

$$I.F = \frac{600 \times M}{T} \quad (1)$$

Na qual:

I.F. = índice de fluidez

600 = fator para conversões pertinentes

M = Massa média dos extrudados (g)

T = intervalo de tempo (s)

4.5 ENVELHECIMENTO TÉRMICO

O ensaio de envelhecimento térmico consiste em colocar amostras em uma estufa com temperatura controlada durante um certo período de tempo. Para que o ensaio pudesse ser realizado, foi realizada a separação dos corpos de prova conforme a tabela 5. Os corpos chamados de “Zero hora” não foram ao envelhecimento térmico, enquanto que os corpos “Envelhecidos” foram submetidos ao ensaio térmico.

Tabela 5 — Separação dos corpos de prova para os ensaios

Corpo de prova	ABS Virgem		ABS Reciclado	
	Zero hora	Envelhecido	Zero hora	Envelhecido
Tração	7	7	7	7
Flexão	7	7	7	7
Impacto	10	10	10	10

Fonte: O autor (2022).

Para que não ocorresse mistura entre os corpos de prova, foi preciso fazer dois pequenos riscos nos corpos de ABS virgem e um pequeno risco nos corpos provindo do ABS reciclado. Após essa etapa, os corpos de prova foram posicionados em uma bandeja metálica (figura 17) e colocados em uma estufa da marca QUIMIS a 70°C e 500h. Para realizar os testes mecânicos nos corpos envelhecidos, foi necessário aguardar 24 horas.

Figura 17 — Bandeja com corpos de prova para teste de envelhecimento



Fonte: O autor (2022).

4.6 ANÁLISE DO BRILHO

O brilho, obtido após injeção dos itens, foi medido no Brilhômetro 60° GARDNER, modelo ZGM 1020 (figura 18) e com ângulo de incidência do feixe em 60°. A cada medição foi anotado o intervalo de brilho (mínimo e máximo).

Para o brilho do material ser considerado OK, precisa estar acima de 80 u.b. (unidades de brilho).

Figura 18 — Brilhômetro 60° GARDNER



Fonte: O autor (2022).

4.7 ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO – QUV - B

Para realização do ensaio de envelhecimento UVB foram injetados dois itens de aspecto visual, sendo um deles utilizando o ABS virgem e outro utilizando o ABS reciclado.

O ensaio foi realizado conforme a ASTM – G154 em uma câmera de envelhecimento QUV-B da marca ADEXIM/COMEXIM, conforme figura 19. As lâmpadas utilizadas eram UV-B TL-40W (313 nm) e tinham menos de 1200h de uso (figura 20).

Figura 19 — Câmera de envelhecimento QUV-B



Fonte: O autor (2022).

Figura 20 — Lâmpada UV-B TL-40W



Fonte: O autor (2022).

A temperatura de ensaio no equipamento foi de 50°C com 200 horas de irradiação contínua. Em relação as amostras foram feitas amostras de ABS Virgem e amostras de ABS reciclado, de acordo com os parâmetros mostrados na tabela 6.

Tabela 6 — Parâmetros utilizados para amostras do teste de envelhecimento acelerado QUV-B

Parâmetro	Valor
Comprimento (mm)	80 a 120
Largura (mm)	40 a 70
Espessura (mm)	0,5 a 4

Fonte: O autor (2022).

Antes de serem colocadas na câmera de envelhecimento, foi realizada a avaliação inicial de cor das amostras utilizando um Espectrofotômetro Colorimétrico com lâmpada D65/10° com componente especular inclusa (figura 21). Com esse aparelho é realizada a determinação dos parâmetros DL, Da, Db e DE, conforme o sistema CIELAB de cores.

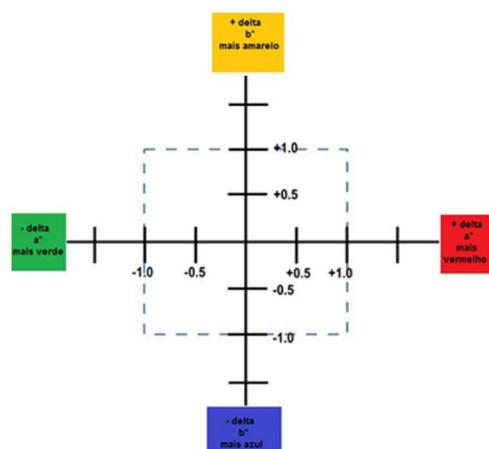
Figura 21 — Espectrofômetro Colorimétrico



Fonte: O autor (2022).

O CIELAB é um espaço $L^*a^*b^*$ utilizado para comunicação e expressão de cores, que foi elaborado pela CIE (Commission Internationale de l'Eclairage). Nesse sistema o L^* indica a luminosidade, enquanto o a^* e o b^* são as coordenadas cromáticas. Mais especificamente o a^* indica a coordenada vermelho/verde, sendo que $+a$ indica vermelho e $-a$ indica verde. De forma semelhante, o b^* indica a coordenada amarelo/azul ($+b$ indicando amarelo e $-b$ indicando azul). A partir disso são obtidos os deltas relacionados a cada parâmetro (DL , Da , Db), a partir dos quais é obtido o DE , que indica a diferença total de cor (tabela 7) (KONICA MINOLTA, 2013).

Figura 22 — Sistema CIELAB de cores



Fonte: KONICA MINOLTA (2013).

Após isso as amostras foram dispostas no equipamento (figuras 23 e 24).

Figura 23 — Amostras de ABS posicionadas para o ensaio QUV-B.



Fonte: O autor (2022).

Figura 24 — Visão geral das amostras no ensaio QUV-B.



Fonte: O autor (2022).

As retiradas das amostras foram feitas em 25 horas, 50 horas, 75 horas, 100 horas, 150 horas, 175 horas e 200 horas. Conforme as amostras eram retiradas, realizava-se a leitura de cor em relação à cor inicial do corpo de prova. A tabela 7 mostra as fórmula utilizadas nos cálculos de DE.

Tabela 7 — Fórmulas para cálculo de DE.

Parâmetro	Cálculo
DL	$L_{final} - L_{inicial}$
Da	$a_{final} - a_{inicial}$
Db	$b_{final} - b_{inicial}$
DE	$(DL^2 + Da^2 + Db^2)^{1/2}$

Fonte: O autor (2022).

4.8 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração é um ensaio destrutivo, no qual o corpo de prova é submetido a um esforço axial até sua ruptura (ROSA, 2011). Através dele é possível analisar propriedades mecânicas como o limite de escoamento, módulo de Young e ductilidade, bem como avaliar as mudanças que ocorreram no material após ele ser reciclado (CALLISTER, 2012).

O teste foi realizado conforme a ASTM D638 no aparelho universal EMIC 23-20 da INSTRON (figura 25) e os resultados foram obtidos através do uso do programa Blue Hill.

Para iniciar o ensaio, a máquina foi preparada com as garras da célula de carga de 200 N e em seguida calibrada no programa. Com auxílio de um paquímetro foi medida a largura e espessura dos corpos de prova. Esses valores foram inseridos no programa. Também foi medida a distância entre as garras, esse procedimento foi realizado para todos os corpos de prova que serviram de ensaio no teste de tração. A velocidade escolhida para o ensaio foi de 2mm/min. A figura 26 mostra o corpo de prova posicionado para ensaio.

Figura 25 — Aparelho universal EMIC preparado para ensaio de tração



Fonte: O autor (2022).

Figura 26 — Aparelho universal EMIC com corpo de prova de tração



Fonte: O autor (2022).

4.9 ENSAIO DE FLEXÃO

O ensaio de flexão em três pontos foi realizado conforme a ASTM D790. Assim como no ensaio de tração, para o teste foram utilizados o aparelho universal EMIC 23-20 da INSTRON (figura 27) e o programa Blue Hill.

Para iniciar o ensaio, a máquina foi preparada com célula de carga de 200 N e em seguida calibrada no programa. Também foi medida a largura e espessura do corpo de prova com o auxílio de um paquímetro, obtendo-se os valores de 3,10 mm para espessura e 12,50 mm para a largura

Figura 27 — Aparelho universal EMIC preparado para ensaio de flexão



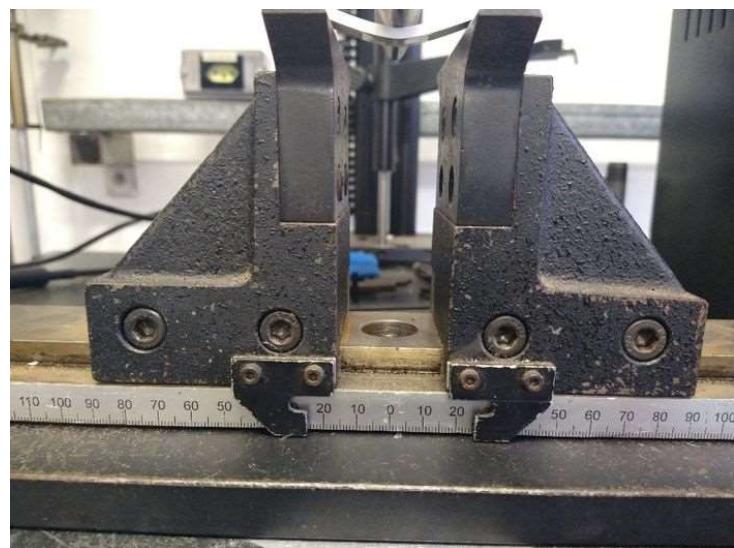
Fonte: O autor (2022).

Para obter a distância que seria utilizada no apoio, foi necessário multiplicar por 16 o valor encontrado na espessura, obtendo-se o valor de 49,6 mm. Esse valor

foi dividido por dois e distribuído no apoio (figura 28). Após isso o corpo de prova foi posicionado na máquina (figura 29) e iniciado o teste com velocidade de 2mm/min.

Através desse ensaio é possível obter o módulo de flexão secante 1% (Mpa) e a força máxima (kgf).

Figura 28 — Apoio com valor calculado e distribuído



Fonte: O autor (2022).

Figura 29 — Corpo de prova de flexão posicionado no Aparelho universal EMIC



Fonte: O autor (2022).

4.10 ENSAIO DE IMPACTO IZOD

O ensaio de impacto foi realizado conforme a ASTM D256. O ensaio foi realizado na máquina CEAST 9050 da INSTRON (figura 30).

Para que o ensaio fosse feito, foi necessário ajustar o manômetro com pressão de 5 bar. Após isso a máquina foi ligada e calibrada com um martelo de 0,5 J. Para certificar que era o martelo correto, um corpo de prova foi colocado e o pêndulo foi liberado. Teve-se como resultado que a energia (J) absorvida pelo corpo de prova foi de 99%. Como, segundo a ASTM D256, a energia (J) absorvida no impacto deve ser de 10% a 90%, o martelo de 0,5 J foi trocado por um martelo de 1 J. Assim, a máquina foi calibrada novamente e os corpos de prova foram testados, já que, após a troca do martelo, a energia absorvida estava dentro do estabelecido pela ASTM D256.

Figura 30 — Máquina CEAST 9050 da INSTRON



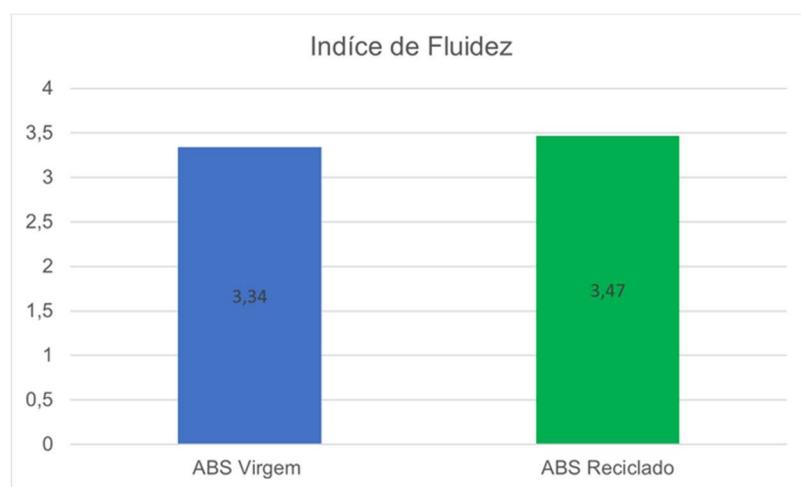
Fonte: O autor (2022).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ÍNDICE DE FLUIDEZ

A figura 31, mostra os resultados obtidos para o índice de fluidez das amostras de ABS. O índice de fluidez aumentou em 4%, o que indica que o material reciclado é menos viscoso. Como a massa molar está diretamente relacionada a viscosidade, com esse resultado, pode-se notar que houve uma pequena degradação do polímero durante a reciclagem (AGOSTINI, 2018). Como dito anteriormente, a massa molar interfere diretamente nas propriedades do polímero, como resistência ao impacto (CANEVAROLO, 2013) e (CALLISTER, 2012).

Figura 31 — Resultados dos índices de fluidez



Fonte: O autor (2022).

5.2 ANÁLISE DO BRILHO

Na tabela 8 estão os resultados de brilho para as amostras. Pode-se notar que tanto a amostra virgem quanto a reciclada apresentam brilhos dentro do que é considerado conforme (maior que 80 u.b.), não ocorrendo variações consideráveis.

Tabela 8 — Resultados da medição do brilho realizada nas amostras

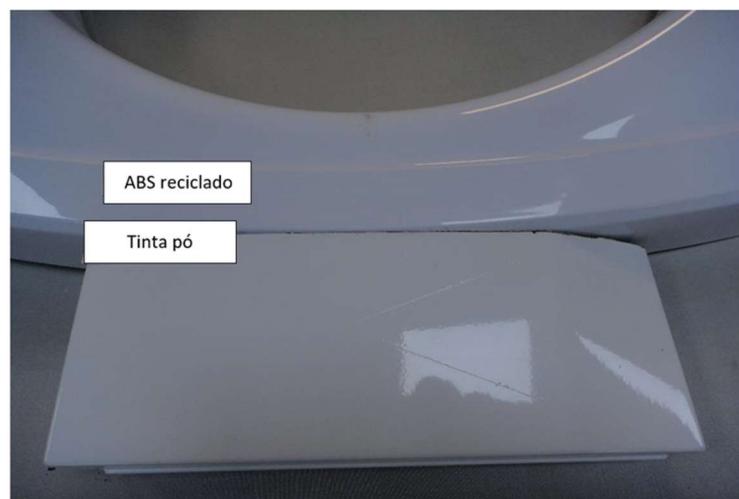
Amostra	Peça-1 Brilho 60°	Peça-2 Brilho 60°	Peça-3 Brilho 60°	Peça-4 Brilho 60°
ABS Virgem	89,6 a 90,7 u.b.	88,9 a 91,4 u.b.	90,1 a 91,3 u.b.	89,8 a 90,5 u.b.
ABS Reciclado	88,7 a 90,5 u.b.	90,3 a 91,5 u.b.	89,8 a 90,8 u.b.	89,9 a 90,6 u.b.

Fonte: O autor (2022).

5.3 ENVELHECIMENTO ACELERADO – QUV - B

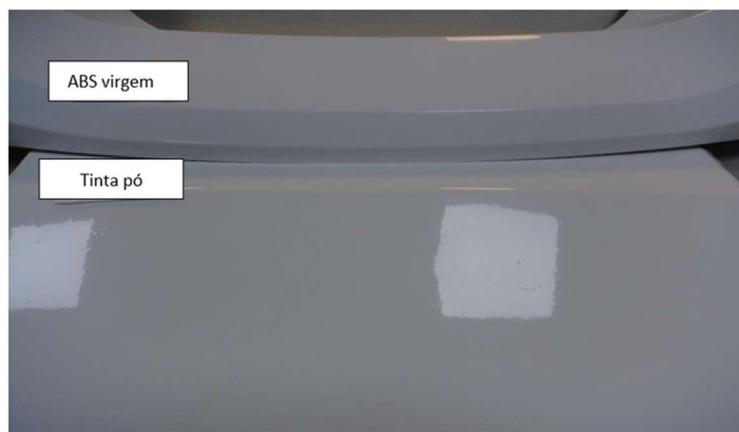
Foi observado que as amostras de ABS reciclado estavam mais azuladas do que as do material virgem, o que gerou uma diferença entre as cores de outros itens do produto (figuras 32 e 33). A amostra também estava com um Db negativo entre -1,17 a -1,36. Isso resultou em um DE maior que 0,8, (tabela 10) que é o valor máximo utilizado na empresa em peças injetadas. Esse resultado deve-se ao master utilizado na aditivação.

Figura 32 — Comparação de tonalidade entre a peça injetada com ABS reciclado e outro item do produto



Fonte: O autor (2022).

Figura 33 — Comparação de tonalidade entre a peça injetada com ABS virgem e outro item do produto



Fonte: O autor (2022).

Tabela 9 — Tabela com resultados obtidos do ABS virgem

Peça-1 Cor CIELab	Peça-2 Cor CIELab	Peça-3 Cor CIELab	Peça-4 Cor CIELab
DL = -0,01	DL = -0,02	DL = -0,21	DL = -0,39
Da = -0,01	Da = -0,00	Da = -0,04	Da = -0,04
Db = -0,67	Db = -0,62	Db = -0,34	Db = -0,33
DE = 0,67	DE = 0,62	DE = 0,42	DE = 0,51

Fonte: O autor (2022).

Tabela 10 — Tabela com resultados obtidos do ABS reciclado

Peça-1 Cor CIELab	Peça-2 Cor CIELab	Peça-3 Cor CIELab	Peça-4 Cor CIELab
DL = -0,65	DL = -0,33	DL = -0,36	DL = -0,33
Da = -0,09	Da = -0,07	Da = -0,07	Da = -0,10
Db = -1,17	Db = -1,24	Db = -1,36	Db = -1,36
DE = 1,34	DE = 1,29	DE = 1,41	DE = 1,40

Fonte: O autor (2022).

Os resultados obtidos das amostras no teste de QUV-B estão nas tabelas 11 (ABS virgem) e 12 (ABS reciclado). A figura 34, mostra a evolução do amarelamento com o passar das horas.

Tabela 11 — Resultados de amarelamento para ABS virgem

Tempo	15h	25h	50h	75h	100h	125h	150h	175h	200h
DL	-0,34	-0,67	-0,79	-0,95	-1,39	-1,99	-2,62	-2,98	-4,14
Da	-0,75	-1,03	-1,75	-1,94	-2,25	-2,54	-2,48	-2,59	-1,50
Db	2,90	4,33	7,46	8,57	11,12	14,61	17,81	19,54	22,53
DE	2,98	4,50	7,70	8,84	11,43	14,97	18,17	19,91	22,95

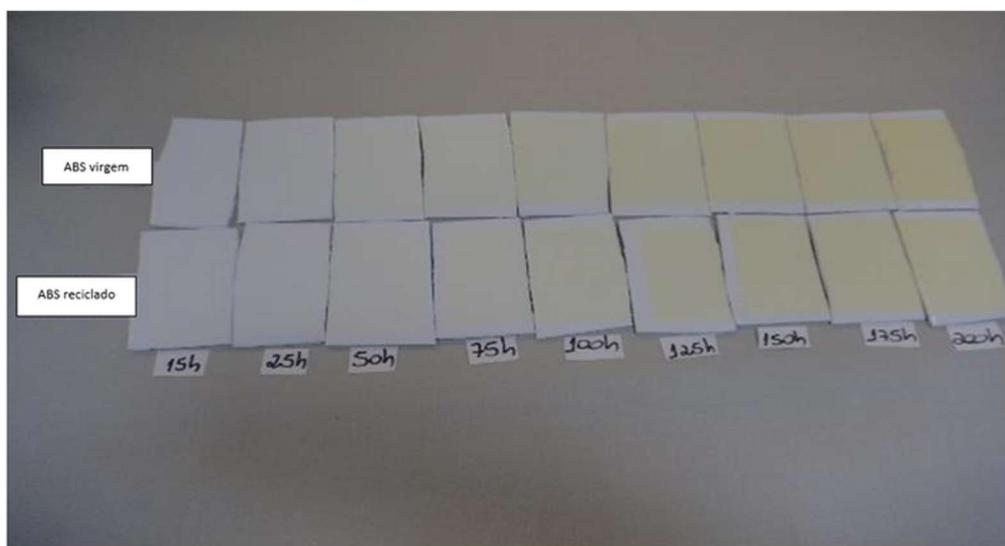
Fonte: O autor (2022).

Tabela 12 — Resultados de amarelamento para ABS reciclado

Tempo	15h	25h	50h	75h	100h	125h	150h	175h	200h
DL	-0,33	-0,42	-0,53	-0,92	-1,64	-2,09	-2,46	-2,64	-3,41
Da	-0,82	-0,90	-1,57	-1,79	-2,19	-2,39	-2,34	-2,31	-1,97
Db	3,38	3,98	6,65	8,01	12,20	15,22	17,42	18,68	21,24
DE	3,49	4,10	6,85	8,26	12,50	15,55	17,75	19,01	21,60

Fonte: O autor (2022).

Figura 34 — Amarelamento em amostras de ABS virgem e de ABS reciclado



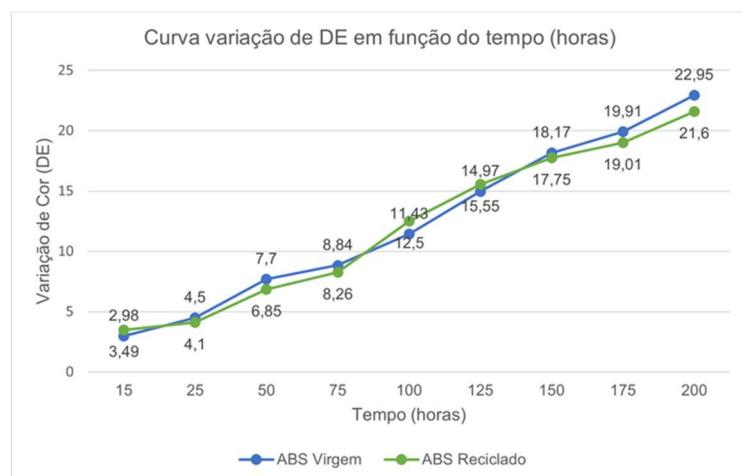
Fonte: O autor (2022).

Observando os dados, é possível notar que tanto as amostras de ABS virgem quanto as amostras de ABS reciclado apresentaram boa resistência ao envelhecimento até as primeiras 50 horas de teste; após esse período, tornaram-se mais amareladas.

Conforme dito neste trabalho, o amarelamento do ABS ocorre devido a degradação do butadieno pelos raios luminosos, formando grupos cromóforos que levam a esse feito na superfície do polímero (AGOSTINI, 2018).

Ao compararmos os resultados obtidos de DE é possível notar que ambas as amostras apresentaram um processo de amarelamento similar, conforme a figura 35.

Figura 35 — Evolução de DE nas amostras



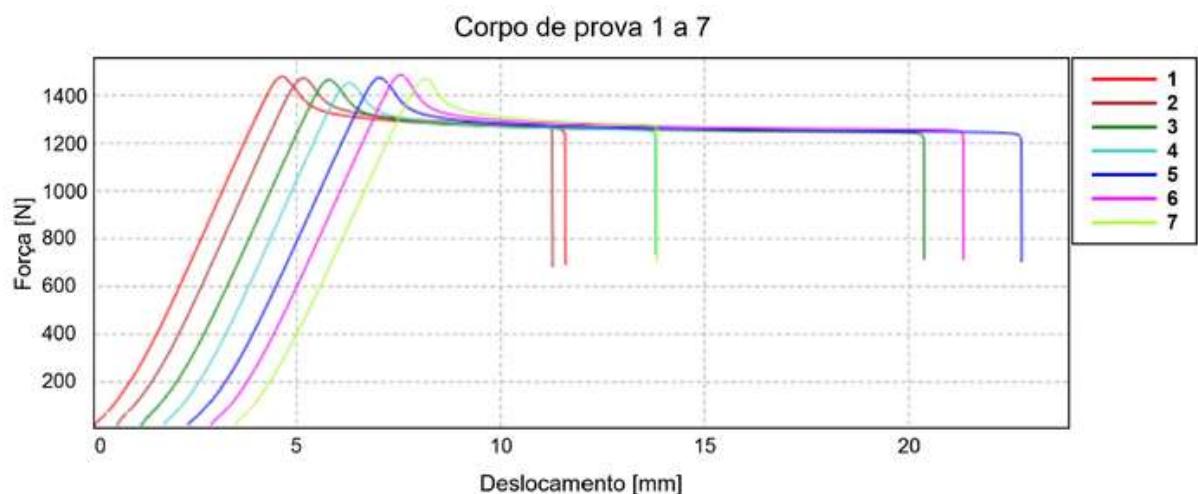
Fonte: O autor (2022).

5.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

5.4.1 Amostras a zero hora

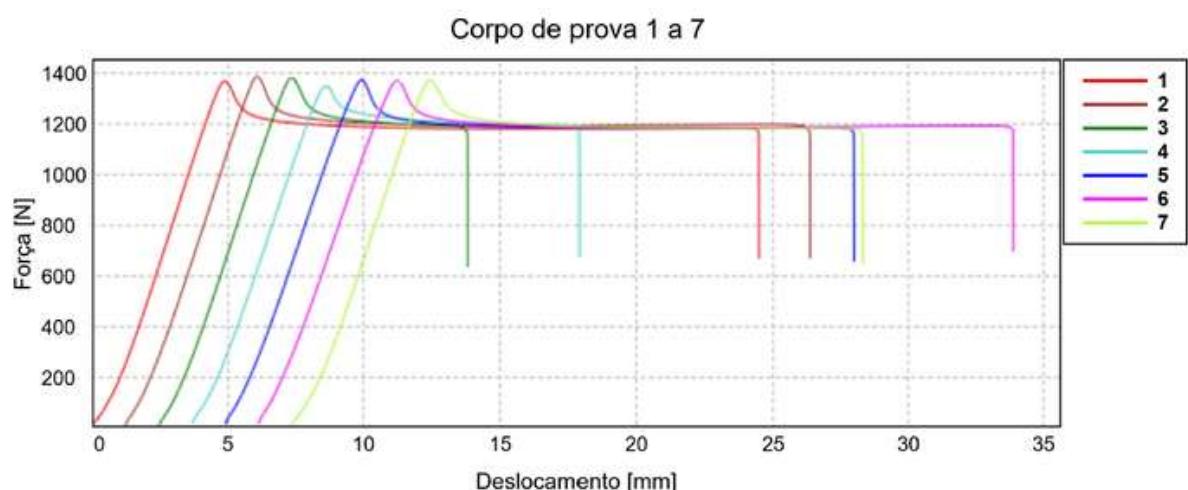
A figura 36 mostra as curvas obtidas no teste de tração do material virgem a zero hora. Por sua vez, a figura 37 mostra as curvas obtidas no teste de tração do material reciclado a zero hora. A tabela 13 mostra as médias feitas a partir dos dados das amostras de ABS, junto com seus desvios padrões.

Figura 36 — Curvas obtidas no teste de tração para o ABS virgem a zero hora



Fonte: O autor (2022).

Figura 37 — Curvas obtidas no teste de tração para o ABS reciclado a zero hora



Fonte: O autor (2022).

Tabela 13 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de tração dos corpos a zero hora.

Amostras ABS	Tensão no Escoamento 0,20%	Tensão Força Máxima [MPa]	Deformação Força Máxima [%]	Módulo de Young [MPa]
Zero Hora	[MPa]			
Virgem	$37,93 \pm 0,35$	$37,98 \pm 0,37$	$3,51 \pm 0,04$	1291 ± 10
Reciclado	$35,44 \pm 0,28$	$35,47 \pm 0,31$	$3,52 \pm 0,04$	1179 ± 22

Fonte: O autor (2022).

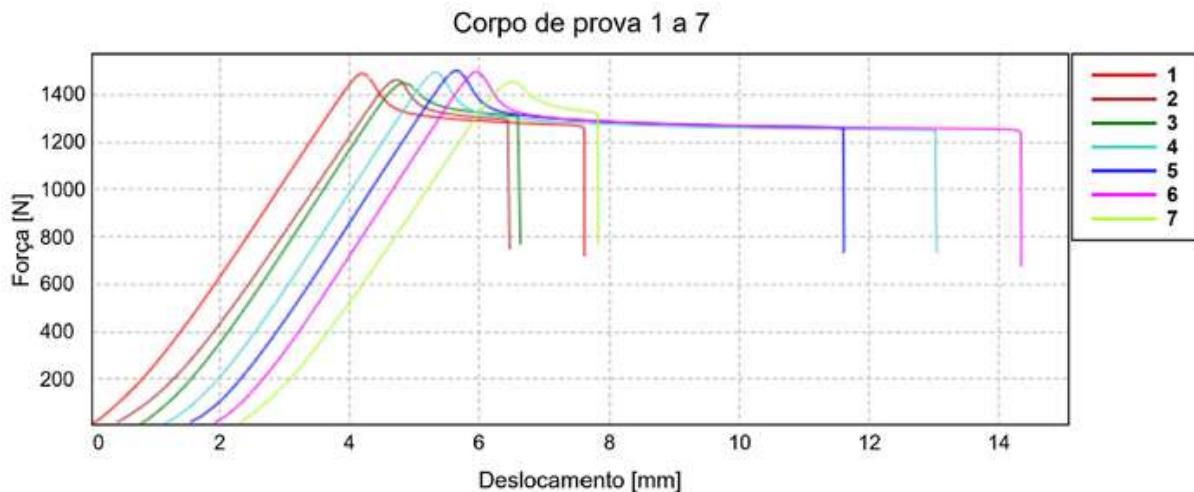
Pode-se notar que a reciclagem não teve efeito significativo no módulo de Young, já que o material reciclado apresentou uma queda de somente 9% quando comparado com o virgem. Essa alteração no módulo elástico mostra que o material se tornou menos rígido após a reciclagem e aditivação, o que pode ser explicado por uma degradação da acrilonitrila e do estireno, que são os monômeros que conferem maior rigidez ao material (BALDERAS, 2003).

A tensão de escoamento também apresentou uma leve diminuição de 7%, sem apresentar uma alteração na deformação do escoamento. Apesar de pequeno, esse resultado mostra que pode ter ocorrido um alongamento das cadeias de estireno e acrilonitrila, gerando uma menor densidade de emaranhamento, o que resultou em uma diminuição na capacidade de suportar tensões mais altas. Assim como a tensão no escoamento, a tensão na força máxima, apresentou uma diminuição de 7%.

5.4.2 Amostras pós envelhecimento térmico a 70°C e 500h

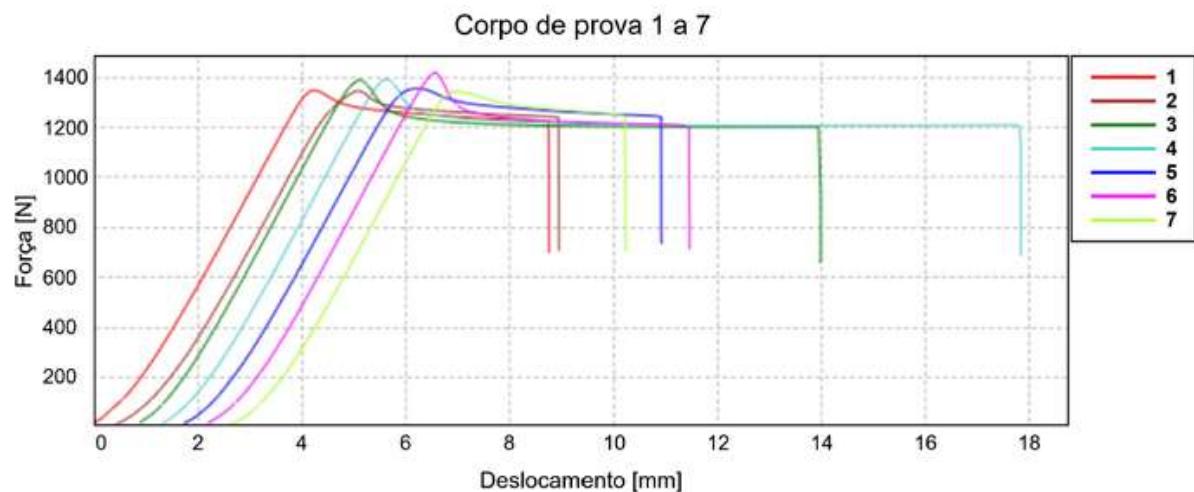
A figura 38 apresenta as curvas obtidas no teste de tração do material virgem após o envelhecimento. A figura 39 mostra as curvas obtidas no teste de tração do material reciclado também após ser submetido ao envelhecimento.

Figura 38 — Curvas obtidas no teste de tração para o ABS virgem envelhecido



Fonte: O autor (2022).

Figura 39 — Curvas obtidas no teste de tração para o ABS reciclado envelhecido



Fonte: O autor (2022).

Quando realizamos a comparação entre as amostras virgens a zero hora e as amostras virgens envelhecidas (tabela 14), vemos que houve um pequeno aumento no módulo de Young (6%) no ABS que foi envelhecido, mostrando que o material se tornou mais rígido. Apesar de não ser tão significativa, quando é levado em conta a aplicação final do item, a deformação na força máxima do reciclado também sofreu uma queda (9%). Essas alterações nas deformações podem ser atribuídas a degradação do butadieno durante o envelhecimento térmico.

É possível notar um comportamento similar quando fazemos a comparação entre as amostras recicladas a zero hora e as envelhecidas (tabela 15).

No entanto, nesse grupo houve um aumento ligeiramente maior do módulo de Young (11%).

Tabela 14 — Média dos resultados obtidos no ensaio de tração para o ABS virgem zero hora e envelhecido

Amostras ABS	Tensão no Escoamento 0,20%	Tensão Força Máxima [MPa]	Deformação Força Máxima [%]	Módulo de Young [MPa]
Virgem	[MPa]			
Zero hora	$37,93 \pm 0,35$	$37,98 \pm 0,37$	$3,51 \pm 0,04$	1291 ± 10
Envelhecido	$37,33 \pm 0,42$	$37,69 \pm 0,58$	$3,21 \pm 0,08$	1371 ± 24

Fonte: O autor (2022).

Tabela 15 — Média dos resultados obtidos no ensaio de tração para o ABS reciclado zero hora e envelhecido

Amostras ABS	Tensão no Escoamento 0,20%	Tensão Força Máxima [MPa]	Deformação Força Máxima [%]	Módulo de Young [MPa]
Reciclado	[MPa]			
Zero hora	$35,44 \pm 0,28$	$35,47 \pm 0,31$	$3,52 \pm 0,04$	1179 ± 22
Envelhecido	$35,16 \pm 0,76$	$35,34 \pm 0,76$	$3,33 \pm 0,11$	1304 ± 15

Fonte: O autor (2022).

Nessa perspectiva, ao comparar as amostras virgens envelhecidas e as amostras recicladas envelhecidas (tabela 16), pode-se notar um comportamento similar ao que foi encontrado no tópico anterior (comparação entre os corpos virgens e reciclados a zero hora). Ou seja, o módulo de Young apresentou uma pequena queda de 5% no reciclado, tornando-se menos rígido. Essa leve diminuição mostra que houve uma variação muito pequena nas propriedades do material reciclado em relação ao virgem.

Também nota-se que a tensão de escoamento apresentou uma leve diminuição de 6%, ao passo que ocorreu um aumento de 4% na deformação na força máxima, ou seja, o material reciclado envelhecido, conseguiu se alongar um pouco mais. Como dito anteriormente, a diminuição da tensão de escoamento, provavelmente se deve a um alongamento das cadeias e estireno e acrilonitrila (menor densidade de emaranhamento) na amostra do reciclado, que faz com que o polímero não suporte tensões mais altas.

A tensão na força máxima, também apresentou uma diminuição de 6%. Esse valor é melhor do que o encontrado quando comparamos o ABS virgem e reciclado a zero hora, o que pode ser atribuído a degradação do butadieno no envelhecimento. (AGOSTINI, 2018)

Tabela 16 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de tração dos corpos envelhecidos.

Amostra ABS Envelhecida	Tensão no Escoamento 0,20% [MPa]	Tensão Força Máxima [MPa]	Deformação Força Máxima [%]	Módulo de Young [MPa]
Virgem	$37,33 \pm 0,42$	$37,69 \pm 0,58$	$3,21 \pm 0,08$	1371 ± 24
Reciclado	$35,16 \pm 0,76$	$35,34 \pm 0,76$	$3,33 \pm 0,11$	1304 ± 15

Fonte: O autor (2022).

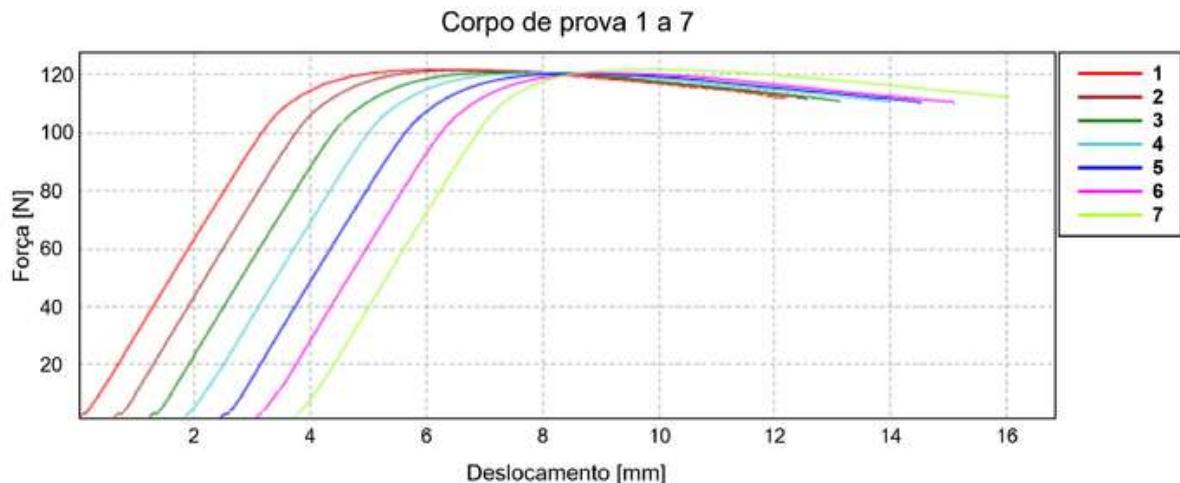
5.5 ENSAIO DE FLEXÃO

5.5.1 Amostras a zero hora

As figuras 40 e 41 mostram respectivamente as curvas obtidas no ensaio de flexão para o ABS virgem e o ABS reciclado. Na tabela 17 estão as médias desses resultados, junto com seus desvios padrões.

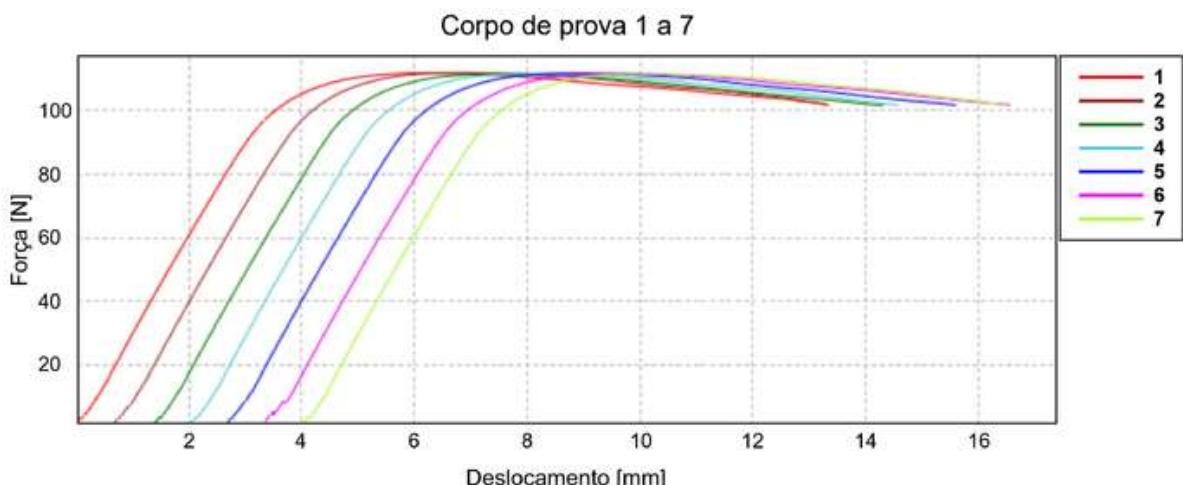
Pode-se notar que não houve grandes mudanças durante a reciclagem. No entanto, houve uma diminuição tanto na força máxima suportada pelo corpo quanto no módulo de flexão (8% e 4% respectivamente). Isso provavelmente deve-se a degradação do estireno e da acrilonitrila durante a reciclagem.

Figura 40 — Curvas obtidas no teste de flexão para o ABS virgem a zero hora



Fonte: O autor (2022).

Figura 41 — Curvas obtidas no teste de flexão para o ABS reciclado a zero hora



Fonte: O autor (2022).

Tabela 17 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de flexão dos corpos a zero hora.

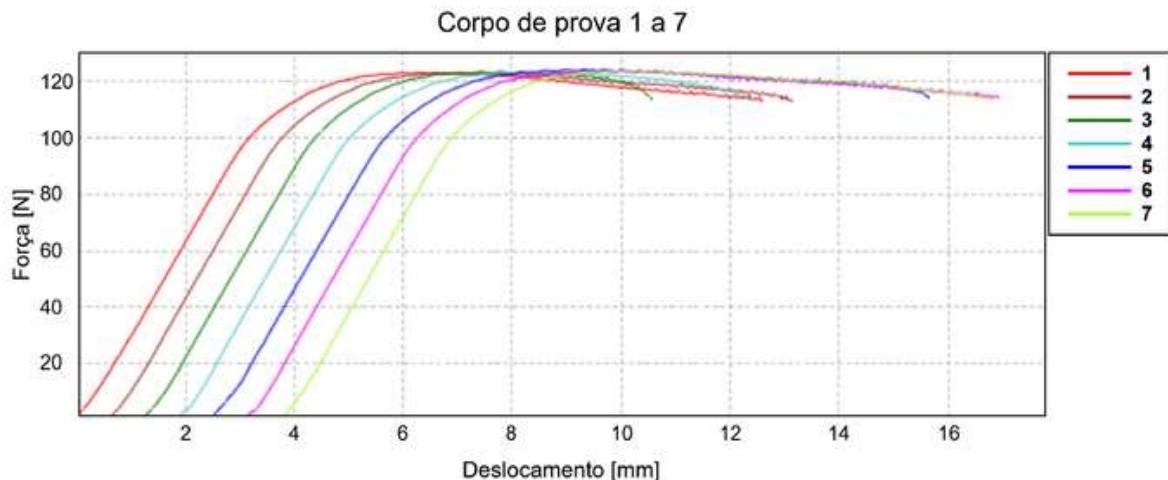
Amostras ABS Zero Hora	Força Máxima [kgf]	Módulo (Secante 1%) [Mpa]
Virgem	$12,37 \pm 0,07$	2570 ± 20
Reciclado	$11,41 \pm 0,01$	2470 ± 55

Fonte: O autor (2022).

5.5.2 Amostras pós envelhecimento térmico a 70°C e 500h

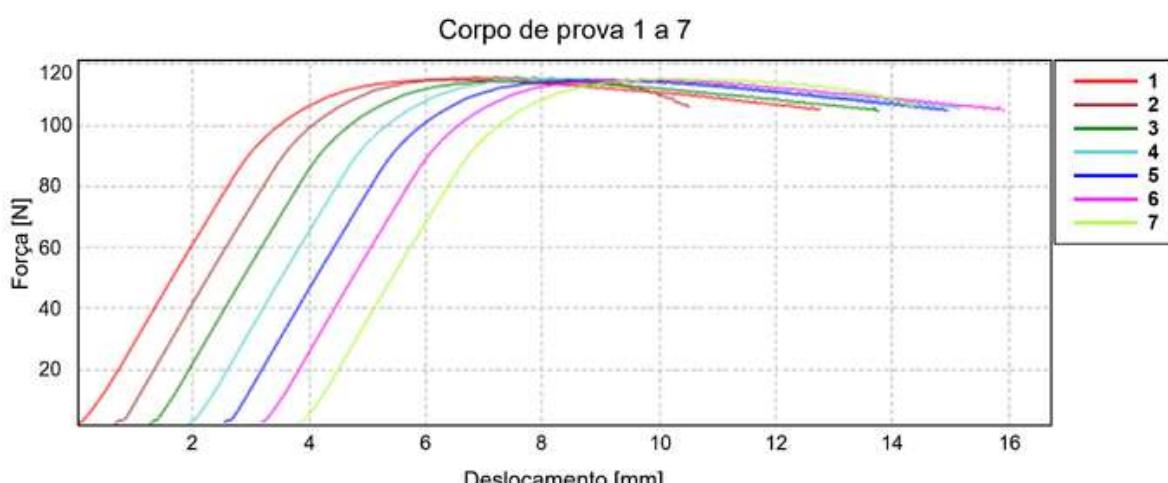
As figuras 42 e 43 mostram respectivamente as curvas obtidas no ensaio de flexão para o ABS virgem e o ABS reciclado após o envelhecimento. Na tabela 18 estão as médias desses resultados, junto com seus desvios padrões.

Figura 42 — Curvas obtidas no teste de flexão para o ABS virgem envelhecido



Fonte: O autor (2022).

Figura 43 — Curvas obtidas no teste de flexão para o ABS reciclado envelhecido



Fonte: O autor (2022).

Tabela 18 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de flexão dos corpos envelhecidos

Amostras ABS Envelhecidas	Força Máxima [kgf]	Módulo (Secante 1%) [Mpa]
Virgem	$12,62 \pm 0,05$	2593 ± 31
Reciclado	$11,74 \pm 0,04$	2569 ± 44

Fonte: O autor (2022).

Nos corpos ensaiados após o envelhecimento, pode-se notar que também não houve grandes mudanças. A força máxima sofreu uma diminuição de 7%, enquanto a diminuição no módulo de flexão foi de apenas 1%.

Quando comparamos as amostras de ABS virgem a zero hora e as de ABS virgem envelhecidas (tabela 19), podemos notar que não houve mudanças

significativas. O mesmo pode ser dito das amostras de ABS recicladas a zero hora quando comparadas com as de ABS envelhecidas (tabela 20).

Tabela 19 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de flexão dos corpos de ABS virgem a zero hora e envelhecido

Amostra ABS Virgem	Força Máxima [kgf]	Módulo (Secante 1%) [Mpa]
Zero hora	$12,37 \pm 0,07$	2570 ± 21
Envelhecido	$12,62 \pm 0,05$	2593 ± 31

Fonte: O autor (2022).

Tabela 20 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de flexão dos corpos de ABS reciclado a zero hora e envelhecido

Amostra ABS Reciclado	Força Máxima [kgf]	Módulo (Secante 1%) [Mpa]
Zero hora	$11,41 \pm 0,01$	2470 ± 55
Envelhecido	$11,74 \pm 0,04$	2569 ± 44

Fonte: O autor (2022).

5.6 ENSAIO DE IMPACTO

5.6.1 Amostras a zero hora

A tabela 21 mostra os resultados obtidos através do teste de impacto a zero hora, bem como os seus desvios padrões.

Pode-se notar através dos resultados, que não houve nenhuma mudança significativa após o processo de reciclagem. A energia, a porcentagem de energia absorvida e a resistência ao impacto sofreram somente uma diminuição de 5% no reciclado.

Tabela 21 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de impacto dos corpos a zero hora.

Amostras ABS Zero hora	Energia [J]	Abs. Energia [%]	Re [kJ/m ²]
Virgem	$0,5632 \pm 0,0198$	$56,27 \pm 1,97$	$17,49 \pm 0,61$
Reciclado	$0,5366 \pm 0,0185$	$53,61 \pm 1,85$	$16,66 \pm 0,58$

Fonte: O autor (2022).

5.6.2 Amostras pós envelhecimento térmico a 70°C e 500h

A tabela 22 mostra os resultados obtidos através do teste de impacto realizado após o envelhecimento, bem como os seus desvios padrões.

Ao contrário dos resultados obtidos no ensaio dos corpos a zero hora, após o envelhecimento houve uma diminuição de 13% na resistência ao impacto do reciclado em relação ao ABS virgem envelhecido. Pode-se dizer que essa diminuição, provavelmente, se deveu a uma degradação térmica mais acentuada das cadeias de polibutadieno do material reciclado, o que fez com que o material reciclado resistisse menos ao impacto quando comparado ao virgem (AGOSTINI, 2018).

Tabela 22 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de impacto dos corpos envelhecidos.

Amostras ABS Envelhecidas	Energia [J]	Abs. Energia [%]	Re [kJ/m ²]
Virgem	$0,5632 \pm 0,0198$	$56,27 \pm 1,97$	$17,49 \pm 0,61$
Reciclado	$0,4905 \pm 0,0099$	$49,00 \pm 0,99$	$15,23 \pm 0,31$

Fonte: O autor (2022).

Quando comparadas as amostras de ABS virgens a zero hora e as de ABS virgem envelhecidas (tabela 23), observa-se uma pequena e pouco significativa diminuição de 8% da resistência ao impacto no material envelhecido. Um comportamento similar é notado no material reciclado, quando comparado entre si (tabela 24). Pode-se notar que houve uma queda de 9% na resistência ao impacto no material envelhecido. Como dito anteriormente, a queda na resistência a tração, pode ser atribuído a degradação do butadieno durante o envelhecimento térmico.

Tabela 23 — Média de resultados obtidos através do ensaio de impacto para as amostras virgens a zero hora e envelhecidas

Amostras ABS Virgem	Energia [J]	Abs. Energia [%]	Re [kJ/m ²]
Zero hora	$0,6069 \pm 0,0129$	$60,63 \pm 1,28$	$18,84 \pm 0,40$
Envelhecido	$0,5632 \pm 0,0198$	$56,27 \pm 1,97$	$17,49 \pm 0,61$

Fonte: O autor (2022).

Tabela 24 — Média dos resultados obtidos através do ensaio de impacto para as amostras recicladas a zero hora e envelhecidas

Amostras ABS Reciclado	Energia [J]	Abs. Energia [%]	Re [kJ/m²]
Zero hora	$0,5366 \pm 0,0185$	$53,61 \pm 1,85$	$16,66 \pm 0,58$
Envelhecido	$0,4905 \pm 0,0099$	$49,00 \pm 0,99$	$15,23 \pm 0,31$

Fonte: O autor (2022)

6 CONCLUSÃO

O índice de fluidez apresentou um aumento de apenas 4% no reciclado. Já teste para análise de brilho mostrou que tanto as amostras virgens quanto as recicladas, apresentaram brilho maior que 80 u.b., sendo assim consideradas conformes.

No teste de envelhecimento acelerado (QUV-B), as peças recicladas apresentaram uma cor mais azulada, provocando diferença de tonalidade com os outros itens do produto. Tal fato ocorre devido à aditivação do Master que deverá ser ajustada para que o polímero não apresente diferença de cor quando comparado com outros componentes. Em relação ao amarelamento (envelhecimento), houve um comportamento semelhante nos dois tipos de materiais, que apresentaram uma boa resistência a isso até as primeiras 50 horas. O amarelamento é um acontecimento esperado em polímeros que possuem butadieno em sua composição.

No ensaio de tração, ao comparar as amostras virgens as recicladas, notou-se que não houve uma grande alteração nas propriedades dos materiais. Tanto nas amostras a zero hora quanto as envelhecidas. o módulo de Young apresentou uma diminuição no ABS reciclado, mostrando que o material se tornou menos rígido após a reciclagem. Quando comparadas as amostras virgens entre si (zero hora e envelhecidas), foi observado que houve um aumento no módulo de Young, mostrando que o material se tornou mais rígido após o envelhecimento. O mesmo foi notado ao comparar as amostras recicladas. Esse efeito pode ser atribuído a degradação do butadieno.

Nos ensaios de flexão não ocorreram mudanças significativas nas propriedades do reciclado (zero hora e envelhecido) em comparação com o virgem. Acerca da resistência ao impacto, quando comparadas as amostras ensaiadas a zero hora do material virgem as do reciclado, nota-se que não ocorreu mudanças significativas nas propriedades. No entanto, quando realizada a mesma comparação, mas nas amostras que passaram por envelhecimento térmico, notou que o ABS reciclado sofreu uma queda e 13% comparado ao virgem. Essa queda pode ser atribuída à degradação das cadeias de polibutadieno que ocorreram nesse material tanto durante a reciclagem, quanto no envelhecimento.

Em suma, os resultados dos testes mostram que as alterações de propriedades no material reciclado foram mínimas. Assim a utilização do material reciclado seria viável e não afetaria a vida útil do item em questão.

Enfatiza-se que esse estudo considerou apenas um ciclo de reciclagem e que a cada nova reciclagem que o material previamente reciclado for submetido, ocorrerá uma queda nas propriedades.

REFERÊNCIAS

A EXTRUSORA e o processo de injeção. Tudo sobre Plásticos. Disponível em: <https://www.tudosobreplasticos.com/processo/extrusao.asp>. Acesso em: 8 out. 2022.

A INJETORA de plástico. Tudo sobre Plásticos. Disponível em: <https://www.tudosobreplasticos.com/processo/injecao.asp>. Acesso em: 8 out. 2022.

ABIPLAST. Estudo encomendado pelo PICPlast mapeia a indústria de reciclagem do plástico no Brasil. Abiplast. 2020. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/noticias/estudo-encomendado-pelo-picplast-mapeia-a-industria-de-reciclagem-do-plastico-no-brasil/>. Acesso em: 12 out. 2022.

AGOSTINI, Nicole Bohm. **Reciclagem primária de resíduos poliméricos provindos do processo.** Porto Alegre, 2018. 62 p Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/190145>. Acesso em: 4 out. 2022.

ALEXANDRE, Beatriz Galassi. **Reciclagem do resíduo da fabricação de peças injetadas.** São Paulo, 2021. 30 p Trabalho de Conclusão de Curso - Insper Instituto de Ensino e Pesquisa. Disponível em: <https://repositorio.insper.edu.br/bitstream/11224/3277/1/Relat%c3%b3rio%20Final%20-%20Beatriz%20Galassi%20Alexandre.pdf>. Acesso em: 4 out. 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM:D1238-13. Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. West Conshohocken, PA, 2013. v. 08.01.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM:D256-18. Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. West Conshohocken, PA, 2018. v. 08.01.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM:D5033-00. Standard Guide for Development of ASTM Standards Relating to Recycling and Use of Recycled Plastics. West Conshohocken, PA, 2000

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM:D638-14. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken, PA, 2014. v. 08.01.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM:D790-17. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. West Conshohocken, PA, 2017.v.08.01.

BALDERAS, Saul Franco. **Reciclado de ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno).** Monterrey, 2003. 109 p Tese - Instituto Tecnológico Y de Estudios Superiores de Monterrey.

BOSQUETTI, Pericles; CASARIN, Suzan Aline; AGNELLI, José Augusto Marcondes. Estudo da fotodegradação de compostos em ABS de diferentes teores de borracha em ensaio artificial e natural. *In: 12º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS* , n. 12. 2013, Florianópolis.

BRUCK, Alexandre. **Índice de fluidez.** C2Lab. 2022. Disponível em: <https://c2lab.com.br/blog-indice-de-fluidez-conheca-este-ensaio-de-materiais/>. Acesso em: 17 out. 2022.

CALLISTER, WILLIAM D.. **Ciência e Engenharia de Materiais:** Uma introdução. São Paulo: Grupo Gen-LTC, f. 362, 2012. 724 p.

CANEVAROLO, Sebastião Vicente. **Ciência dos polímeros:** um texto básico para tecnólogos e engenheiros. São Paulo: Artliber, f. 140, 2013. 280 p.

CCDM. **Termofixos e termoplásticos.** CCDM. São Carlos, 2021. Disponível em: <http://www.ccdm.ufscar.br/2021/08/12/termofixos-e-termoplasticos/>. Acesso em: 10 out. 2022.

CÂNDIDO, Luiz Henrique Alves. **Estudo do ciclo de reciclagem de materiais em blendas acrilonitrila-butadieno-estireno/policarbonato.** Porto Alegre, 2011. 129 p Tese (Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DE ARAUJO, Josiane Lima; CORREIA, Auro de Jesus Cardoso. Avaliação ambiental e econômica por meio de processos de reciclagem baseados na economia circular: estudo de caso em uma indústria do segmento de injeção plástica. *In: VII SINGEP*, n. 7. 2020.

GONÇALVES, Eduardo. **Termofixos e termoplásticos.** CCDM. 2021. Disponível em: <http://www.ccdm.ufscar.br/2021/08/12/termofixos-e-termoplasticos/>. Acesso em: 8 out. 2022.

GORNI, Antonio Augusto. Introdução aos plásticos. **Revista plástico industrial**, v. 10, n. 9, 2003.

HIRAYAMA, Denise. **Reciclagem do copolímero acrilonitrila-butadieno-estireno e do poliestireno de alto impacto oriundos de rejeitos de equipamentos elétricos e eletrônicos na forma de blendas poliméricas.** Lorena, 2015 Tese (Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo.

KONICA MINOLTA. **Entendendo o Espaço de Cor L*a*b***. Konica Minolta. 2013. Disponível em: <https://sensing.konicaminolta.us/br/blog/entendendo-o-espaco-de-cor-lab/>. Acesso em: 8 out. 2022.

LANDI, Tania R.L.. **Estudo do efeito da radiacao ionizante por feixe de eletrons sobre o terpolimero acrilonitrila butadieno estireno-ABS.** . São Paulo, 2003. 78 p Dissertação - Ipen/sp. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/11135>.. Acesso em: 20 nov. 2022.

PARKER, Laura. **The World's Plastic Pollution Crisis Explained**. National Geographic. 2022. Disponível em: <https://education.nationalgeographic.org/resource/worlds-plastic-pollution-crisis-explained>. Acesso em: 8 out. 2022.

PICPLAST. **Mapeamento da indústria de reciclagem de plástico no Brasil**. 2019. Disponível em: https://www.picplast.com.br/estudoreciclagem?utm_source=akna&utm_medium=email&utm_campaign=Estudo-mapeia-a-reciclagem-de-plasticos-no-Brasil. Acesso em: 12 out. 2022.

PICPLAST. **Mapeamento da indústria plástica no Brasil**. 2019. Disponível em: https://www.picplast.com.br/estudoreciclagem?utm_source=akna&utm_medium=email&utm_campaign=Estudo-mapeia-a-reciclagem-de-plasticos-no-Brasil. Acesso em: 20 nov. 2022.

PINHEIRO, Libânio Miranda. **Elementos estruturais de plástico reciclado**. São Carlos, 2006. 142 p Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de São Paulo. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-19072006-095941/publico/2006ME_RicardoAParente.pdf. Acesso em: 8 out. 2022.

PLÁSTICO ABS e suas principais características e aplicações. Mais polímeros. 2018. Disponível em: <https://maispolimeros.com.br/2018/09/24/plastico-abs-e-suas-principais-caracteristicas-e-aplicacoes/>. Acesso em: 12 out. 2022.

RESINAS termoplásticas pós consumo e pós industrial: O que são?. Tiken. 2021. Disponível em: <https://tiken.com.br/resinas-termoplasticas-pos-consumo-e-pos-industrial-o-que-sao/>. Acesso em: 8 out. 2022.

ROSA, Rafael José Nogueira. **A utilização do ABS reciclado no processo de injeção**. Varginha, 2011. 33 p Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica). Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/bitstream/prefix/1628/1/Rafael%20Jos%C3%A9%20Nogueira%20Rosa%20120738.pdf>. Acesso em: 4 out. 2022.

SACK, Harald. **Hermann Staudinger and the Macromolecules**. SciHi. 2022. Disponível em: <http://scih.org/hermann-staudinger-macromolecules/>. Acesso em: 8 out. 2022.

SOUZA, Liria Alves. **Descoberta dos polímeros**. Mundo Educação. 2008. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/descoberta-dos-polimeros.htm#:~:text=O%20primeiro%20pol%C3%ADmero%20a%20ser%20sintetizado%20em%20laborat%C3%B3rio,importante%20papel%3A%20como%20isolante%20el%C3%A9trico%20de%20radares%20militares>. Acesso em: 8 out. 2022.

SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva; DE PAOLI, Marco Aurelio. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química nova**, v. 28, p. 65-72, 2008.

VIDAL, Linda Rosa Nunes. **Estudo dos efeitos da reincorporação de gitos nas propriedades do elastómero termoplástico de Poliéster**. 2008. 66 p Dissertação - Universidade do Porto. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/60109>. Acesso em: 4 out. 2022.