

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS, MECÂNICAS E MICROESTRUTURA DAS BLENDS POLIMÉRICAS DE POLIPROPILENO E POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE

ANALYSIS OF THE THERMAL, MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF POLYPROPYLENE AND HIGH-DENSITY POLYETHYLENE POLYMER BLENDS

Ana Luiza da Silva Pereira¹
Jucleiton José Rufino de Freitas²

RESUMO

A blenda é uma mistura física de dois ou mais polímeros, sem forte ligação química, e atualmente vem ganhando destaque no setor produtivo, devido às suas diversas aplicações, tais como: embalagens, tubos, componentes automotivos entre outros. Dois polímeros amplamente utilizados na indústria de plásticos são o Polipropileno (PP) e Polietileno de Alta Densidade (PEAD), devido ao seu baixo custo, reciclabilidade e reprocessamento. Assim, conhecer as propriedades desses dois polímeros torna-se importante. Portanto, este trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento mecânico, térmico e análise da microestrutura de blendas poliméricas a partir de resíduos extrudados da indústria polimérica. Os pellets foram utilizados como matéria-prima para a confecção das blendas por extrusão, nas quais foram analisadas as propriedades mecânicas através do ensaio de tração, e as propriedades térmicas através da Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e a microestrutura por MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura).

Palavras-chave: blendas; polímeros; extrusão.

ABSTRACT

Blend is a physical mixture of two or more polymers, without a high degree of chemical bonding, and is currently gaining prominence in the manufacturing sector due to its various applications, such as packaging, pipes, automotive components, and others. Two polymers widely used in the plastics industry are polypropylene (PP) and high-density polyethylene (HDPE), due to their low cost, recyclability, and reprocessing. Thus, knowing the properties of these two polymers becomes important. Therefore, this work aims to study the mechanical and thermal behavior and analyze the microstructure of polymer blends from extruded waste from the polymer industry. The pellets were used as raw material for the production of blends by extrusion, where the mechanical properties were analyzed through tensile testing, and the thermal properties through Differential Scanning Calorimetry (DSC) and the microstructure by SEM (Scanning Electron Microscope).

Keywords: blends; polymers; extrusion.

¹ Bacharelada em Engenharia de Materiais - Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2025.

² Doutor em Química pela Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

catalisadores de Ziegler-Natta ou Phillips, o que influencia na orientação, alinhamento e empacotamento das cadeias do polímero em questão, o tornando mais cristalino, e conseqüentemente com maior temperatura de fusão. Essas características influenciam nas propriedades mecânicas do polímero, visto que materiais bem orientados, com cadeias lineares são aproximadamente dez vezes mais resistentes do que os fabricados a partir do polímero não orientado, isso porque a orientação aumenta o empacotamento das cadeias e conseqüentemente também eleva a rigidez do polímero⁶. Além de sua grande versatilidade e combinação única de propriedades físicas e químicas, possui outras propriedades importantes, semelhantes às observadas no polipropileno, o que é de tamanha importância na produção das blendas. O PEAD possui elevada resistência química, alta resistência ao impacto, boa resistência à tração, podendo suportar grandes tensões sem se romper, ainda que ao compará-los com o polipropileno apresentam menor resistência⁷.

Polímero Virgem X Extrudado

O polímero virgem tende a ter propriedades mais consistentes e previsíveis em comparação com polímeros reciclados, tornando-o a escolha preferida em aplicações onde alta qualidade e desempenho são essenciais. Outra qualidade importante é que esses polímeros apresentam alta pureza química, resistência mecânica superior e estabilidade térmica, o que os torna ideais para aplicações que demandam durabilidade e qualidade⁸. Além disso, oferecem boas propriedades de barreira e compatibilidade com outros materiais.

Sua processabilidade é vantajosa, facilitando a moldagem e outros processos industriais⁹.

Já o extrusado é um tipo de polímero que foi processado por extrusão. A extrusão é um método de fabricação que envolve o derretimento do polímero e é moldado para criar objetos diversos. O polímero é forçado através de um orifício em alta temperatura e pressão, resultando em uma forma contínua ou semicontínua. Esse processo é comumente utilizado para criar tubos, perfis, filmes, folhas e outros produtos de plástico com formatos específicos e propriedades desejadas¹⁰.

Os polímeros virgens e extrusados apresentaram diferenças significativas em relação à produção, às propriedades e às aplicabilidades. Avaliando suas características, é possível determinar vantagens e considerar possíveis combinações entre eles, normalmente o preço do plástico reciclado é 40% inferior ao da resina virgem¹¹. Assim, a opção pelo material reciclado traz benefícios, como a redução de custos, o aumento da competitividade e o auxílio na preservação ambiental. No cenário de produção de polímeros, a junção de polímeros virgens e os polímeros extrusados abre um leque de possibilidades interessantes e vantajosas. Por meio dessa combinação, é possível aprimorar significativamente a qualidade e a funcionalidade dos produtos finais, estendendo-se desde aplicações críticas que exigem máxima consistência até a produção de componentes de alto desempenho com características mecânicas avançadas¹².

Em suma, a combinação estratégica entre polímeros virgens e polímeros extrusados ilustra um cenário promissor na fabricação de produtos

plásticos. Através dessas combinações é possível não apenas elevar a qualidade e a consistência dos produtos, mas também explorar a fronteira do desempenho mecânico, atendendo assim às demandas crescentes por produtos duráveis e confiáveis em diversas indústrias¹³.

Nesse sentido, os polímeros mais reciclados após o uso no setor industrial são embalagens de PET, de PVC, de PP e de PE, engradados de PEAD e filmes de PE, PP, PVC e PET¹⁴. De modo geral, as indústrias que estão mais interessadas em reciclar seus resíduos poliméricos são dos segmentos de embalagens e automotivo¹⁵. Além de apresentar uma finalidade mais sustentável para esses resíduos, a empresa pode reutilizar esse material reciclável na produção de novos produtos e assim adquirindo uma economia dentro do processo produtivo reduzindo o custo da matéria-prima, também é possível formular os polímeros adicionando pequenas quantidades de material virgem, visando melhorar as propriedades dos polímeros reciclados¹⁶.

Uma forma que se mostrou viável e sustentável de se obter um material polimérico, após a reciclagem, capaz de ser conformado novamente são as blendas poliméricas. Segundo a IUPAC blenda polimérica é uma mistura macroscopicamente homogênea de duas ou mais espécies diferentes de polímeros, sem que haja reação química entre eles. A interação entre as cadeias poliméricas é predominantemente do tipo secundária, ou seja, através de forças intermoleculares¹⁷. As interações mais comuns são as ligações de hidrogênio, dipolo-dipolo e transferência de carga¹⁸. Além disso, para que seja considerada uma blenda, é necessário que os compostos tenham no mínimo uma concentração superior a 2% em massa do segundo componente escolhido¹⁹.

A importância das blendas poliméricas pode ser destacada em vários aspectos: ajuste de uma propriedade para conseguir utilizar o material numa aplicação específica; redução de custos, ao utilizar dois polímeros menos dispendiosos com características divergentes, em vez de um único mais caro com todas as propriedades que se quer obter; facilidade de obtenção, visto que o processamento de blendas poliméricas é mais vantajoso que dos polímeros individuais, sendo processados com maior facilidade por diferentes técnicas de fabricação, como moldagem por injeção, extrusão, sopro e outras. Por fim, as blendas contribuem para a sustentabilidade, permitindo a reciclagem de polímeros de diferentes tipos, para obtenção de um novo material com propriedades adequadas e que possa ser reciclado com maior eficiência²⁰.

O presente trabalho visa a obtenção e análise das propriedades térmicas, mecânicas e microestrutura de blendas poliméricas a partir da reciclagem de peças plásticas compostas por Polipropileno e Polietileno de Alta Densidade, refugadas no processo de injeção plástica na indústria polimérica.

METODOLOGIA

As blendas poliméricas utilizadas consistiam em uma mistura de material virgem e extrudado de polipropileno e polietileno de alta densidade, na proporção em 1:1 entre material virgem e extrudado. Foram obtidas na empresa Alpha Plast, localizada no município de Jabotão dos Guararapes/PE.

As blendas obtidas foram caracterizadas por ensaio mecânico de resistência à tração, ensaio térmico de Differential Scanning Calorimetry (DSC) e microestrutura por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)²¹.

Materiais

Os polímeros virgens utilizados foram o copolímero heterofásico CG600 de polipropileno (PP) e polietileno de alta densidade (PEAD) FEA 301, ambos fornecidos pela Braskem. Além disso, os polímeros extrudados de polipropileno e polietileno de alta densidade (Figura 3) foram obtidos e fornecidos pela indústria polimérica, os quais foram obtidos a partir de peças refugadas e rebarbas do processo de injeção plástica.

Figura 3 – Pellets de PEAD Virgem



Fonte: Elaborado pela própria autora.

A obtenção dos corpos de prova foi desenvolvida no laboratório de polímeros do Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) da Universidade Federal de Pernambuco.

Inicialmente, os materiais foram submetidos ao processo de extrusão em uma mini extrusora da Thermo Fisher Scientific (Figura 4).

Figura 4 – Mini-extrusora de rosca dupla cônica HAAKE Minilab



Fonte: Elaborado pela própria autora.

As blendas foram preparadas na proporção 50:50 (material virgem/material extrudado). Em seguida, foi utilizada uma mini-injetora HAAKE MiniJet II da Thermo Fisher Scientific para obtenção dos corpos de prova (Figura 5).

Figura 5 – Mini-injetora HAAKE MiniJet II e Molde



Fonte: Elaborado pela própria autora.

As amostras obtidas foram submetidas ao teste de tração na máquina universal de ensaios mecânicos modelo WDW-50, a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), com o equipamento modelo DSC25 da marca TA Instruments e as micrografias foram obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo VEGA 3 da marca TESCAN.

Procedimento Experimental

Extrusão

O processo de obtenção de blendas poliméricas foi iniciado pela pesagem precisa de 5,0 g materiais poliméricos de interesse na proporção 1:1. Utilizou-se uma balança analítica para garantir a acurácia das quantidades empregadas, seguindo as proporções estabelecidas no planejamento experimental. Adotou-se a quantidade de 20,0 g na proporção 1:1 para ambas as blendas de PP e PEAD.

Os materiais poliméricos foram adicionados na mini extrusora de forma controlada (4 x 5,0 g) para garantir uma

distribuição homogênea dos componentes, evitando variações indesejadas nas propriedades finais das blendas. A taxa de adição do material foi monitorada para assegurar consistência ao longo do processo.

A extrusão foi realizada conforme as condições experimentais definidas com base nos parâmetros pré-definidos pela empresa Alpha Plast. Durante todo o processo, foram registrados dados sobre as variáveis experimentais, como temperatura, pressão e velocidade de extrusão (Tabela 1).

Tabela 1 – Parâmetros do processo de extrusão das blendas

Condições de processamento		
Parâmetros	PP	PEAD
Temperatura	175 °C	155 °C
Velocidade de extrusão	72 rpm	72 rpm
Pressão	14 bar	61 bar
Ciclo	5 min	5 min

Fonte: Elaborado pela própria autora.

A mini extrusora permitiu o controle preciso desses parâmetros, contribuindo para a reprodutibilidade dos resultados e a obtenção das blendas de forma homogênea.

Após o processo de extrusão, foi obtido um filamento contínuo de secção retangular, onde o mesmo foi dividido em segmentos menores, os quais foram pesados individualmente e preparados para injeção (Figura 6).

Figura 6 – Material obtido após a extrusão



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Injeção

A primeira etapa consistiu na pesagem

das blendas poliméricas em quatro porções de 5,0 g. Essa abordagem foi necessária devido a condição limite de trabalho do equipamento. A blenda polimérica foi cuidadosamente dosada na alimentação da Mini-injetora HAAKE MiniJet II. O processo de dosagem foi realizado com o auxílio de uma pinça. Cada lote foi inserido individualmente, garantindo a homogeneidade de cada corpo de prova. Os moldes utilizados foram compatíveis com os padrões da ASTM D638-10 tipo V²². O procedimento de injeção foi iniciado de acordo com as especificações estabelecidas, controlando parâmetros como temperatura e pressão para garantir a reprodutibilidade do experimento²³. Após a injeção, o material polimérico foi resfriado no molde, permitindo a solidificação completa das blendas poliméricas. Os corpos de prova resultantes foram cuidadosamente removidos dos moldes, para garantir a integridade dimensional e a representatividade das amostras. Durante todo o processo, foram registrados dados sobre as variáveis experimentais, tais como: temperatura da mini-injetora, pressão de injeção, temperatura do molde, temperatura do cilindro e ciclo de injeção.

Tabela 2 – Parâmetros de injeção

Parâmetros de injeção para as blendas	
Temperatura	200 °C
Temperatura do molde	40 °C
Pressão	650 bar
Pressão de recalque	650 bar
Tempo de recalque	15 s
Ciclo	20 s

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Ensaio de Tração

Com os corpos de prova confeccionados e devidamente pesados, foi realizado o ensaio de tração na direção longitudinal dos corpos de prova, seguindo a norma ASTM D638-10, para extrair os valores experimentais das propriedades mecânicas das amostras obtidas. Para o procedimento deste ensaio mecânico, foi utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos, modelo WDW-50E (Figura 7). Os corpos de prova foram

ensaiados na velocidade 10mm/minuto.

Figura 7 – Máquina universal de ensaios mecânicos



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Com os resultados obtidos, foi elaborado o gráfico de tensão versus deformação para cada tipo de polímero analisado.

Análise das amostras – DSC

Os materiais preparados foram submetidos à análise por DSC, que foi realizada utilizando o equipamento modelo DSC 25 (TA Instruments). As amostras de blendas foram encapsuladas com o filme de acetato de polivinila (PVA), utilizando-se entre 5,0 mg - 10,0 mg de amostra. Em seguida, as amostras foram posicionadas no equipamento sob atmosfera inerte (gás nitrogênio). Posteriormente, os parâmetros de análise foram configurados no software TRIOS:

- Temperatura inicial 0° C;
- Aquecimento até 230° C com taxa de 10° C/min;
- Resfriamento até 0° C com taxa de 10° C/min;
- Aquecimento até 230° C com taxa de 10° C/min.

O aquecimento foi monitorado através do gráfico em tempo real gerado pelo DSC no software TRIOS, que permite ver todas as variáveis envolvidas

no processo.

Análise das amostras – MEV

Para a caracterização da morfologia das amostras, foi utilizada a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As amostras foram previamente extraídas dos corpos de provas obtidos por injeção plástica, para exposição das superfícies internas e foram fixadas em suportes metálicos utilizando fita condutiva de carbono. Para a realização do MEV se faz necessário a deposição de uma fina camada de Au-Pd na superfície da amostra para possibilitar a condução elétrica superficial que propicia a geração de imagem pela varredura eletrônica, utilizando-se o metalizador do modelo Desk V da marca Denton Vacuum por 60 segundos, assegurando a condutividade elétrica necessária para a análise. As micrografias foram registradas em diferentes escalas (10nm-200nm) permitindo uma avaliação multiescalar das estruturas formadas com aumento das imagens entre 50x e 5000x.

Figura 8 - Amostras metalizadas



Fonte: Elaborado pela própria autora.

As amostras metalizadas foram submetidas a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura MEV pelo equipamento VEGA 3 da marca TESCAN, operando nas seguintes condições:

- Tensão de aceleração (SEM HV): 10,0 kV
- Distância de trabalho

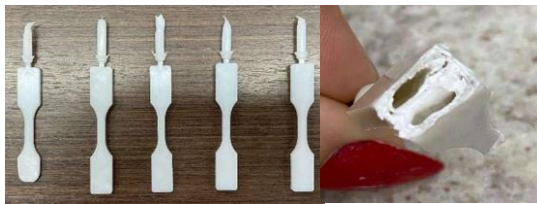
- (WD): aproximadamente 25 mm
- Modo de detecção (Det): Elétrons secundários (SE)
 - Pressão da câmara: HiVac (alto vácuo)
 - Aumento (SEM MAG): De 50x a 5000x, possibilitando a análise da morfologia global da superfície das amostras, permitindo identificar padrões gerais de homogeneidade, distribuição de fases, presença de trincas ou imperfeições superficiais.
 - Escala da imagem: De 10 nm a 200 nm, adequada para observar estruturas de ordem micrométrica e delimitar regiões com contraste de fases.

Essas condições possibilitam a análise da morfologia superficial e da microestrutura das seis amostras obtidas no Centro de Caracterização de Materiais da UFRPE.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, ao seguir a metodologia escolhida foram confeccionadas amostras iniciais (Figura 9) para parametrização e otimização do processo.

Figura 9 – Corpos de prova com defeitos.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

A parametrização do processo é extremamente importante para obter amostras em temperatura, tempo e quantidades precisas, além de nos fornecer dados reais do processo para que seja feito ajustes. Após a parametrização do processo, foram obtidos 10 corpos de prova com massa variando entre 1,32 g a

1,31 g. As amostras apresentam dimensões variando de 3,18 mm a 3,22 mm de espessura, 3,17 mm a 3,22 mm de largura e 61,74 mm a 62,98 mm de comprimento (Figura 10).

Figura 10 – Corpos de prova.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Com isso, foram realizados os ensaios de tração em cada corpos de prova, porém por questões de adequação de resultados foram escolhidos 6 corpos de prova, 3 da blenda PP e 3 da blenda PEAD. Sendo obtidos um gráfico de tensão x deformação para cada blenda. Os dados experimentais de limite de resistência à tração (σ) serão obtidos dividindo a carga máxima em Newtons (N) pela seção de área transversal (mm^2) calculada a partir da equação 1, onde multiplica-se a espessura x largura dos corpos de prova analisados.

Equação 1 - Área da seção transversal

$$A = E \times L \quad (1)$$

Onde,
 A = Área do corpo de prova (mm^2)
 C = Espessura (mm)
 L = Largura (mm)

Abaixo é mostrado um exemplo com os dados obtidos no corpo de prova 01 (CP – PEAD 01) da blenda de (PEAD) durante o ensaio de tração.

Onde,
 $E = 3,18 \text{ mm}$
 $L = 3,17 \text{ mm}$
 $A = 3,18 \text{ mm} \times 3,17 \text{ mm}$

$$A = 10,08 \text{ mm}$$

Sabendo o valor da área, calculou - se a tensão máxima do corpo de prova analisado. Esse dado é obtido através da Equação 2 abaixo.

Equação 2 - Tensão máxima

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Onde,

$\sigma =$ Tensão Máxima (N/ mm²)

ou

Mpa

$F =$ Força máxima (N)

$A =$ Área (mm²)

Tendo como resultado experimental que a força máxima para o CP - PEAD 01 foi de 292,13 N e a área encontrada na equação 1 foi de 10,08 mm², temos que a tensão máxima é de 28,98 N/mm². Todos os cálculos foram feitos de forma análoga para os outros corpos de provas a fim de fazer as seguintes comparações (Tabela 3 e 4).

Tabela 3 - Dados experimentais da Blenda de PEAD.

Amostras	Força (N)	Área (mm ²)	Tensão (Mpa)
CP - 1	292,13	10,08	28,98
CP - 2	249,04	10,17	24,48
CP - 3	307,06	10,27	29,89

Fonte: Elaborada pela própria autora.

De acordo com a tabela 3, observa-se que os valores de tensão variaram de 24,98 até 29,98 Mpa. As amostras apresentaram valores próximos entre si, exceto a amostra CP-2.

Portanto, é possível analisar o comportamento de deformação de cada corpo de prova a partir dos dados obtidos no ensaio de tração. Os corpos de prova foram ensaiados até a fratura ou queda do

limite de resistência à tração (Figura 11 e 12).

Figura 11 – Corpos de prova PEAD ensaiados.



Fonte: Elaborada pela própria autora.

Após a obtenção dos testes de tração com a blenda PEAD, foram realizados os cálculos de tensões com o blenda de PP. De acordo com a tabela 4, a tensão variou de 24,72 até 35,46 Mpa, as amostras tiveram valores de tensão próximos, exceto a amostra CP-1.

Tabela 4 - Dados experimentais da Blenda de PP.

Amostras	Força (N)	Área (mm ²)	Tensão (Mpa)
CP - 1	366,32	10,33	35,46
CP - 2	246,39	10,27	23,99
CP - 3	253,96	10,27	24,72

Fonte: Elaborada pela própria autora.

A figura 12, mostra os corpos de prova de PP após o ensaio de tração.

Figura 12 – Corpos de prova PP ensaiados.

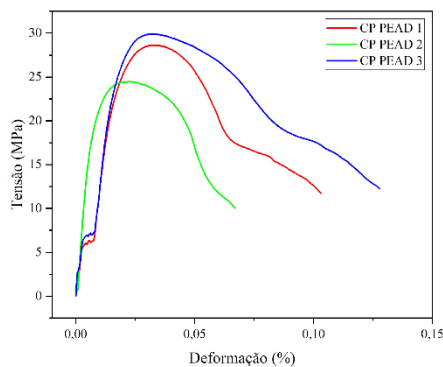


Fonte: Elaborada pela própria autora.

Na figura 12, o corpo de prova do meio corresponde ao CP – 01 apresentou uma fratura dúctil, onde há um estiramento da zona transversal e embranquecimento da zona até a ruptura.

Com as informações obtidas, foram plotados os gráficos de tensão (Mpa) x deformação (%) para cada corpo de prova. As curvas foram obtidas utilizando os resultados das tabelas anteriores, aplicando as equações 1 e 2. A figura 13 mostra o gráfico para o material PEAD.

Figura 13 – Ensaio de Tração Blenda PEAD



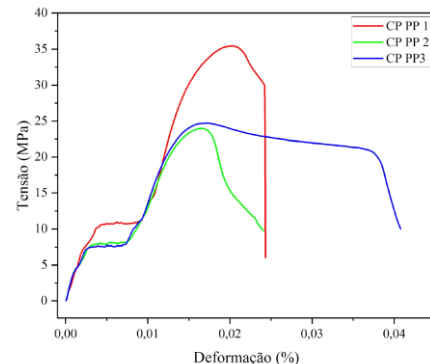
Fonte: Elaborada pela própria autora.

Nas curvas do gráfico da blenda de PEAD é possível observar a zona elástica característica do material PEAD, que em comparação ao do PP, possui uma zona elástica maior e permite que o material sofra mais deformação elástica antes de entrar na zona de deformação plástica, os corpos de prova apresentaram fratura dúctil (Figura 13).

Analisando as curvas da blenda de PP é notável que os corpos de prova sofreram pouca deformação antes do rompimento, mas um pouco mais esperado para o material (Figura 14). O CP - 01 PP mostrou uma resistência a tração maior do que Braskem indica para o material virgem, o que leva a acreditar que o material extrusado continha PP com aditivos específicos, que podem aumentar a resistência à tração desse material para a aplicabilidade de uma

peça que exija essa performance.

Figura 14 – Ensaio de Tração Blenda PP



Fonte: Elaborada pela própria autora.

Com a obtenção das curvas de tensão x deformação, foi realizado o cálculo da média da tensão de cada blenda usando a equação 3.

Equação 3 – Média da Tensão máxima

$$\sigma(Cp - 01) + \sigma(Cp - 02) + \sigma(Cp - 03) = \frac{\quad}{3} \quad (3)$$

Os valores médios obtidos de tensão para cada blenda de PP e PEAD foi de 28,05 e 27,78 Mpa, respectivamente. Ao comparar os dados obtidos com as tensões fornecidas pela Braskem²⁴ de do PP e PEAD virgem (tabela 5), é possível observar a diferença de valores teóricos e experimentais, isso se dá principalmente pela forma como esses materiais foram processados.

Tabela 5 - Tensão material virgem x Tensão blenda.

Material	Tensão (Mpa) Braskem	Tensão (Mpa) Experimental
PP	30	28,05
PEAD	35	27,78

Fonte: Elaborada pela própria autora.

De forma geral, os valores se mostraram próximos e alinhados ao esperado de uma blenda composta de 50% de um material que já foi processado. As curvas obtidas se assemelham aos do

material virgem de PEAD e PP. Entretanto, a diferença dos valores teóricos e experimentais podem ser atribuídas a alguns fatores que influenciam na redução de valores atrelados a essa propriedade mecânica, são eles:

- **Diferença de Temperatura:** Apesar de seguir os parâmetros tabelados em que esses materiais são processados, o processo é diferente por utilizar maquinários em escalas diferentes do usual do dia a dia na indústria. Isso pode resultar em variações na propriedade mecânica do material, incluindo a resistência à tração.

- **Degradação Térmica:** Se o aquecimento não for uniforme e controlado, partes do material podem ser expostas a temperaturas muito elevadas, levando à degradação térmica do polímero. A degradação pode resultar na quebra de ligações químicas, redução da massa molecular e, conseqüentemente, na diminuição da resistência à tração.

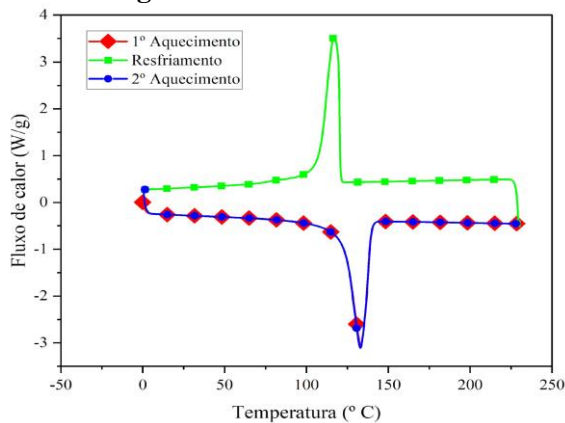
- **Cristalização:** Se a temperatura não for controlada adequadamente, a cristalização pode ser incompleta ou desigual, afetando negativamente a resistência à tração.

- **Controle Dimensional:** Os corpos de prova foram injetados em um molde padronizado de acordo com a ASTM 638, então os mesmos apresentaram pouca variação dimensional. Sendo assim, obtivemos corpos de prova com espessuras, tamanhos e pesos aproximados.

- **Tensões Residuais:** O molde possuía controle de temperatura próprio, então isso possibilitou o controle da temperatura desse resfriamento. Porém, a nível industrial é possível controlar a temperatura do material em cada zona do canhão de uma injetora e a mini injetora utilizada não possui canhão, apenas um cilindro de aquecimento. O resfriamento desigual ou rápido do material pode criar tensões residuais dentro do material polimérico. Essas tensões residuais podem enfraquecer o material e afetar sua resistência à tração, especialmente quando submetido a cargas.

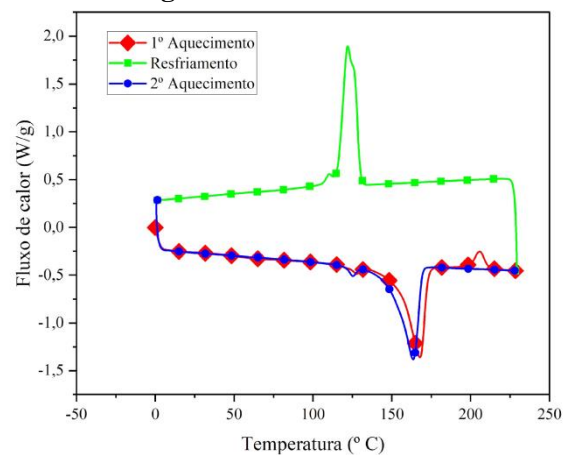
Seguindo a análise para as propriedades térmicas das blendas de PP e PEAD, foi possível obter as seguintes curvas com auxílio do Origin da análise do DSC para cada blenda.

Na figura 15 ilustra o comportamento térmico da blenda de polietileno de alta densidade (PEAD). A análise da curva de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) revela que as temperaturas de fusão e cristalização para a blenda são por volta de 130-140°C e 110- 130 °C, respectivamente. Ao observar o gráfico, evidencia-se que a blenda inicia sua transição vítrea em aproximadamente de 80-100°C, com a perda da forma sólida. A temperatura de transição vítrea do PEAD marco nesse processo, e o ponto de fusão inicial ocorre a 120-130°C, indicando uma etapa endotérmica. À medida que a temperatura aumenta, a taxa de fluxo de calor cresce até atingir o ponto de pico que está entre 130-150°C, marcando a fusão do blenda juntamente com a transição de primeira ordem. O consumo total de energia durante esse processo foi de 3-4 (W/g), abrangendo o período do início ao final do ponto de fusão. O ponto de pico indicou a completa solidificação em 110-130°C. A solidificação ou recristalização do da blenda foi concluída a 110 - 120°C. Os valores obtidos se mostraram próximos do da análise de DSC do PEAD virgem, o que comprova que a blenda não sofreu degradação na sua estrutura ao ponto de afetar negativamente suas propriedades térmicas quando comparada às propriedades do material virgem²⁵.

Figura 15 – DSC Blenda PEAD

Fonte: Elaborada pela própria autora.

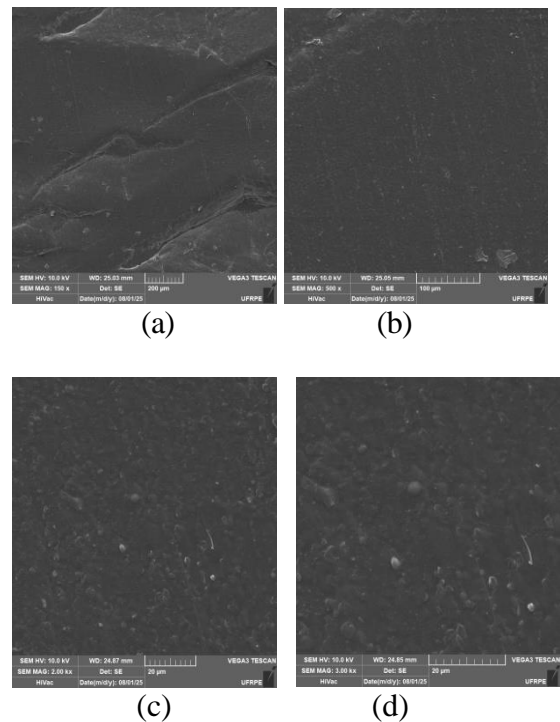
A análise da curva de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) da blenda de polipropileno demonstra que as temperaturas de fusão e cristalização para a blenda são por volta de 150-175°C e 125-135 °C, respectivamente (Figura 15). Ao observar o gráfico, evidencia-se que a blenda inicia sua transição vítrea em aproximadamente de 100-120°C, com a perda da forma sólida. A temperatura de transição vítrea do PP marco nesse processo, e o ponto de fusão inicial ocorre a 150-160°C, indicando uma etapa endotérmica. À medida que a temperatura aumenta, a taxa de fluxo de calor cresce até atingir o ponto de pico que está entre 140-175°C, marcando a fusão do blenda juntamente com a transição de primeira ordem. O consumo total de energia durante esse processo foi de 1,5-2 (W/g), abrangendo o período do início ao final do ponto de fusão. O ponto de pico indicou a completa solidificação em 120-130°C. A solidificação ou recristalização do da blenda foi concluída a 130 - 140°C. Os valores obtidos se mostraram próximos do da análise de DSC do PP virgem, o que comprova que a blenda de PP, da mesma forma que a de PEAD, não sofreu degradação na sua estrutura ao ponto de afetar negativamente suas propriedades térmicas quando comparada as propriedades do material virgem²⁶.

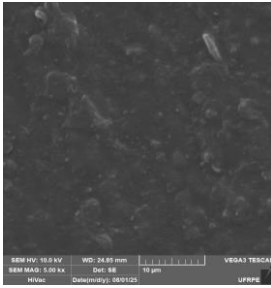
Figura 16 – DSC do PP

Fonte: Elaborada pela própria autora.

A caracterização morfológica das amostras foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com o objetivo de avaliar a estrutura superficial e as possíveis alterações microestruturais decorrentes do reprocessamento dos materiais.

Figura 17 - Microscopia Blenda de PP:
(a) 150x, (b) 500x, (c) 2000x, (d) 3000x e (e) 5000x





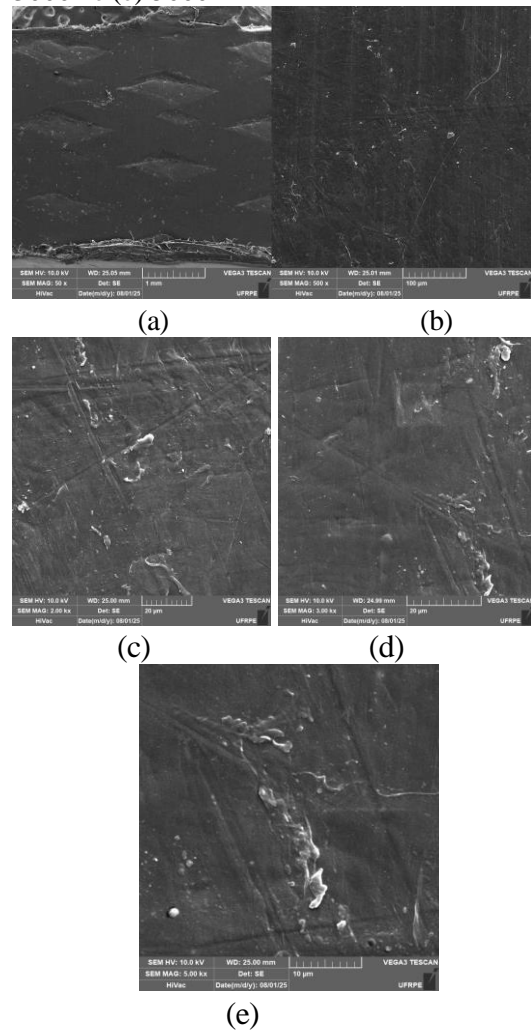
(e)

Fonte: Elaborada pela própria autora.

A análise por MEV da blenda de polipropileno (PP) revelou uma morfologia característica de um sistema parcialmente compatível, com presença de descontinuidades e irregularidades superficiais distribuídas ao longo das diferentes escalas de ampliação. Nas imagens de menor ampliação (a) e (b), observa-se uma superfície relativamente contínua, porém com presença de linhas de fratura e regiões com textura mais áspera, o que indica heterogeneidade morfológica. Pequenas cavidades e imperfeições visuais sugerem falhas de adesão entre as fases virgem e a reprocessada, indicando a miscibilidade limitada do sistema. À medida que ocorre o aumento na ampliação das micrografias (c), (d) e (e) torna-se evidente a presença de domínios discretos com diferentes contrastes, além de inclusões arredondadas e estruturas alongadas. Tais regiões podem ser atribuídas à coexistência de fases com diferentes graus de cristalinidade e viscosidade, resultado direto do histórico térmico distinto entre o material virgem e o extrudado. As imagens também sugerem que, embora não haja separação de fases visível em grande escala, ocorrem falhas interfaciais, o que pode comprometer as propriedades mecânicas da blenda. Esse comportamento está alinhado com o que foi descrito para blendas de PP na literatura, que identificaram que a adição de material reciclado ao PP reduz sua homogeneidade estrutural e pode impactar na sua integridade mecânica se não forem aplicadas estratégias de compatibilização²⁷.

A blenda PP 50:50 apresenta uma morfologia intermediária entre os materiais virgem e extrudado, refletindo a influência da degradação do reprocessamento e a necessidade de otimização da composição ou adição de compatibilizantes para melhorar a dispersão das fases e a coesão interfacial²⁸.

Figura 18 - Microscopia Blenda de PEAD: (a) 50x, (b) 500x, (c) 2000x, (d) 3000x e (e) 5000x



Fonte: Elaborada pela própria autora.

As micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizadas com o objetivo de avaliar a morfologia superficial das amostras de blendas de PEAD compostas por 50% de material virgem e 50% de material extrudado. As imagens, capturadas em diferentes ampliações 50x a

5000x (Figura 18), revelam detalhes importantes sobre a microestrutura. A micrografia obtida em 50x (Figura 18a) é possível visualizar regiões em formatos geométricos precisos, devido a fixação da garra no corpo de prova durante o ensaio de tração. São visíveis marcas lineares e impressões mecânicas atribuídas à garra do equipamento de tração, utilizadas para segurar a amostra durante o teste. Essas marcas não representam características intrínsecas da microestrutura da blenda, mas sim evidências do esforço mecânico aplicado durante o ensaio. Essa imagem reforça a importância de selecionar áreas adequadas da amostra para análise morfológica, evitando interferência de fatores externos como deformação mecânica induzida. A imagem na figura 18b em ampliação de 500x fornece uma visão panorâmica da superfície da amostra. Embora em macroescala a superfície aparente ser contínua, são visíveis pontos de variações texturais. Na ampliação de 2000x (Figura 18c), há uma superfície com morfologia significativamente irregular, caracterizada por sulcos transversais, fissuras rasas e a presença de microinclusões dispersas. Tais características são típicas de regiões submetidas a tensões residuais e histórico térmico distinto, como é o caso de blendas poliméricas obtidas por extrusão de materiais reprocessados. A distribuição dessas inclusões de morfologia indefinida, aliada à orientação preferencial dos sulcos, indica baixa coesão interfacial entre as fases, o que é compatível com misturas imiscíveis ou parcialmente compatíveis, onde não há formação de uma única fase contínua homogênea²⁹.

Com o maior detalhamento na ampliação de 3000x (Figura 18d), a micrografia revela domínios morfológicamente contrastantes, compostos por inclusões de geometria esférica ou arredondada. A presença de porosidade superficial sugere degradação térmica localizada, possivelmente associada à oxidação das cadeias

poliméricas ou quebra de ligações por sobreaquecimento, o que reduz o grau de cristalinidade e afeta diretamente as propriedades mecânicas da blenda³⁰. Essas características da microestrutura reforça a presença de uma fraca interação interfacial, frequentemente relatada em sistemas sem o uso de agentes compatibilizantes³¹. Na imagem com aumento de 5000x (Figura 18e) onde são evidentes estruturas alongadas e filamentosas, além de áreas de colapso superficial, compatíveis com regiões onde houve retração do polímero durante o resfriamento rápido ou ruptura da fase contínua. Essa morfologia revela uma heterogeneidade topográfica relevante, com distribuição irregular das fases e ausência de transição gradual entre elas, indicando que não houve difusão eficiente entre o PEAD virgem e o reciclado durante a extrusão. Tais observações confirmam o comportamento clássico de blendas fisicamente compatível, porém morfológicamente heterogênea, o que impacta nas propriedades mecânicas e estabilidade dimensional do material final³². As imagens obtidas por MEV reforçam os resultados obtidos nos ensaios de tração e na caracterização térmica por DSC, ao demonstrar a existência de microestruturas intermediárias nas blendas analisadas. A presença de falhas interfaciais, domínios discretos e rugosidade superficial nas imagens de alta ampliação são indicativos de uma miscibilidade limitada entre o PEAD virgem e o reciclado, além de sugerirem degradação parcial da estrutura do material extrusado. De acordo com a literatura, esses efeitos são comuns em blendas obtidas sem o uso de compatibilizantes específicos³³. O comportamento morfológico observado reforça a necessidade de controle mais rigoroso dos parâmetros de processamento e o possível uso de agentes compatibilizantes em futuras formulações para melhorar a dispersão das fases e a adesão interfacial, contribuindo para a melhoria das propriedades mecânicas e

térmicas do material.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho, foi possível observar que os polímeros virgens, tanto o PP quanto o PEAD, tendem a exibir características mecânicas superiores em comparação com suas contrapartes blendas, incluindo uma maior resistência à tração. Além disso, foi possível atestar que o processo de extrusão influencia nas propriedades mecânicas, resultando em uma menor resistência à tração, porém os valores se mantêm próximos dos fornecido para o material virgem, o que traz a viabilidade da utilização dessas blendas na produção de produtos com qualidade e segurança. Para as propriedades térmicas, as condições de processamento das blendas se manteriam na faixa já prevista para o material virgem considerando as variações no processo de injeção plástica, visto que não há degradação significativa causada pelo processo de extrusão que torne os parâmetros de processo inadequado para as blendas. A microestrutura das blendas prova que o processo de obtenção dos corpos de provas não pode oferecer uma homogeneização precisa. As blendas formadas por 50% de material virgem e 50% de material extrudado, tanto para o PP quanto para o PEAD, demonstraram microestrutura intermediária. Observou-se a coexistência de regiões ordenadas e desorganizadas, com falhas de adesão interfacial e evidências de miscibilidade parcial entre as fases. Esses aspectos indicam que a compatibilidade entre o polímero virgem e o reprocessado é limitada dado a obtenção das blendas neste trabalho que diferem das condições industriais. Portanto, a análise por MEV demonstrou-se essencial para compreender a influência do reprocessamento e da mistura de materiais na microestrutura dos polímeros estudados. As observações micrográficas confirmam a obtenção das blendas no processo e a redução das suas propriedades mecânicas e térmicas, mesmo

assim, sendo possível a obtenção de materiais seguindo os mesmo parâmetros de processo do material virgem. Porém, destaca a importância do uso de material reciclado e a necessidade de estratégias de compatibilização para melhorar o desempenho de blendas recicladas. Essas diferenças devem ser consideradas cuidadosamente no design e na seleção de materiais para aplicações específicas, levando em conta os requisitos de desempenho, as condições de processamento e a viabilidade econômica. Vale ressaltar que esse estudo destaca a importância da compreensão das propriedades mecânicas, térmicas e microestruturais de blendas poliméricas para otimizar o desempenho dos produtos e garantir sua durabilidade. Contudo, afirma a necessidade de controle rigoroso de processos durante a fabricação de materiais, para minimizar a degradação e as variações nas propriedades mecânicas, térmicas e microestrutura das blendas. A pesquisa contribui para o avanço do conhecimento em ciência dos polímeros e oferece uma base para a tomada de decisões informadas na seleção e aplicação de polipropileno e polietileno de alta densidade em uma ampla aplicações industriais e também em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- 1 RAHMANI, E. *et al.* On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1302–1308, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/259128835_On_the_mechanical_properties_of_concrete_containing_waste_PET_particles. Acesso em: 10 fev. 2024.
- 2 SELKE, S. E. M.; CUTLER, J. D. Plastics packaging: properties, processing, applications and regulations. *In*: SELKE,

- S. E. M.; CUTLER, J. D. **Plastics Packaging**. Munich: Hanser, 2000. p. I-XX. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/314940089_Plastics_Packaging_Properties_Processing_Applications_and_Regulations. Acesso em: 10 fev. 2024.
- 3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. [S. l.]: Abiplast, [2018?]. *Site*. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/>. Acesso em: 10 fev. 2024.
- 4 ASSUMPCÃO, M. E. **Desenvolvimento de compósitos polipropileno/pó de madeira com base no planejamento fatorial 2²**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2000.
- 5 GARY, B. C.; COSTA, A. M.; BRAGIL, A. F.; COSTA, W. Estudo térmico do PEAD e PEBD através de análise térmica Differential Scanning Calorimeter (DSC). **Revista Acadêmica Oswaldo Cruz**, [s. l.], ano 5, ed. 20, out./dez. 2018. Disponível em: https://oswaldocruz.br/revista_academica/content/pdf/Edicao_20_BRUNO_C_GARY.pdf. Acesso em: 10 fev. 2024.
- 6 DOAK, K. W. Ethylene polymers. In: MARK, H. M. *et al.* (Ed.). **Encyclopedia of polymer science and engineering**. New York: John Wiley & Sons, v. 6, 1986.
- 7 COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. DE. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 1–13, jan. 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/vzPmcF9tLYGRPvK67CnWj9S/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 10 fev. 2024.
- 8 CRUZ, S. A. *et al.* Avaliação das propriedades reológicas de blendas de PEAD virgem/PEAD reciclado. **Polímeros**, v. 18, n. 2, p. 144–151, abr. 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/KrFcZHR5fM9zPRwd5ZLt9Dd/>. Acesso em: 10 fev. 2024.
- 9 ELIAS, H. G. **An introduction to polymer science**. 1. ed. Weinheim: Verlag Chemie, 1997.
- 10 CARVALHO, A. J. F. **Extrusão de polímeros**. Enviado por Ulisses Oliveira. [S. l.]: Scridb, [201-?]. 46 p. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/625608955/Extrusao-de-Polimero-Nocoes-Basicas>. Acesso em: 10 fev. 2024.
- 11 ZANIN, M.; MANCINI, S. D. A reciclagem de plásticos. In: ZANIN, M.; MANCINI, S. D. **Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia**. São Carlos: EdUFSCar, 2015. p. 84–136. ISBN 85-7600-020-2.
- 12 SPINACÉ, M. A. da S.; DE PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/bTLkNHWGnpsj4SWWjgLB49L/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 fev. 2024.
- 13 TADMOR, Z.; GOGOS, C. G. **Principles of Polymer Processing**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. Disponível em: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780471792765_A23547130/preview-9780471792765_A23547130.pdf. Acesso em: 10 fev. 2024.
- 14 KISHIMOTO, A.; OKA, T.; YOSHIDA, K.; NAKANISHI, J. Cost effectiveness of reducing dioxin emissions from municipal solid waste incinerators in Japan. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 35, p. 2861-2866, 2001. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es001>

782z. Acesso em: 10 fev. 2024.

15 PASSADOR, F. R.; PESSAN, L. A.; RODOLFO JR, A. Estado de mistura e dispersão da fase borrachosa em blendas PVC/NBR. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 172–185, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/5GH9WLyJF3QQtjQsNkx8fMx/?format=pdf>. Acesso em: 10 fev. 2024.

16 CANEVAROLO JUNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros**: um texto para tecnólogos e engenheiros. 3. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2010.

17 RIBEIRO, L. C. DE S. *et al.* Aspectos econômicos e ambientais da reciclagem: um estudo exploratório nas cooperativas de catadores de material reciclável do Estado do Rio de Janeiro. **Nova Economia**, v. 24, n. 1, p. 191–214, jan. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/neco/a/gkxxQTpNy5Mz68cXYb8Yw9p>. Acesso em: 10 fev. 2024.

18 SIONKOWSKA, A. Current research on the blends of natural and synthetic polymers as new biomaterials: review. **Progress in Polymer Science**, [s. l.], v. 36, p. 1254–1276, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/251503869_Current_research_on_the_blends_of_natural_and_synthetic_polymers_as_new_biomaterials_Review. Acesso em: 10 fev. 2024.

19 HAGE, E.; PESSAN, L. A. **Aperfeiçoamento em tecnologia de plásticos**: módulo 7: blendas poliméricas. São Carlos: ABPol, 2001.

20 MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1991.

21 FERREIRA, L. A. S. Comportamento mecânico e termo-mecânico de blendas poliméricas PBT/ABS. **Polímeros**, [s. l.],

v. 7, n. 1, p. 67-72, mar. 1997. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/RPKgKkmvcyV3GkCdCpVd9Xc/>. Acesso em: 10 fev. 2024.

22 ADVANCING STANDARDS TRANSFORMING MARKETS. **ASTM D638-03**: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken, PA: ASTM International, [2012]. *Site*. Disponível em: <https://store.astm.org/d0638-03.html>. Acesso em: 10 fev. 2024.

23 CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

24 BUSCA de produtos. [S. l.]: BRASKEM, 2023. *Site*. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/busca-de-produtos>. Acesso em: 15 fev. 2024.

25 NAGY, D.; WELTSCH, Z. Crystallinity and oscillatory shear rheology of polyethylene blends. **Materials**, [s. l.], v. 16, n. 19, p. 6402, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/19/6402>. Acesso em: 15 fev. 2024.

26 ANICET, P. M.; LOUIS-MAX, A. O.; ROLAND, E. M.; SALEM, C.; MERLIN, A. Z. Study of thermal properties of mixed (PP/EPR)/calcium carbonates. **Indian Journal of Science and Technology**, [s. l.], v. 8, n. 11, 2015. DOI: <https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i11/71771>. Disponível: https://www.researchgate.net/publication/281703743_Study_of_Thermal_Properties_of_Mixed_PPEPR_Calcium_Carbonates. Acesso em: 15 fev. 2024.

27 HAMASALIH, H. A.; ABDALRAHMAN, R. M.; ROSTAM, S. Optimizing the blending ratio and processing parameters for ternary blends of recycled polypropylene with recycled high

and virgin linear low-density polyethylene. **Results in Engineering**, [s. l.], v. 18, maio 2023. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101171>. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/370873608_Optimizing_the_blending_ratio_and_processing_parameters_for_ternary_blends_of_recycled_polypropylene_with_recycled_high_and_virgin_linear_low-densities_polyethylene. Acesso em: 15 fev. 2024.

28 ZAHRAN, R.; EL-LATIF, M.; KONSOWA, A.; AWWAD, M. Development of isotropic compatible HDPE/PP blends for structural applications. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 115, p. 1407–1418, 2010. DOI:

<https://doi.org/10.1002/app.30838>.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/239098464_Development_of_Isotropic-Compatible_HDPEPP_Blends_for_Structural_Applications. Acesso em: 15 fev. 2024.

29 ABIS, L.; ABBONDANZA, L.; BRAGLIA, R.; CASTELLANI, L.; GIANNOTTA, G.; PO, R. Syndiotactic polystyrene/high-density polyethylene blends compatibilized with SEBS copolymer: thermal, morphological, tensile, dynamic-mechanical, and ultrasonic characterization. **Macromolecular Chemistry and Physics**, Germany, v. 201, n. 14, p. 1732–1741, 2000. Disponível em:

https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=200902148021857768. Acesso em: 15 fev. 2024.

30 RASTIN, H.; JAFARI, S.; SAEB, M.; KHONAKDAR, H.; WAGENKNECHT, U.; HEINRICH, G. Mechanical, rheological, and thermal behavior assessments in HDPE/PA-6/EVOH ternary blends with variable morphology. **Journal of Polymer Research**, [s. l.], v. 21, p. 1–13, 2014. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/263343462_Mechanical_rheological_and_thermal_behavior_assessments_in_HDPEPA-6EVOH_ternary_blends_with_variable_morphology. Acesso em: 15 fev. 2024.

31 INIGUEZ, C.; MICHEL, E.; GONZÁLEZ-ROMERO, V.; GONZÁLEZ-NÚÑEZ, R. Morphological stability of postconsumer PET/HDPE blends. **Polymer Bulletin**, [s. l.], v. 45, p. 295–302, 2000. DOI:

<https://doi.org/10.1007/S002890070034>.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/225703629_Morphological_stability_of_postconsumer_PETHDPE_blends. Acesso em: 15 fev. 2024.

32 SOUZA, A.; DEMARQUETTE, N. Influence of coalescence and interfacial tension on the morphology of PP/HDPE compatibilized blends. **Polymer**, [s. l.], v. 43, p. 3959–3967, 2002. DOI:

[https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00223-9](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00223-9). Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/229131357_Influence_of_coalescence_and_interfacial_tension_on_the_morphology_of_PPHDPE_compatibilized_blends. Acesso em: 15 fev. 2024.

33 PRACELLA, M. *et al.* Compatibilization and properties of poly(ethylene terephthalate)/polyethylene blends based on recycled materials. **Macromolecular Chemistry and Physics**, [s. l.], v. 203, p. 1473–1485, jul.2002. DOI: [https://doi.org/10.1002/1521-3935\(200207\)203:10/113.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/1521-3935(200207)203:10/113.0.CO;2-4). Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/243810077_Compatibilization_and_properties_of_polyethylene_terephthalatepolyethylene_blends_based_on_recycled_materials. Acesso em: 15 fev. 2024.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas e instituições que contribuíram para a realização deste trabalho. Este trabalho não teria sido possível sem o apoio e a colaboração de diversos indivíduos e organizações que generosamente compartilharam seu tempo, conhecimento e recursos. Agradeço profundamente ao meu orientador Jucleiton José Rufino de Freitas por sua orientação valiosa, paciência e apoio ao longo deste processo. Sua dedicação foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho e minha jornada na UFRPE. Agradeço aos meus amigos do curso de Engenharia de Materiais pela colaboração por todas as discussões e troca de ideias, que foram fundamentais para o desenvolvimento das ideias apresentadas neste trabalho. Não posso deixar de agradecer minha família pelo apoio incondicional ao longo desta jornada acadêmica. Seu amor, compreensão e encorajamento foram meu alicerce durante todo o processo. Sem eles, esse trabalho não seria possível. Aos meus amigos, que estiveram presentes oferecendo palavras de incentivo, apoio e sendo o suporte emocional nos momentos mais desafiadores. Um agradecimento especial a todos da empresa em que estagiei, cujo suporte técnico foi essencial para a realização deste trabalho. Cada um de vocês desempenhou um papel crucial na conclusão deste trabalho e sua contribuição é imensamente valorizada. Obrigado por fazerem parte desta jornada acadêmica.