

RECICLAGEM DE GARRAFAS PLÁSTICAS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE: PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL RECICLADO, E COMPARAÇÃO COM AS PROPRIEDADES DO MATERIAL VIRGEM¹

André Braga Sargiani – andre_sargiani@hotmail.com

Profa. Dra. Miriam Lúcia Chiquetto Machado (Orientadora) – miriamlucia.machado@mackenzie.br

RESUMO

Um dos maiores problemas na atualidade é a grande quantidade de resíduos sólidos não degradáveis gerados e descartados incorretamente, sendo o Polietileno um dos principais polímeros descartados pós-uso. Com o objetivo de se ampliar as possibilidades de aplicação de materiais reciclados, o Polietileno de Alta Densidade, mais especificamente o utilizado em garrafas de leite, foi escolhido para ser estudado, a fim de se comparar as propriedades do polímero reciclado com o polímero virgem, propondo possíveis usos desse material reciclado. Como polímero virgem foi escolhido o PEAD SGF4960, da Braskem, devido à indicação de uso deste para fabricação de frascos para lácteos. Foram realizados ensaios de Tração, Impacto, Dureza, Teste de Fluidez e HDT/VICAT. Os resultados obtidos permitiram verificar a possibilidade de processamento do material reciclado, o qual apresentou boas propriedades de impacto e temperatura de deflexão térmica, mas com baixa tração de ruptura. Contudo, foi possível propor alguns usos desse material, no lugar do PEAD virgem, contribuindo para uma produção mais sustentável.

Palavras-chave: Reciclagem. Polietileno de Alta Densidade. Polímero virgem

RECYCLING PLASTIC BOTTLES OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE: PROCESSING AND CHARACTERIZATION OF THE RECYCLED MATERIAL, AND COMPARISON WITH THE PROPERTIES OF PURE MATERIAL

ABSTRACT

One of the biggest problems today is the large amount of non-degradable solid waste generated and disposed of incorrectly, with Polyethylene being one of the main polymers discarded after use. In

¹ Artigo do Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia de Materiais, EE, UPM, São Paulo, 2020.

order to expand the possibilities of applying recycled materials, High Density Polyethylene, more specifically that used in milk bottles, was chosen to be studied, in order to compare the properties of the recycled polymer with the pure polymer, proposing possible uses of this recycled material. As a pure polymer, Braskem's HDPE SGF4960 was chosen, due to the indication of its use for the manufacture of bottles for dairy products. Tensile, Impact, Hardness, Fluidity Test and HDT / VICAT tests were performed. The results obtained allowed to verify the possibility of processing the recycled material, which presented good impact properties and thermal deflection temperature, but with low breaking tension. However, it was possible to propose some uses of this material, instead of pure HDPE, contributing to a more sustainable production..

Keywords: Recycling. High Density Polyethylene. Pure polymer

1 INTRODUÇÃO

Devido ao esgotamento das fontes de matéria-prima não renovável como, por exemplo, o petróleo, viu-se como necessária uma alternativa para que fossem preservadas ou minimizadas a utilização de tais recursos para a fabricação de produtos. Nesse momento a ideia de reciclagem foi introduzida, que significa conceitualmente colocar novamente no ciclo. De maneira prática, a reciclagem é um processo que converte o lixo descartado (matéria-prima secundária) em um produto com função semelhante ao inicial ou outro, poupando assim recursos naturais e economizando energia.

Hoje em dia a importância da reciclagem está além da preservação de recursos naturais. Os problemas ambientais causados no mundo inteiro por consequência do descarte incorreto, tem chamado a atenção da indústria para a reciclagem dos materiais, tanto aqueles que são descartados pelas indústrias, como os pós-consumo. Os materiais mais descartados são os plásticos, mais especificamente as embalagens (VALT, 2004).

Dentro desse universo foi identificado como prioritário o polímero Polietileno de Alta Densidade conhecido como PEAD, utilizado na fabricação de garrafas plásticas, mais especificamente em garrafas de leite, o qual será estudado visando a comparação das propriedades do material reciclado com as do material virgem.

Para a realização deste trabalho foram coletadas, após descarte, garrafas de leite pasteurizado, mantidas em geladeiras dos supermercados, fabricadas de Polietileno de Alta Densidade – PEAD, de acordo com inscrição no fundo das mesmas. O material constituinte das garrafas foi processado e com o mesmo foram realizados ensaios para caracterização de propriedades mecânicas e térmicas. Da mesma forma, foi também processado e caracterizado o polímero PEAD virgem, semelhante ao empregado para fabricação das garrafas, a fim de se comparar as propriedades deste com as do material reciclado. Pretende-se propor possível uso do material reciclado.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A falta de orientação e responsabilidade em relação à coleta seletiva, vem trazendo problemas ambientais gravíssimos, influenciando todo o ecossistema, acarretando consequências negativas. A preocupação com a gestão de resíduos sólidos vem sendo discutida no mundo todo, aplicando esforços na ciência e tecnologia para minimizar esses impactos.

Um dos problemas ambientais é o descarte inadequado das sacolas plásticas. Segundo Lorenzett et al. (2013) as sacolas representam cerca de 4 milhões de quilogramas de plásticos lançados nos mares atualmente, causando a poluição visual e a morte de animais. Para Santos et al. (2004, p.228).

No ambiente marinho, o lixo plástico pode ser carregado por milhares de quilômetros, afetando a vida de tartarugas, pássaros, mamíferos marinhos, corais, assim como uma variedade de peixes e crustáceos, sendo um dos importantes problemas ambientais marinhos do século XXI.

Por conta do crescente uso das embalagens plásticas, a reciclagem das mesmas é uma preocupação mundial, devido às implicações ambientais inerentes ao descarte inapropriado pós-consumo, como no setor de alimentos (FORLIN; FARIA, 2002). Como a incineração dos plásticos tem um risco à saúde humana, a redução e a reciclagem são os focos das políticas de gerenciamento de resíduos sólidos (SANTOS; AGNELLI; MANRICH, 2004).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2020), a reciclagem é um conjunto de técnicas de reaproveitamento de materiais descartados, reintroduzindo-os no ciclo produtivo. É uma das alternativas de tratamento de resíduos sólidos (lixo) mais vantajosas, reduzindo o consumo de recursos naturais, poupando energia e água, e diminuindo o volume de lixo.

O sucesso da reciclagem de materiais de embalagens pós-consumo ou retornáveis está relacionado com aspectos culturais, políticos e socioeconômicos da população, incluindo as iniciativas de desenvolvimento de tecnologias, equipamentos e logística (FORLIN; FARIA, 2002).

O processo de reciclagem é feito para diversos materiais além dos plásticos, entre eles estão o alumínio, o vidro e o papelão.

A reciclagem do papel tem importância fundamental para a preservação do meio ambiente, pois é a partir da madeira que se faz a retirada da celulose. “Assim, os principais fatores de incentivo à reciclagem de papel, além dos econômicos, são: a preservação de recursos naturais (matéria-prima, energia e água), a minimização da poluição com a diminuição da quantidade de lixo que vai para os aterros” (FONSECA, 2013). O papelão levado pelas empresas ou cooperativas é separado, triturado, misturado com água para que as fibras sejam separadas, a seguir é realizada centrifugação para que haja a separação de algumas impurezas como areia, grampos, entre outros materiais presos ao

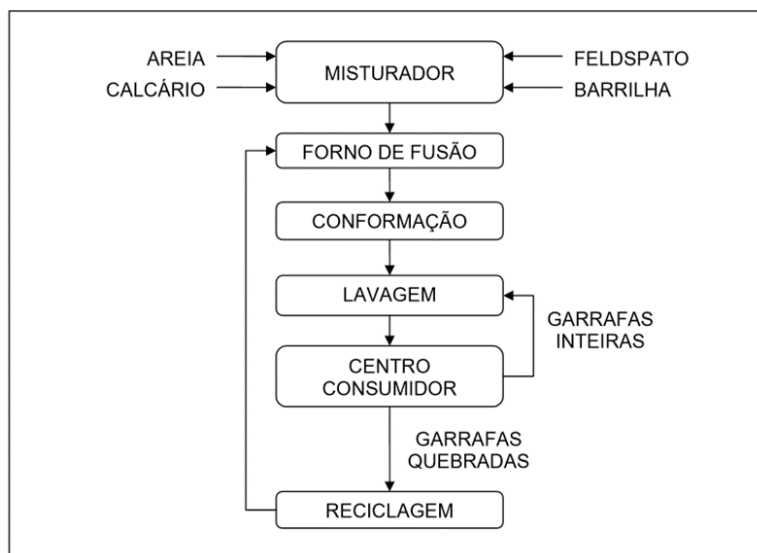
papelão. Em seguida são adicionados produtos químicos para clarear o papelão, sobrando uma pasta que será prensada e secada, sendo encaminhada para outros equipamentos, sendo gerado um novo papel (FRAGMAQ, 2012).

As latas de alumínio para bebidas merecem um destaque na reciclagem, por possuírem um consumo alto e um ciclo de vida mais curto que outros produtos de alumínio (CEMPRE, 2020). A reciclagem se dá pelo tratamento e fusão da sucata pós-consumo, sendo o alumínio transformado em lingotes, passando depois pela laminação e enviado para fábrica de latas (LIMA, 2007).

O vidro tem demonstrado reconquistar seu espaço no mercado de embalagens devido à preservação, por mais tempo, das características da bebida, com um preço competitivo. Na reciclagem, o vidro bruto tem a separação dos metais contaminantes por um eletroímã, seguida da remoção, através da lavagem, de impurezas, sendo, posteriormente, transformado em pedaços homogêneos pelo triturador. Ocorre novamente a passagem pelo eletroímã para separar o metal ainda presente nos cacos. Os cacos são, então, estocados para posterior utilização. Inicialmente o vidro é separado por cor, para evitar alteração visual no produto a ser fabricado. Contudo, o vidro pode ser reciclado inúmeras vezes sem que haja perda de suas qualidades (VALT, 2004).

Após a preparação e separação do vidro reciclado, ele volta para o processo produtivo onde vai ser fundido, conformado e lavado como apresentado na figura 2.

Figura 2 – DIAGRAMA DE PRODUÇÃO DO VIDRO



Fonte: VALT (2004, p.55)

Os materiais plásticos, no segmento de embalagens, são divididos em duas fontes recicláveis: a industrial e o descarte pós-consumo. Os resíduos que provêm do processo de produção industrial tem como característica uma uniformidade nos materiais, ou das frações descartadas, que foram gerados nas esteiras de produção, como nos processos de laminação e conversão. Entretanto as aparas

de acabamento, resinas, materiais descartados por não atenderem as especificações de qualidade, entre outros, fazem parte dessa fração (FORLIN; FARIA, 2002).

Segundo Spinacé e Paoli (2005), a reciclagem de polímeros pode ser classificada em quatro categorias: primária, secundária, terciária e quaternária, explicadas a seguir.

A reciclagem primária consiste em converter os resíduos poliméricos em produtos com características equivalentes ao produto de origem, utilizando métodos de processamento padrão. A reciclagem secundária consiste em converter os resíduos poliméricos pós-consumo em produtos que tenham menor exigência, utilizando uma combinação de processos. A reciclagem terciária é o processo tecnológico de produção de insumos químicos ou combustíveis, a partir de resíduos poliméricos, e a reciclagem quaternária, o processo tecnológico de recuperação de energia de resíduos poliméricos por incineração controlada.

Segundo Spinacé (2005), as reciclagens primária e secundária são conhecidas como reciclagem mecânica ou física, o que as distingue é que na primária é utilizado polímero pós-industrial e na secundária, pós-consumo. As reciclagens terciárias e quaternárias também são conhecidas por química e energética, respectivamente. Para Spinacé (2005, p.66),

A reciclagem mecânica pode ser viabilizada através do reprocessamento por extrusão, injeção, termoformagem, moldagem por compressão etc. Para este fim são necessários alguns procedimentos que incluem as seguintes etapas: separação do resíduo polimérico, moagem, lavagem, secagem, reprocessamento e, finalmente, a transformação do polímero em produto acabado.

O mercado de embalagens no mundo, em 2000, alcançou a cifra de US\$ 431 bilhões, da qual 22% refere-se à América do Norte; 27% à Europa Ocidental; 15% ao Japão; 5% à América Latina; e, 31% ao resto do mundo. A participação do Brasil é de 1,65% do mercado mundial (FORLIN; FARIA, 2002).

O Brasil possui uma produção de embalagens estimada em 5,5 milhões de toneladas, ou cerca de R\$10 bilhões, em 1998, o que correspondeu a 1,3% do PIB, onde 61% são referentes ao setor de alimentos (FORLIN; FARIA, 2002). A tabela 1 apresenta os principais mercados mundiais de embalagens, entre 1995 e 2005.

Tabela 1 – Principais mercados mundiais de embalagens 1995-2005 (US\$ bilhões)

País	1995	2000	2005*
EUA/Canadá	125,0	96,6	96,6
Japão	60,0	65,6	—
Alemanha	29,8	24,3	26,9
França	19,9	18,3	20,4
Itália	16,5	16,0	17,7
Reino Unido	15,0	13,1	14,7
China	14,0	—	—
Brasil	12,6	7,1	8,7
Espanha	6,4	7,6	8,6
Argentina	—	4,6	—
México	4,0	5,0	—
Chile	1,1	1,4	1,6
Colombia	—	1,0	—

Fonte: (WALLIS, 2000 apud FORLIN; FARIA, 2002, p.2)

Diante da necessidade iminente de reduzir o volume de resíduos nos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), na Europa foram estabelecidas, por lei, as metas de índices de recuperação e reciclagem para o setor de embalagens. Na Comunidade Europeia (EC), a Diretiva 94/62/EC estabeleceu o prazo de junho de 2001 para que no mínimo 25% e no máximo 40%, em massa, das embalagens no lixo fossem recicladas, e no mínimo 50% e no máximo de 65% fossem recuperadas. Além disso, cada material específico, deveria ter atingido uma taxa de reciclagem mínima de 15% (SANTOS; AGNELLI; MANRICH, 2004). Para Forlin e Faria (2002, p.1),

A rentabilidade do mercado de reciclagem de embalagens plásticas no Brasil, como em outros países desenvolvidos, mostra aspectos atraentes para iniciativas empresariais do setor, com reflexos sócio-econômicos diretos relacionados com a melhoria da qualidade de vida da população, geração de renda, economia de recursos naturais e atenuação de problemas ambientais.

Das embalagens recicladas, a maior parte são de refrigerantes, leite ou garrafas de água. As garrafas de água foram os produtos plásticos com maiores índices de reciclagem em 2010, sendo que a recuperação de garrafas de PEAD foi estimada em 28%, enquanto as de PET foi de 21% (OLIVEIRA, 2012).

O Polietileno é um polímero parcialmente cristalino, flexível, com propriedades influenciadas pela quantidade relativa das fases amorfa e cristalina. As lamelas são planares e possuem cadeias perpendiculares ao plano da cadeia principal e dobradas em zig-zag. Eles são inertes face a maioria dos produtos químicos comuns por conta de sua alta massa molecular, sua estrutura parcialmente

cristalina e natureza parafínica (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003). A tabela 2 apresenta algumas características, aplicações e nomes usados comercialmente.

Tabela 2 – Nomes Comerciais, Características e Aplicações Típicas para uma Variedade de Materiais Plásticos

<i>Tipo do Material</i>	<i>Nomes Comerciais</i>	<i>Principais Características da Aplicação</i>	<i>Aplicações Típicas</i>
Polietileno	Alathon Alkathene Ethron Fortiflex Hi-fax Petrothene Rigidex Zendel	Quimicamente resistente, e isolante elétrico; duro e coeficiente de atrito relativamente baixo; baixa resistência e resistência às intempéries ruim	Garrafas flexíveis, brinquedos, tambores, peças de baterias, bandejas de gelo, materiais para películas de embalagem

Fonte: CALLISTER ADAPTADO (2002, p.344)

Dependendo das condições de reação e do sistema catalítico usado na polimerização, podemos produzir cinco tipos de diferentes de polietileno, entretanto, serão apresentados apenas os dois mais utilizados: Polietileno de baixa densidade (PEBD) e o Polietileno de alta densidade (PEAD).

O Polietileno de baixa densidade é um polímero parcialmente cristalino, que possui temperatura de fusão na região de 110 a 115°C, contendo cadeias ramificadas (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003).

O PEBD possui como propriedade a tenacidade, alta resistência ao impacto, alta flexibilidade e boa processabilidade. Além disso, apresenta notáveis propriedades elétricas (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003). A tabela 3 apresenta as propriedades físicas do PEBD.

Tabela 3 – Propriedades físicas do PEBD

Propriedade	Método ASTM	PEBD
Densidade, g/cm ³	D 792	0,912-0,925
Temperatura de fusão cristalina, °C	—	102-112
Índice de refração, n_D	D 542	1,51-1,52
Tração no escoamento, MPa	D 638	6,2-11,5
Alongamento no escoamento, %	D 638	100-800
Resistência à tração, MPa	D 638	6,9-16
Alongamento máximo, %	D 638	100-800
Módulo elástico, MPa	D 638	102-240
Dureza, Shore D	D 676	40-50

Fonte: COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA (2003, p.3)

O Polietileno de alta densidade, devido à linearidade das cadeias e de sua maior densidade, fazem com que seu alinhamento, orientação e empacotamento sejam mais eficientes, resultando em

uma alta cristalinidade. Como a cristalinidade é maior, possui conseqüentemente uma maior temperatura de fusão. As propriedades elétricas não são afetadas pela massa molecular e pela densidade do polímero, ao contrário das propriedades mecânicas que são diretamente influenciadas pela massa molecular, orientação, estrutura morfológica e teor de ramificações (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003). A tabela 4 apresenta as propriedades do PEAD.

Tabela 4 – Propriedades térmicas, físicas, elétricas e mecânicas do PEAD

Propriedades	Altamente linear	Baixo grau de ramificação
Densidade, g/cm ³	0,962 - 0,968	0,950 - 0,960
Índice de refração	1,54	1,53
Temperatura de fusão, °C	128 - 135	125 - 132
Temperatura de fragilidade, °C	-140 - -70	-140 - -70
Condutividade térmica, W/(m.K)	0,46 - 0,52	0,42 - 0,44
Calor de combustão, kJ/g	46,0	46,0
Constante dielétrica à 1 MHz	2,3 - 2,4	2,2 - 2,4
Resistividade superficial, Ω	10 ¹⁵	10 ¹⁵
Resistividade volumétrica, Ω.m	1017 - 1018	1017 - 1018
Resistência dielétrica, kV/mm	45 - 55	45 - 55
Ponto de escoamento, MPa	28 - 40	25 - 35
Módulo de tração, MPa	900 - 1200	800 - 900
Resistência à tração, MPa	25 - 45	20 - 40
Alongamento, %		
No ponto de escoamento	5 - 8	10 - 12
No ponto de ruptura	50 - 900	50 - 1200
Dureza		
Brinell, MPa	60 - 70	50 - 60
Rockwell	R55, D60 - D70	
Resistência ao cisalhamento, MPa	20 - 38	20 - 36

Fonte: COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA (2003, p.5)

A tabela 5 apresenta um comparativo das propriedades do PEBD e PEAD.

Tabela 5 - Propriedades físicas de alguns Polietilenos

CARACTERÍSTICAS	PEBD	PEAD
Densidade (g/cm ³)	0,917 a 0,932	0,952 a 0,965
Grau de Cristalinidade (%)	40 a 50	60 a 80
Temperatura de Fusão (°C)	105 a 110	130 a 135
Temperatura Máxima Permissível (°C)	80	100
Coefficiente de Expansão Linear (K ⁻¹)	1,7 x 10 ⁻⁴	2,0 x 10 ⁻⁴
Esforço de Ruptura (MPa)	8,0 a 10,0	20,0 a 30,0
Alongamento da fratura (%)	100 a 650	10 a 1200
Módulo Elástico E (MPa)	200	1000
Estabilidade Química	Boa	Excelente

Fonte: CALLISTER (2002)

A reciclagem do PEAD é importante pois é um dos polímeros mais utilizados entre as resinas termoplásticas (TECHDUTO, 2019). Dentre os processos de reciclagem o mais usado para o polietileno é a reciclagem mecânica, de cujos processos fazem parte o derretimento, corte, granulação e moagem. Os produtos feitos com base nesse material reciclado vão desde potes de shampoo até lixeiras.

Segundo TECHDUTO (2019), analisando tecnicamente, não há restrição para a reciclagem do PEAD. São utilizados 1,75 kg de petróleo para fazer 1 kg de PEAD, sendo facilmente reciclado. O uso do PEAD reciclado na produção de embalagens e outros artefatos plásticos traz vários benefícios, sendo eles:

- Diminuição de 90% do consumo de água;
- Redução de 33% do consumo de energia;
- Redução de 66% na emissão de dióxido de carbono;
- Redução de 33% na emissão de dióxido de enxofre;
- Redução de 50% de óxido nitroso

Segundo reportagem da Folha de São Paulo (2017), a jornalista Carolina Tarrío informou que devolveu 365 garrafas de leite à empresa fabricante. Esse volume segundo ela é o consumo anual de sua família, composta por 4 pessoas. Na figura 3, pode-se visualizar a jornalista com a família, e as garrafas acumuladas.

Figura 3 – A jornalista Carolina Tarrío (centro) com o marido, os filhos e as garrafas do leite consumido em um ano pela família



Fonte: FOLHA DE SÃO PAULO (2017, não paginado)

A reportagem informou que a jornalista realizou uma ação em São Paulo, no qual entregou uma carta para a empresa distribuidora de leite, assinada por 157 compradores da mesma marca, alegando a insatisfação com o fato de não conseguirem reciclar as embalagens. O problema segundo Tarrío não é o recolhimento do material, mas sim o correto encaminhamento para a reciclagem. Para Forlin e Faria (2002, p.9),

A reciclagem de materiais plásticos de embalagem pós-consumo, pela transformação em outros produtos, deve ser uma opção melhor explorada nas condições brasileiras, face os volumes disponíveis, possibilidade de aplicabilidade de tecnologias menos sofisticadas, amplo espectro de materiais disponíveis, existência de demanda e aceitabilidade no mercado interno de produtos fabricados com materiais reciclados e representar uma rota empresarialmente viável e ecologicamente correta.

3 METODOLOGIA

As garrafas utilizadas para a realização desse trabalho foram coletadas após o uso em alguns domicílios, sendo garrafas de leite de PEAD utilizadas para envase de leite pasteurizado das marcas Xando e Fazenda (integral, semi-desnatado ou desnatado).

Para comparação das propriedades do material virgem e do material reciclado, foi escolhida a resina SGF4960, da Braskem. A resina SGF4960 é um Polietileno de Alta Densidade, homopolímero, desenvolvido para o segmento de sopro com densidade e rigidez elevadas, combinadas a uma boa resistência ao impacto. Suas aplicações são em frascos para alimentos e bebidas, frascos para lácteos, embalagens para cosméticos e óleos lubrificantes, e tampas por compressão. A escolha desse polímero foi pelo seu uso em frascos para lácteos. As propriedades do PEAD Virgem utilizadas para comparação neste trabalho foram obtidas do relatório técnico da Braskem encontrado no documento Catálogo Geral, no site. https://www.braskem.com.br/busca-de-produtos?utm_source=Site&utm_medium=Menu&utm_campaign=Busca-de-Produtos. A tabela 6 mostra as propriedades do PEAD SGF4960 e sua utilização, conforme apresentado no Catálogo Geral.

Tabela 6 – Propriedades e usos do PEAD SGF4960

Propriedades Típicas	Índice de Fluidez (190 °C / 2,16 kg)	Índice de Fluidez (190 °C / 21,6 kg)	Densidade	Tensão de Escoamento ^a	Tensão de Ruptura ^a	Módulo de Flexão (secante a 1%) ^b	Dureza (Shore D) ^c	Resistência ao Impacto Izod ^a	Resistência à Quebra sob Tensão Ambiental (10% Igepal) ^a	Resistência à Quebra sob Tensão Ambiental (100% Igepal) ^a	Temperatura de Amolecimento Vicat ^b	Temperatura de Deflexão Térmica (0,455 MPa) ^b	Teor mínimo de C14
Método ASTM	D 1238	D 1238	D 1505/ D 792	D 638	D 638	D 790	D 2240	D 256	D 1693	D 1693	D 1525	D 648	D 6866
Unidades	g/10 min	g/10 min	g/cm ³	MPa	MPa	MPa	-	J/m	h/F50	h/F50	°C	°C	%
SGF4960	0,34	28	0,961	30	30	1550	65	225	-	-	132	70	96

Frascos para alimentos e bebidas; frascos para lácteos; embalagens para cosméticos e óleos lubrificantes; tampas por compressão.

Fonte: BRASKEM (2019)

As imagens presentes nessa seção são de autoria própria. Os equipamentos estão localizados no Laboratório de Processamento de Materiais Poliméricos, Laboratório de Processamento de Materiais Cerâmicos e Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, Campus Higienópolis.

As garrafas foram fragmentadas manualmente com tesoura e submetidas ao processo de moagem em moinho de facas SEIBT MGHS 4/180. O processo de moagem foi realizado três vezes a fim de se obter a granulometria ideal do material para ser injetado. A figura 4 apresenta as garrafas lavadas, sem tampa e sem rótulo, e, as mesmas, depois de cortadas. A figura 5 apresenta o moinho de facas utilizado.

Figura 4 – Garrafas lavadas, sem rótulo, e depois de cortadas



Figura 5 – Moinho de facas SEIBT MGHS 4/180



O material granulado foi injetado, em injetora ROMI PRIMAX 65R, com temperatura (no bico) de 190°C e pressão de 600 bar para serem preparados os corpos de prova. A figura 6 apresenta a injetora.

Figura 6 – Injetora ROMI PRIMAX 65R



Foram avaliadas propriedades mecânicas e térmicas do PEAD reciclado a fim de compará-lo com o polímero virgem, através da análise das seguintes propriedades: Índice de Fluidez; Tensão de

ruptura a tração; Dureza Shore D; Resistência ao impacto; Temperatura de Deflexão Térmica (HDT) e Temperatura de Amolecimento Vicat.

No ensaio de Índice de Fluidiez, um polímero fundido é forçado a passar por uma matriz capilar, sendo determinada a massa de material extrudado em função do tempo (g/10min). Dessa forma é possível obter-se uma propriedade muito útil e bastante utilizada em controle de qualidade de polímeros. O índice de fluidez pode ser entendido como uma avaliação indireta da massa molar do polímero, pois quanto maior o Índice de Fluidiez, menor é a viscosidade do polímero e conseqüentemente menor sua massa molar.

O ensaio foi realizado no Plastômero Tinius Olsen, modelo MP933a, apresentado na figura 7, de acordo com a norma ASTM D1238-95. A temperatura de ensaio foi de 190°C.

Figura 7 - Plastômero Tinius Olsen, modelo MP933a



O ensaio de Resistência à Tração é usado para determinar o ponto máximo de uma curva tensão x deformação, ou seja, quanto o material pode suportar ser esticado ou puxado antes de romper, sendo definida como tensão, medida como força por unidade de área, cuja unidade no Sistema Internacional de Unidades (SI) é Pascal (Pa).

Os resultados obtidos nesse ensaio são fornecidos pelo equipamento que, após a ruptura do material, gera as tabelas e o gráfico de tensão x deformação. O ensaio foi realizado no equipamento Zwick/Roell Z100, como mostra a figura 8, de acordo com a norma ASTM D 638.

Figura 8 – Equipamento Zwick/Roell Z100



A dureza Shore é um ensaio que avalia a dureza superficial de um polímero ou elastômero.

No experimento o material será submetido a uma pressão definida, aplicada através de uma mola calibrada que atua sobre o edentador. Através do relógio do durômetro, será obtido o valor da dureza do material.

O equipamento utilizado para o ensaio de Dureza Shore foi o durômetro da marca Mitutoyo, apresentado na figura 9, segundo a norma ASTM D2240.

Figura 9 – Durômetro da marca Mitutoyo

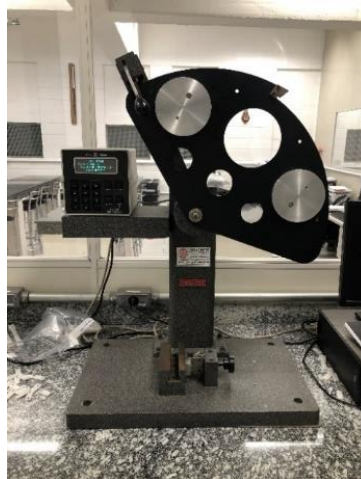


O ensaio de resistência ao impacto avalia as propriedades dos materiais sob uma solicitação de alta carga em um curto espaço de tempo, em altas velocidades. É um ensaio de grande importância na avaliação de desempenho mecânico dos materiais e, por consequência, suas aplicações.

No experimento, o material é atingido por um pêndulo com uma massa determinada e que, devido à altura inicial do pêndulo, o mesmo possui determinada energia potencial, provocando deformação ou fratura na amostra.

Para o ensaio de Resistência ao Impacto foi utilizado o equipamento do tipo Pêndulo Charpy/Izod, conforme apresentado na figura 10, sendo realizado de acordo com a norma ASTM D256.

Figura 10 - Pêndulo Charpy/Izod



O ensaio de HDT determina a temperatura necessária para defletir um material quando uma tensão a flexão é imposta. No ensaio aplica-se um esforço de flexão em três pontos distintos do polímero sob um aquecimento constante. O resultado obtido é a temperatura de deflexão térmica, temperatura na qual ocorre um decréscimo nas propriedades mecânicas do polímero.

A temperatura de amolecimento Vicat determina o ponto de amolecimento de uma determinada amostra quando uma agulha de ponta plana penetra 1 mm de profundidade no corpo-de-prova com uma determinada taxa de aquecimento e carga, ambas controladas.

Ambos os ensaios, HDT e Vicat, foram realizados no equipamento Tinius Olsen HDTUL modelo HD94/398, conforme apresentado na figura 11, respectivamente segundo as normas ASTM D 648 e ASTM D 1525.

Figura 11 – Equipamento Tinius Olsen HDTUL modelo HD94/398



4 RESULTADOS E DUSCUSSÃO

Os ensaios de Índice de Fluidez, Resistência a Tração e Resistência ao Impacto foram reproduzidos com dez corpos de prova, enquanto os ensaios de Dureza Shore D, HDT e Vicat foram reproduzidos com cinco amostras.

Na tabela 7 encontra-se o resultado obtido no ensaio de Índice de Fluidez.

Tabela 7 – Índice de Fluidez do PEAD Reciclado (ensaio realizado) e do PEAD Virgem (dado obtido da literatura)

	PEAD Reciclado	PEAD Virgem
Média "flow rate" (g/10 min)	4,468	0,34

Com os resultados da tabela acima podemos observar que o PEAD Reciclado apresenta um maior Índice de Fluidez em comparação com o PEAD Virgem. O aumento do índice de Fluidez do polímero reciclado em relação ao polímero virgem deve-se, provavelmente, à degradação do polímero no processo de reprocessamento com redução da massa molar do mesmo.

A principal evidência da importância do Índice de Fluidez é que o mesmo serve como base para classificar os polímeros de acordo com as tecnologias de processamento. A tabela 8 apresenta os valores de Índice de Fluidez ideais para cada tipo de processamento, independente do polímero (AFINKO, 2017).

Tabela 8 – Tabela de Índice de Fluidez e Processamento

Índice de Fluidez (g/10 min)	Processamentos					
	Sopro	Extrusão de Filmes	Termoformagem	Extrusão Geral	Rotomoldagem	Injeção
< 3,5						
3,5 a 6						
6 a 42						
> 42						

Fonte: AFINKO (2017)

Conforme a tabela, podemos concluir que o PEAD Reciclado possui Índice de Fluidez dentro das faixas para o processamento por termoformagem, extrusão geral, rotomoldagem e injeção, diferentemente do polímero virgem, que está em uma faixa de processamento, além da termoformagem e a extrusão geral, para sopro e extrusão de filmes.

Na tabela 9 é apresentado o resultado obtido no Ensaio de Dureza Shore D.

Tabela 9 – Dureza Shore D do PEAD Reciclado (ensaio realizado) e do PEAD Virgem (dado obtido da literatura)

	PEAD Reciclado	PEAD Virgem
Dureza Shore D	84,3 ± 0,841	65

Podemos observar que, em comparação com o polímero virgem, o PEAD reciclado teve um aumento de dureza. Isso sinaliza que houve um enrijecimento do material reciclado, que, como consequência, diminui a trabalhabilidade do material.

Na tabela 10 encontra-se o resultado obtido no Ensaio de Impacto.

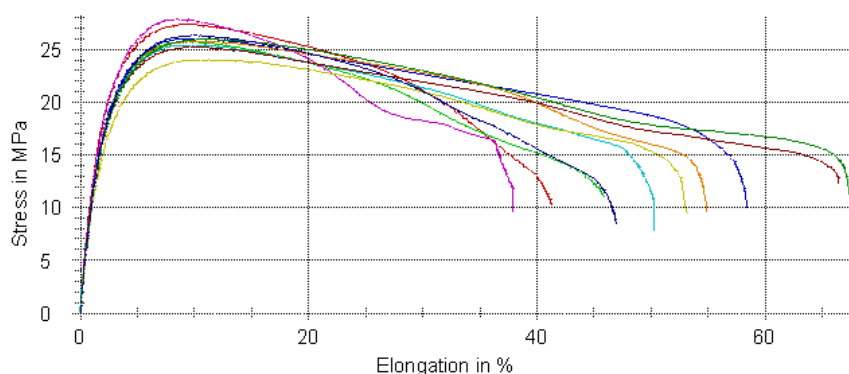
Tabela 10 – Resistência ao Impacto do PEAD Reciclado (ensaio realizado) e do PEAD Virgem (dado obtido da literatura)

	PEAD Reciclado	PEAD Virgem
Resistência ao Impacto (J/m)	256,83 ± 64,795	225

Como apresentado na tabela acima, podemos observar uma maior resistência ao impacto do polímero reciclado. Com essa resistência maior, torna-se possível a utilização em produtos com maior solitação.

A Figura 12 apresenta os resultados obtidos dos Ensaio de Tração.

Figura 12 – Gráfico obtido no ensaio de Tração para o PEAD Reciclado



É apresentada na tabela 11, a tensão de ruptura de ambos os polímeros.

Tabela 11 – Resistência a Tração na Ruptura do PEAD Reciclado (ensaio realizado) e do PEAD Virgem (dado obtido da literatura)

	PEAD Reciclado	PEAD Virgem
Resistência à Tração na Ruptura (MPa)	9,90 ± 1,239	30

Observa-se na tabela 11 que houve uma redução de cerca de 67% da resistência a tração na ruptura com relação ao polímero virgem. Esse dado nos indica cautela na utilização desse material em produtos que requeiram essa propriedade.

Na tabela 12 encontra-se os resultados obtidos do Ensaio de HDT e Vicat

Tabela 12 – Resultados dos Ensaio HDT e Vicat do PEAD Reciclado (ensaio realizado) e do PEAD Virgem (dado obtido da literatura)

	HDT (°C)	Vicat (°C)
PEAD Reciclado	81,84 ± 7,125	132,56 ± 0,241
PEAD Virgem	70	132

Conforme apresentado na tabela, observamos que a temperatura de amolecimento Vicat quase não se altera, enquanto a temperatura de deflexão térmica aumenta 11,8°C. Esse aumento na temperatura de deflexão resulta em uma maior temperatura máxima de aplicabilidade possível que este material aguenta, quando tensionado em flexão.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi realizado com o objetivo de se verificar a possibilidade de reciclagem do plástico que compõe determinadas garrafas de leite, buscando-se a comparação das propriedades do PEAD Reciclado com o PEAD Virgem, visando possíveis usos do material reciclado.

Foi possível observar que houve um aumento da dureza do PEAD Reciclado em relação ao PEAD Virgem, mostrando assim o enrijecimento do material após passar pela reciclagem.

Em relação ao Índice de Fluidez, o polímero reciclado apresentou valores que o possibilita ser processado por rotomoldagem, injeção, termoformagem e extrusão geral.

No ensaio de impacto, o PEAD Reciclado apresentou um aumento de 14,2% na resistência em comparação com o polímero virgem, sendo um resultado interessante para futuras aplicação.

Para o ensaio de tração, o resultado não foi bom. Houve uma queda de resistência de 20,11 MPa, 67% a menos que o polímero virgem. Isso sinaliza uma maior cautela para aplicações que necessitem dessa propriedade.

No ensaio de amolecimento Vicat não houve mudanças significativas, porém no ensaio de HDT houve um aumento interessante. Segundo o ensaio, o PEAD Reciclado teve um aumento de 11,8°C, 16,9% em relação ao polímero virgem, tornando maiores suas condições de aplicação.

Pode-se concluir que as propriedades do PEAD reciclado são bastante interessantes comparando-as às do polímero virgem, fazendo com que esse material reciclado apresente grande abrangência de aplicação na obtenção de produtos constituídos normalmente de PEAD virgem, podendo-se citar utensílios domésticos como bacias, bandejas, banheiras infantis e lixeiras, e outros, como caixas d'água. O emprego desse material reciclado em processos industriais é muito interessante pois torna tanto os processos, como os produtos obtidos, mais sustentáveis, na medida em que colabora tanto na economia de matéria-prima não renovável, como na redução de descarte de matéria plástica no meio-ambiente.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se citar a pesquisa de novas aplicações desse material reciclado, seja ele sozinho, ou em misturas com o próprio PEAD virgem ou com outros polímeros, a fim de reduzir o consumo de matéria prima não-renovável na fabricação de inúmeros produtos.

REFERÊNCIAS

AFINKO (São Carlos). índice de fluidez (IF): Como funciona na prática? 2020. Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/indice-fluidez-na-pratica/>. Acesso em: 22 nov. 2020.

American Society for Testing and Materials. ASTM D-256 – Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics

American Society for Testing and Materials. ASTM D-638 – Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastics

American Society for Testing and Materials. ASTM 648 – Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load in the Edgewise Position

American Society for Testing and Materials. ASTM D-1238 – Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer

American Society for Testing and Materials. ASTM D1525 – Standard Test Method for Vicat Softening Temperature of Plastics

American Society for Testing and Materials. ASTM D2240 – Standard Test Method for Rubber Property----Durometer Hardness

BATISTA, Everton Lopes. Garrafas plásticas 'não recicláveis' de leite incomodam consumidor. **Folha de São Paulo**. São Paulo, p. 1-1. 07 out. 2017. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/seminariosfolha/2017/10/1924736-garrafas-plasticas-nao-reciclaveis-de-leite-incomodam-consumidor.shtml>. Acesso em: 11 jun. 2020

BRASKEM. Catálogo Geral. Disponível em: https://www.braskem.com.br/busca-de-produtos?utm_source=Site&utm_medium=Menu&utm_campaign=Busca-de-Produtos. Acesso em: 21 nov. 2020

CALLISTER, W. D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. John Wiley& Sons, INC., 2002.

CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem. Latas de Alumínio. Disponível em <http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/5/latas-de-aluminio>. Acesso em: 11 de junho de 2020.

COUTINHO, Fernanda M. B.; MELLO, Ivana L.; SANTA MARIA, Luiz C. de. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. *Polímeros*, São Carlos, v. 13, n. 1, p. 01-13, jan.2003. Availablefrom<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282003000100005&lng=en&nrm=iso>. accesson 20 May 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282003000100005>.

FONSECA, Lúcia H. A. Reciclagem: o primeiro passo para a preservação ambiental. Rio de Janeiro: Centro Universitário Barra Mansa, 2013. Disponível em: <http://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/reciclagem.pdf> - Acesso em 20 de Mai.de 2020.

FORLIN, Flávio J.; FARIA, José de Assis F. Considerações Sobre a Reciclagem de Embalagens Plásticas. *Polímeros*, São Carlos, v. 12, n. 1, p. 1-10, 2002. Availablefrom<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282002000100006&lng=en&nrm=iso>. accesson 20 May 2020. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282002000100006>.

FRAGMAQ. **Entenda como funciona o processo de reciclagem do papel**. 2017. Disponível em: <https://www.fragmaq.com.br/blog/entenda-como-funciona-o-processo-de-reciclagem-do-papel/>. Acesso em: 11 jun. 2020.

LIMA, D.R. O Fenômeno da reciclagem de lata de alumínio no Brasil. Inovação tecnológica, oligopólios e catadores. 2007. 201 p. Dissertação (Mestrado em Política e Gestão Ambiental) - Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

LORENZETT, Juliana Benitti *et al.* SACOLAS PLÁSTICAS: UMA QUESTÃO DE MUDANÇA DE HÁBITOS. *Revista Monografias Ambientais*, [S.l.], p. 2446-2454, abr. 2013. ISSN 2236-1308. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/7725>>. Acesso em: 20 maio 2020. doi:<http://dx.doi.org/10.5902/223613087725>.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Reciclagem**. Site oficial do Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/informma/item/7656-reciclagem> . Acesso em: 11 de junho de 2020.

OLIVEIRA, M.C.B.R. Gestão de Resíduos Plásticos pós-consumo: perspectivas para a reciclagem no Brasil. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SANTOS, Amélia S. F.; AGNELLI, José Augusto M.; MANRICH, Sati. Tendências e desafios da reciclagem de embalagens plásticas. *Polímeros*, São Carlos, v. 14, n. 5, p. 307-312, Dec. 2004. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282004000500006&lng=en&nrm=iso>. accesson 20 May 2020. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282004000500006>.

SANTOS, Amélia S. F. e *et al.* Sacolas plásticas: destinações sustentáveis e alternativas de substituição. *Polímeros*, São Carlos, v. 22, n. 3, p. 228-237, 2012. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282012000300005&lng=pt&nrm=iso>. acessos em 26 jun. 2020. Epub 14-Jun-2012. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282012005000036>.

SPINACE, Márcia Aparecida da Silva; DE PAOLI, Marco Aurelio. A tecnologia da reciclagem de polímeros. *Quím. Nova*, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 65-72, Feb. 2005. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422005000100014&lng=en&nrm=iso>. accesson 20 May 2020. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000100014>.

TECHDUTO. **RECICLAGEM DO PEAD**. 2019. Disponível em: <https://www.techduto.com.br/reciclagem-do-pead/>. Acesso em: 11 jun. 2020.

VALT, R. B. G. Análise do Ciclo de Vida de Embalagens de Pet, de Alumínio e de Vidro para Refrigerantes no Brasil variando a Taxa de Reciclagem dos Materiais. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Área de Concentração em Engenharia de Processos Térmicos e Químicos, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento aos técnicos do Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, Mauro, Luis e, em especial, Kleyto, pela ajuda e suporte dado para a realização dos experimentos. Mesmo nesse período de pandemia, todos foram bastante solícitos, à disposição para ajudar.

Muito obrigado por me ajudarem a realizar esse projeto!