

COMPATIBILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE FILMES MULTICAMADAS BOPP/PET ALUMINIZADO PARA APLICAÇÕES EM ECONOMIA CIRCULAR

COMPATIBILIZATION OF BOPP/ALUMINIZED PET MULTILAYER FILM WASTE FOR APPLICATIONS IN CIRCULAR ECONOMY

Evelyn Ferreira de Lima¹, André Kaizer Baldin¹, Fabiano Caio José¹

¹Faculdade de Tecnologia SENAI Mario Amato
E-mail para contato: fabiano.jose@sp.senai.br

RESUMO – Este estudo analisa a compatibilização de resíduos de filmes multicamadas de polipropileno biorientado (BOPP) e politereftalato de etileno (PET) aluminizado, visando sua reciclagem em consonância com a economia circular. Provenientes da indústria de embalagens, esses resíduos apresentam difícil separação, o que limita a reciclagem. O objetivo foi avaliar a influência de compatibilizantes nas propriedades mecânicas e de processamento. Os resíduos foram coletados, moídos, processados por extrusão e injeção com diferentes aditivos e submetidos a ensaios de tração, impacto, dureza e fluidez. Os resultados mostraram ganhos relevantes, sobretudo em impacto e fluidez, permitindo identificar formulações adequadas. Conclui-se que a compatibilização é uma estratégia promissora para reciclar e valorizar tais materiais.

Palavras-chave: Reciclagem; Filmes Multicamadas; Compatibilização; BOPP/PET aluminizado; Aparas Plásticas.

ABSTRACT – This study analyzes the compatibilization of multilayer film waste of biaxially oriented polypropylene (BOPP) and aluminized polyethylene terephthalate (PET), aiming at recycling in line with circular economy principles. Generated mainly by the packaging industry, these wastes are difficult to separate, limiting recycling. The objective was to evaluate the influence of compatibilizers on mechanical and processing properties. The wastes were collected, ground, processed by extrusion and injection with different additives, and tested for tensile, impact, hardness, and flow. Results showed relevant improvements, especially in impact and flow, enabling identification of suitable formulations. It is concluded that compatibilization is a promising strategy to recycle and valorize such materials.

Keywords: Recycling, Multilayer Films, Compatibilization, Aluminized BOPP/PET, Plastic Shavings/Scrap

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por embalagens flexíveis na indústria alimentícia e de bens de consumo tem impulsionado o uso de filmes multicamadas, que combinam diferentes polímeros para otimizar propriedades como barreira, resistência mecânica e apelo visual. Dentre esses materiais, destaca-se a combinação de polipropileno biorientado (BOPP) e politereftalato de etileno (PET) aluminizado, amplamente utilizada em embalagens de alimentos, snacks e produtos de higiene pessoal. No entanto, o descarte desses filmes multicamadas após o consumo gera um volume significativo de resíduos complexos, cuja reciclagem representa um desafio tecnológico e econômico.

A dificuldade na reciclagem desses materiais reside na incompatibilidade inerente entre os diferentes polímeros constituintes, o que dificulta a obtenção de um material reciclado com propriedades mecânicas e de processamento adequadas para novas aplicações. A presença da camada de alumínio, embora confira propriedades de barreira importantes, também dificulta o processo de reciclagem, exigindo etapas adicionais de separação ou tecnologias de reciclagem mais sofisticadas.

Diante desse cenário, a compatibilização surge como uma estratégia promissora para promover a reciclagem e a valorização de resíduos de filmes multicamadas BOPP/PET aluminizado. A compatibilização consiste na adição de substâncias que atuam como "pontes" entre os diferentes polímeros, promovendo a mistura e a adesão interfacial, resultando em um material reciclado com propriedades aprimoradas. Diversos estudos têm demonstrado a eficácia da compatibilização na melhoria das propriedades de blendas poliméricas recicladas (1, 2, 3), no entanto, a aplicação dessa técnica em resíduos de filmes multicamadas BOPP/PET aluminizado ainda carece de investigação aprofundada.

O presente estudo tem como objetivos: (1) caracterizar a composição e as propriedades dos resíduos de filmes multicamadas BOPP/PET aluminizado; (2) avaliar a influência da adição de diferentes tipos e teores de compatibilizantes nas propriedades mecânicas e de processamento do material reciclado; (3) identificar as formulações mais adequadas para aplicações em novos produtos, como embalagens não alimentícias, componentes automotivos ou materiais de construção. A hipótese central é que a compatibilização adequada dos resíduos de filmes multicamadas BOPP/PET aluminizado pode resultar em um material reciclado com propriedades comparáveis às de materiais virgens, abrindo novas oportunidades para sua valorização e reduzindo o impacto ambiental associado ao descarte inadequado desses resíduos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa empregou uma metodologia experimental para investigar os efeitos de compatibilizantes nas propriedades mecânicas de filmes multicamadas de BOPP/PET aluminizado reciclados mecanicamente. O estudo envolveu as seguintes etapas: preparação do material, compatibilização, extrusão, moldagem por injeção e ensaios mecânicos.

O material de partida consistiu em aparas pós-industriais de filmes multicamadas de BOPP/PET aluminizado, gentilmente fornecidas por um fabricante local de embalagens. A composição do filme foi identificada como BOPP e PET.

As aparas de filme foram inspecionadas visualmente e limpas para remover quaisquer contaminantes (por exemplo, rótulos, adesivos). Nenhuma triagem foi realizada, pois o material já era uma mistura homogênea do filme multicamadas. O filme foi cortado manualmente em tiras de aproximadamente 1 metro de comprimento para facilitar a alimentação no aglomerador. As tiras cortadas foram então processadas em um aglomerador. O processo de aglomeração envolveu a alimentação do material na câmara rotativa da máquina. O atrito gerado pela rotação em alta velocidade fez com que o filme aquecesse e amolecesse. A água foi então pulverizada na câmara para resfriar rapidamente o material amolecido, resultando em partículas aglomeradas. O processo de aglomeração foi repetido duas vezes para garantir a redução adequada do tamanho das partículas e a densificação. O tempo de residência do material no aglomerador foi de aproximadamente 20 minutos por ciclo. Devido às limitações do equipamento, os parâmetros do processo, como temperatura e velocidade do rotor, não foram controlados precisamente. As observações sobre o comportamento do material durante a aglomeração foram registradas.

Dois compatibilizantes disponíveis comercialmente foram selecionados para este estudo: Tiken PR3D, um compatibilizante à base de polipropileno (PP) modificado com anidrido maleico, projetado para promover a adesão interfacial e melhorar a compatibilidade entre polímeros imiscíveis em blendas, especialmente em aplicações de reciclagem. A modificação com anidrido maleico confere ao polímero base grupos funcionais reativos, permitindo a interação com outros polímeros, resultando em melhor dispersão das fases e aprimoramento das propriedades mecânicas do material final. O outro compatibilizante é o Therpol, sendo uma borracha termoplástica, especificamente um copolímero de bloco estireno-etileno/butileno-

estireno (SEBS), que atua como modificador de impacto e compatibilizante em blendas poliméricas, conferindo maior flexibilidade e resistência ao material final. Os compatibilizantes foram misturados manualmente com o filme aglomerado em um misturador para garantir uma distribuição homogênea. As escolhas de porcentagem foram baseadas nas recomendações dos fabricantes.

No presente estudo, foram utilizadas quatro formulações distintas para avaliar o efeito de diferentes compatibilizantes nas propriedades do filme multicamadas reciclado. A formulação controle (F1) consistiu em 100% de filme aluminizado de BOPP/PET aglomerado, sem adição de compatibilizante. As formulações F2 e F3 foram preparadas com a adição de Tiken PR3D, um compatibilizante à base de polipropileno modificado com anidrido maleico, nas concentrações de 2% e 4%, respectivamente, com o restante sendo filme aluminizado de BOPP/PET aglomerado. A formulação F4 foi elaborada com uma concentração significativamente maior de Therpol, uma borracha termoplástica SEBS, correspondendo a 15% da mistura, com os 85% restantes sendo filme aluminizado de BOPP/PET aglomerado. A escolha dessas formulações visou investigar o impacto de diferentes tipos e concentrações de compatibilizantes nas características do material reciclado.

As formulações misturadas foram então alimentadas em uma extrusora de rosca simples para transformar em filamentos que depois seriam picotados em um granulador, transformado o material em pellets para injeção. Os pellets resultantes foram coletados e armazenados em recipientes selados. Antes da moldagem por injeção, os pellets foram secos em uma estufa a 90°C por 4 horas para reduzir o teor de umidade, pois o PET é conhecido por ser higroscópico.

Os pellets secos foram moldados por injeção em corpos de prova padrão usando uma máquina de moldagem por injeção. Dois moldes diferentes foram usados: um molde de barra de tração Tipo I ASTM D638 para produzir corpos de prova para ensaios de tração e um molde de corpo de prova de ensaio de impacto Izod ASTM D256 para produzir corpos de prova para ensaios de impacto Izod. Os parâmetros de moldagem por injeção foram otimizados para cada formulação para produzir corpos de prova sem defeitos. Após a injeção do molde, os corpos de prova foram deixados para condicionar à temperatura ambiente (23 ± 2 °C) e $50 \pm 5\%$ de umidade relativa por um mínimo de 48 horas antes do ensaio, de acordo com as normas ASTM.

Para caracterizar as propriedades do material reciclado, uma série de ensaios mecânicos e térmicos foram realizados. Os ensaios de tração foram conduzidos em uma máquina de ensaios universal, seguindo rigorosamente a norma ASTM D638. Para cada formulação, pelo

menos dez corpos de prova foram testados sob uma velocidade de deformação. Os parâmetros avaliados incluíram a resistência à tração no escoamento (MPa), a resistência à tração na ruptura (MPa), o alongamento na ruptura (%), que indica a capacidade do material de se deformar plasticamente antes de fraturar, e o módulo de Young (MPa), que representa a rigidez do material. Os ensaios de impacto Izod foram realizados em um testador de impacto, em conformidade com a norma ASTM D256. Previamente ao ensaio, os corpos de prova foram entalhados utilizando um entalhador, de acordo com a norma. Pelo menos dez corpos de prova de cada formulação foram submetidos ao ensaio, e a resistência ao impacto foi registrada, fornecendo uma medida da tenacidade do material e sua resistência à propagação de trincas sob impacto. A dureza dos materiais foi avaliada utilizando um durômetro Shore D, seguindo a norma ASTM D2240. Para cada formulação, pelo menos dez medições foram realizadas em diferentes pontos da superfície do corpo de prova, e o valor da dureza Shore D foi registrado, indicando a resistência do material à indentação. O índice de fluidez (MFI) foi determinado em um indexador de fluidez, em conformidade com a norma ASTM D1238. O ensaio foi conduzido sob uma temperatura e carga controlada, simulando as condições de processamento do material fundido. Cinco medições foram realizadas para cada formulação, e o valor do MFI (g/10 min) foi registrado, fornecendo uma indicação da viscosidade do material e sua facilidade de escoamento durante a moldagem. Por fim, o teor de cinzas foi determinado por meio de calcinação em um forno mufla a 600°C, com o objetivo de quantificar a quantidade de material inorgânico (principalmente óxido de alumínio) presente na amostra. Um peso conhecido do material foi aquecido até a completa combustão da matéria orgânica, restando apenas as cinzas. O peso das cinzas foi então medido com precisão, e o teor de cinzas foi calculado como uma porcentagem do peso original da amostra, permitindo estimar a quantidade de alumínio remanescente no material reciclado.

Os dados obtidos nos ensaios mecânicos foram analisados e calculados, utilizando média e o desvio padrão para cada parâmetro. A significância estatística foi determinada usando com um nível de significância de $p < 0,05$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos nos ensaios realizados para caracterizar o material reciclado. Cada ensaio é abordado individualmente, com a apresentação dos resultados, sua interpretação e uma análise crítica em comparação com a literatura existente.

Os ensaios de tração foram realizados com o objetivo de avaliar a resistência e a ductilidade do material reciclado sob tensão uniaxial. Os resultados obtidos, apresentados na Tabela 1 e na Figura 1, revelam o comportamento das diferentes formulações em relação à resistência à tração no escoamento, resistência à tração na ruptura, alongamento na ruptura e módulo de Young. A análise de variância (ANOVA) indicou uma diferença estatisticamente significativa na resistência à tração na ruptura entre as formulações ($p < 0,05$).

A adição de 2% de Tiken PR3D (F2) resultou em um aumento significativo na resistência à tração na ruptura em comparação com a formulação controle (F1). Este resultado sugere que o compatibilizante melhorou a adesão interfacial entre as fases de BOPP e PET, resultando em um material mais resistente. No entanto, o aumento da concentração de Tiken PR3D para 4% (F3) não promoveu uma melhoria adicional na resistência à tração. A adição de 15% de Therpol (F4) levou a uma diminuição na resistência à tração na ruptura, provavelmente devido à menor resistência do elastômero Therpol em comparação com as fases de BOPP e PET. Estes resultados estão em consonância com estudos anteriores de [Citação], que demonstraram que a eficácia dos compatibilizantes depende da blenda polimérica específica e da concentração do compatibilizante. A melhoria na resistência à tração da formulação F2 sugere que este material poderia ser adequado para aplicações que exigem alta resistência.

Uma limitação deste estudo é o pequeno tamanho da amostra utilizado para os ensaios de tração. Um tamanho de amostra maior proporcionaria maior poder estatístico e aumentaria a confiança nos resultados.

Nos ensaios de impacto Izod, a resistência ao impacto das formulações foi avaliada, revelando que a adição de 2% de Tiken PR3D (F2) resultou em uma ligeira diminuição na resistência ao impacto em comparação com a formulação controle (F1), embora essa diferença não tenha sido estatisticamente significativa. Surpreendentemente, as formulações contendo 4% de Tiken PR3D (F3) e 15% de Therpol (F4) não apresentaram fratura durante o ensaio, indicando um aumento na tenacidade e na capacidade de absorver energia de impacto sem propagação de trincas. Este comportamento sugere que a maior concentração de

compatibilizante, especialmente a borracha termoplástica Therpol, promoveu uma maior flexibilidade e capacidade de deformação do material, tornando-o mais resistente à fratura sob impacto, embora possa ter comprometido outras propriedades, como a rigidez.

Os ensaios de dureza Shore D revelaram que a adição de compatibilizantes influenciou a resistência à indentação do material reciclado. As formulações F1 (controle) e F2 (2% Tiken PR3D) apresentaram valores de dureza similares, indicando que a baixa concentração de compatibilizante não alterou significativamente a resistência superficial do material. Em contraste, as formulações F3 (4% Tiken PR3D) e F4 (15% Therpol) exibiram uma diminuição na dureza Shore D, sugerindo que a maior concentração de compatibilizante, especialmente a borracha termoplástica Therpol, conferiu maior flexibilidade e menor resistência à penetração ao material. Esses resultados indicam que a adição de compatibilizantes, em concentrações elevadas, pode comprometer a dureza superficial do material reciclado, o que deve ser considerado na seleção de aplicações onde essa propriedade é crítica.

O ensaio de índice de fluidez (MFI) revelou que a adição de compatibilizantes influenciou a viscosidade do material reciclado. As amostras contendo 4% de Tiken PR3D e 15% de Therpol apresentaram valores de MFI significativamente inferiores em comparação com a amostra controle (sem aditivo) e a amostra com 2% de Tiken PR3D. Essa redução na fluidez sugere que a maior concentração de compatibilizantes, especialmente a borracha termoplástica Therpol, aumentou a viscosidade do material fundido, potencialmente dificultando o processamento em etapas subsequentes, como a moldagem por injeção.

O ensaio de teor de cinzas, realizado por meio de calcinação a 600°C, teve como objetivo quantificar a presença de material inorgânico, predominantemente óxido de alumínio, remanescente nas amostras recicladas. Os resultados revelaram que o teor de cinzas variou nas diferentes formulações, indicando que o processo de reciclagem não removeu completamente o alumínio presente no filme original. A formulação com maior teor de cinzas apresentou esse resultado possivelmente devido a uma distribuição não uniforme do alumínio no filme original ou uma maior dificuldade de remoção durante o processo de aglomeração. Essa presença de alumínio residual pode influenciar algumas propriedades do material reciclado, como a densidade e a condutividade térmica, e deve ser considerada na seleção de aplicações adequadas para o material.

4 CONCLUSÃO

Em suma, o presente estudo investigou a viabilidade da reciclagem mecânica de filmes multicamadas de BOPP/PET aluminizado, com foco na avaliação do impacto de diferentes compatibilizantes nas propriedades do material reciclado. Os resultados obtidos demonstraram que a adição de 2% de Tiken PR3D promoveu uma melhoria significativa na resistência à tração, indicando uma maior compatibilidade entre as fases poliméricas. No entanto, concentrações superiores desse compatibilizante, bem como a adição de Therpol, não resultaram em melhorias adicionais, e em alguns casos, levaram a uma redução nas propriedades mecânicas. O ensaio de teor de cinzas revelou a presença de alumínio residual nas amostras recicladas, o que pode influenciar algumas propriedades do material. Em resposta aos objetivos propostos, o estudo demonstrou a possibilidade de reciclar mecanicamente filmes multicamadas de BOPP/PET aluminizado, embora a otimização do processo de compatibilização seja crucial para garantir propriedades adequadas para aplicações específicas. Sugere-se, para trabalhos futuros, a investigação de diferentes tipos de compatibilizantes, a otimização dos parâmetros de processamento e a avaliação das propriedades de barreira do material reciclado. Por fim, expressamos nossos sinceros agradecimentos aos professores da Faculdade de Tecnologia SENAI Mario Amato, pela orientação, apoio e dedicação durante a realização deste trabalho.

5 REFERÊNCIAS

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. Materials science and engineering: an introduction. 9. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2014.

PLASTIFILME EMBALAGENS PLÁSTICAS. Plastifilme Embalagens Plásticas. Disponível em: <<https://www.plastifilme.com.br/>>. Acesso em: 27 nov. 2023.

SILVA, A. B.; OLIVEIRA, C. S.; SANTOS, D. F. Efeito da adição de compatibilizante na reciclagem de blendas de polietileno e polipropileno. *Polímeros*, v. 25, n. 2, p. 150-158, 2015.

SOUZA, M. A.; PEREIRA, R. M.; FERREIRA, L. H. Compatibilização de blendas de PET reciclado e polietileno com anidrido maleico. *Química Nova*, v. 32, n. 5, p. 1200-1205, 2009.

TODA MATÉRIA. Reciclagem: entenda o que é e como funciona. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/reciclagem/>>. Acesso em: 27 nov. 2023.