



PRODUÇÃO DE FILMES COM POTENCIAL ANTICORROSIVO A PARTIR DE PLÁSTICO RECICLADO PARA VALORIZAÇÃO DA RECICLAGEM NO CONTEXTO DA CIRCULARIDADE ECONÔMICA NA INDÚSTRIA BRASILEIRA

Keslei R. da Rocha¹; Matheus O. Pessoa¹; Hugo G. Palhares¹; Jorgimara de O. Braga¹; Fernando Cotting¹

*UFMG, Escola de Engenharia, Laboratório de Superfícies e Corrosão, B. Horizonte, MG, Brasil, 31.270-901
kesleirosendo@gmail.com.*

Palavras-Chave: resíduos sólidos, meio ambiente, polímeros, estruturas metálicas.

Introdução

A reciclagem de plásticos pós-consumo é um desafio global. Dados do Perfil 2025 da Associação Brasileira da Indústria de Plásticos indicam que cerca de 21% dos plásticos pós-consumo no Brasil foram reciclados e disponibilizados para reuso (ABIPLAST, 2025). Essa porcentagem equivale à produção de 1,012 milhão de tonelada de resina plástica pós-consumo por meio de reciclagem, embora haja capacidade instalada para reciclar até 2,39 milhões de toneladas. Tais dados explicitam a necessidade de esforços para ampliar a reciclagem de plásticos pós-consumo e para reintegrá-los à cadeia industrial. Para além da relevância ambiental, agregar valor às resinas recicladas por meio de aplicações economicamente atrativas é um fator determinante para viabilizar, justificar e incentivar seu uso. Uma das possibilidades jaz na conversão de resinas pós-consumo em filmes plásticos com aplicações industriais economicamente atrativas.

Filmes podem ser produzidos a partir de um único plástico, uma mistura envolvendo um plástico acrescido de pelo menos um material não plástico (compósitos) ou mesmo uma mistura de diferentes matrizes plásticas (blendas). O resultado são filmes com aplicações diversas, variando desde embalagens plásticas (TAMIZHDURAI *et al.*, 2024), até na proteção de estruturas metálicas em ambientes hostis, como nos litorais e oceanos, por exemplo (KIM *et al.*, 2020). Aplicações nobres (como em inibição anticorrosiva) potencializam a valorização dos filmes plásticos oriundos da reciclagem, gerando vantagens econômicas que podem pavimentar o caminho e viabilizar economicamente rotas de reciclagem que, atualmente, são mais custosas se comparadas às rotas com uso de filmes elaborados a partir de resinas virgens (não recicladas). Para filmes com PET (poli(tereftalato de etileno)), por exemplo, a resina virgem custa cerca de 70% menos que a resina PET reciclada (BRANDÃO, 2022). Desta forma, a produção de filmes com finalidades de alto valor agregado torna possível absorver os custos para viabilizar a reciclagem de plásticos pós-consumo.

Neste contexto, este presente trabalho propõe o uso de resinas termoplásticas pós-consumo moldadas termicamente para produção de filmes plásticos com aplicações nobres no campo da proteção à corrosão em estruturas metálicas, contemplando dois objetivos principais: (i) promover a reciclagem e o reuso de termoplásticos pós-consumo e (ii) agregar valor ao reciclado por meio da valorização de sua aplicação e finalidade, incentivando a reciclagem no contexto da indústria brasileira.

Material e Métodos

Diferentes tipos de termoplásticos pós-consumo foram selecionados e estudados para produção de filmes plásticos. Após o *screening* inicial, adotou-se o PET devido à sua satisfatória trabalhabilidade e transparência, mesmo em diferentes níveis de espessura. Por meio de uma cooperativa de reciclagem, *flakes* de PET pós-consumo (r-PET) foram adquiridos já lavados e picotados. Com o auxílio de um módulo de extrusão-peletização (LabTech, LTE16-44, Tailândia), os *flakes* foram peletizados em *pellets* esféricos ($\varnothing \sim 3$ mm). Em seguida, com o acoplamento do módulo composto pelo cabeçote + matriz plana (*flat die*) e sistema de calandras com bobinamento (AXPlásticos, Lam200AX, Brasil), os *pellets* foram convertidos em filmes, conforme ilustrado na Figura 1. A espessura dos filmes produzidos foi aferida tanto por micrômetro como por MEV na seção transversal dos filmes. Para prevenir hidrólise, a resina foi previamente seca em estufa a 60 °C por 48 h.

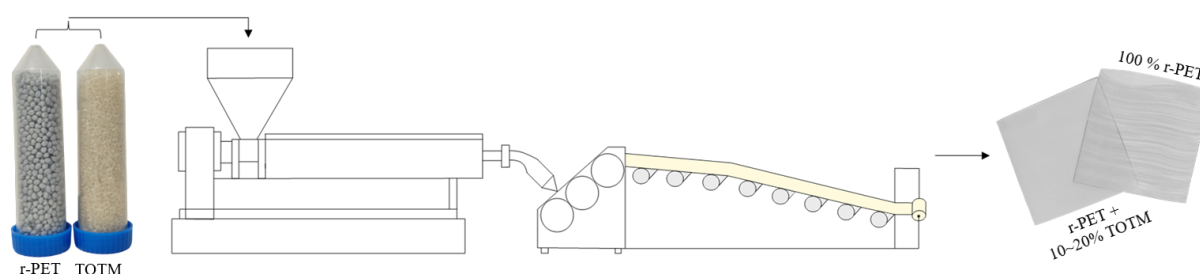


Figura 1. Esquema de extrusão seguida de moldagem de filmes com bobinamento por calandras

As formulações avaliadas estão apresentadas na Tabela 1 abaixo. Optou-se pelo uso do Trioctil Trimelitato (TOTM) por ser um plastificante monomérico de alto desempenho que, teoricamente, pode se inserir entre as cadeias poliméricas do r-PET, reduzir as forças intermoleculares e permitir que elas deslizem mais facilmente umas sobre as outras, o que resultaria em maior flexibilidade da blenda final.

Tabela 1. Formulações avaliadas para produção dos filmes

%	r-PET 100%	r-PET + 10% TOTM	r-PET + 20 % TOTM
r-PET	100	90	80
TOTM	0	10	20

A morfologia dos filmes r-PET foi examinada utilizando MEV – microscopia eletrônica de varredura (Thermo Fisher Scientific, Quanta FEG 3D, USA) no centro de microscopia da UFMG, a uma voltagem de aceleração de 5 kV. Além de verificar a morfologia e a qualidade estrutural dos filmes, imagens transversais foram também obtidas com o intuito de confirmar a espessura dos filmes à base de r-PET produzidos.

A análise termogravimétrica (TGA) e a calorimetria diferencial (DSC) dos filmes sintetizados foram simultaneamente realizadas (TA Instruments, SDT Q600, USA) usando aproximadamente 6 mg de cada amostra. Os testes foram realizados com uma rampa de aquecimento de 10 °C/min em uma atmosfera de N₂ (100 ml/min).

Para avaliar o desempenho dos filmes frente à corrosão em função do tempo, realizaram-se testes de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE). O ensaio foi realizado em um potenciostato/galvanostato (Gamry, Reference 620, USA) numa faixa de frequência 105 Hz – 10 mHz com sinal de perturbação senoidal em torno do potencial de circuito aberto (OCP) de 20 mV, sendo realizadas 10 medidas por década de frequência. A célula eletroquímica utilizada foi a de três eletrodos, constituída pelo eletrodo de trabalho (aço ABNT 1020 pintado), o eletrodo de referência de Ag/AgCl_(sat) e o contra-eletrodo de platina. Para a construção da célula, foi fixado um tubo de PVC sobre a amostra de aço ABNT 1020 contendo o filme colado na superfície para delimitar 8 cm² de área do eletrodo de trabalho. A solução eletrolítica utilizada foi o NaCl 3,5% (m/v). Os tempos de imersão dos testes de EIE foram de 24 h, 72 h, 7 dias, 15 dias, 30 dias, 60 dias e 90 dias.

Resultados e Discussão

Nas micrografias apresentadas na Figura 2 estão reportadas as espessuras calculadas durante a microscopia. Se todas as condições de operação do sistema extrusor + calandras + bobinadores forem mantidas constantes ao longo do processo, variando-se apenas a alimentação do plastificante, é natural que o aumento da fração de TOTM resulte em redução da espessura do filme devido ao aumento de fluidez da blenda. Se o líquido flui com maior facilidade, aumenta-se a distribuição do fluido fundido sobre as calandras, resultando em menor espessura. As aferições com o micrômetro foram harmônicas com o aferido no MEV.

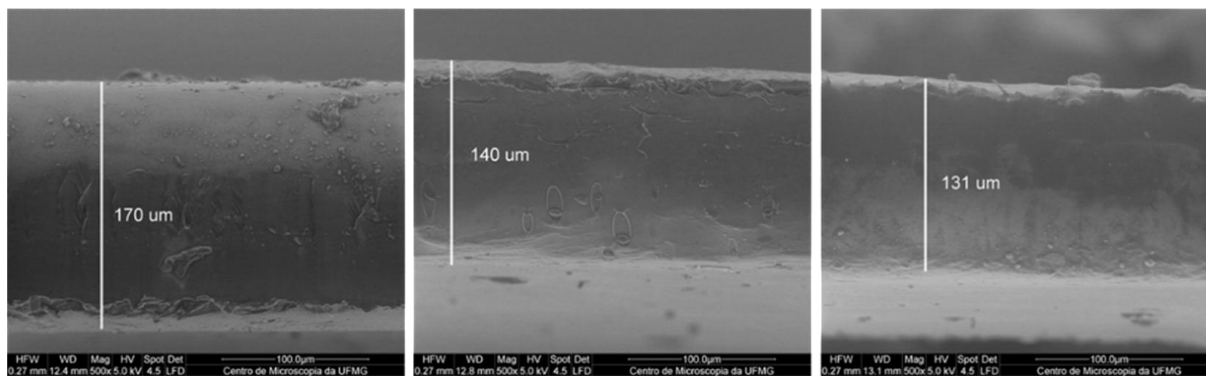


Figura 2. Micrografias da seção transversal dos filmes 100% r-PET (a), r-PET + 10% TOTM (b) e r-PET + 20% TOTM (c)

A espessura do filme é um dos parâmetros mais importantes do ponto de vista comercial. É, também, um parâmetro personalizável a depender da sua aplicação. Para uso como revestimento anticorrosivo em superfícies metálicas, testes prévios indicam que espessuras próximas à 150 μm são as mais adequadas, pois são suficientemente flexíveis de forma a se moldarem a diferentes geometrias, de simples a complexas, e capazes de suportar as intempéries às quais os filmes estarão expostos.

A análise térmica apresentada na Figura 3 mostra que o filme 100% r-PET apresentou baixa degradação até temperaturas próximas à 350 °C. A partir de 383 °C (linha vertical pontilhada), a perda de massa por degradação se tornou acentuada. Como a temperatura de extrusão dos filmes não supera 270 °C, é seguro afirmar que a perda por degradação durante o processo é mínima.

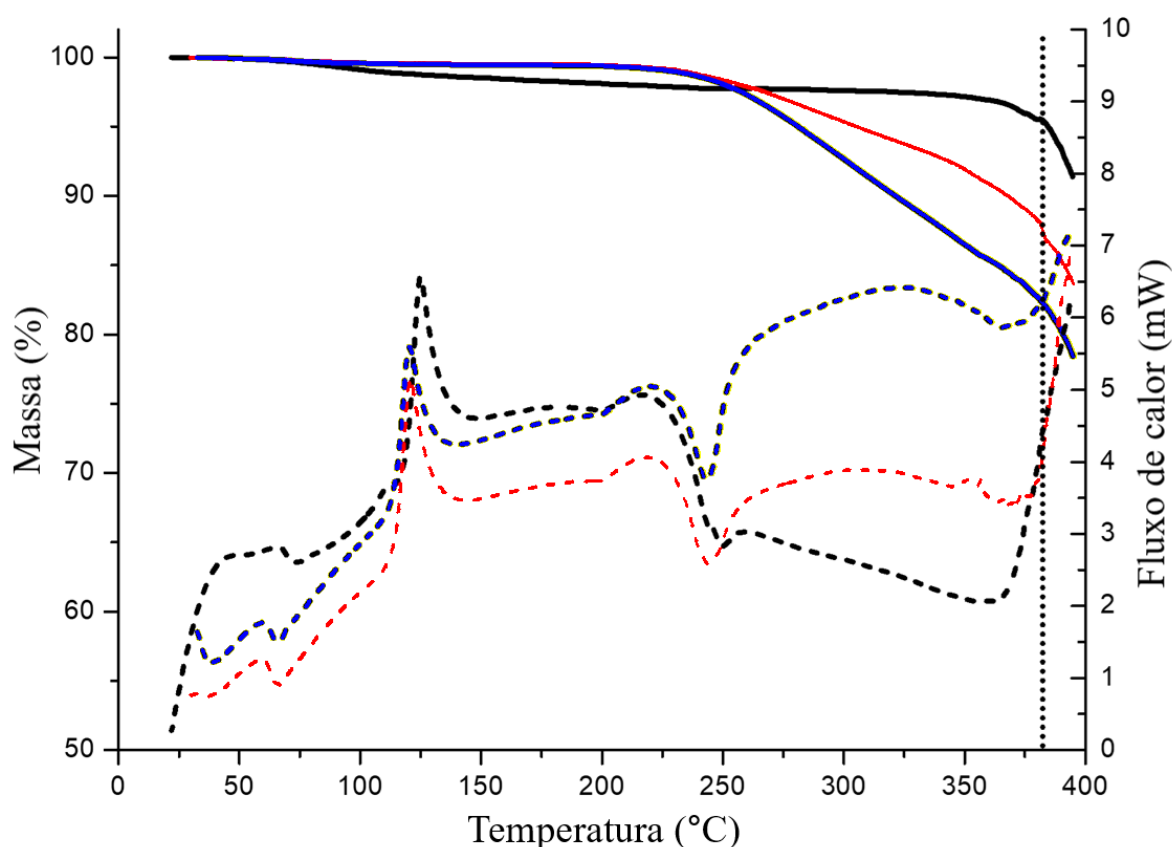


Figura 3. TGA e DSC dos filmes 100% r-PET (—), r-PET + 10% TOTM (—) e r-PET + 20% TOTM (—)

Os filmes com adição do plastificante apresentaram degradação térmica em temperatura significativamente menor que o filme elaborado apenas com r-PET. O aumento da fração de plastificante também aumentou a perda de massa por degradação, como é possível observar pelas curvas em queda na Figura 3 a partir da temperatura de 250 °C. Blázquez-Blázquez *et al.* (2019) analisaram o perfil térmico do plastificante TOTM e observaram que, exatamente sob a temperatura de 250 °C, inicia-se uma forte decomposição

térmica, com completa degradação em cerca de 325 °C. Como a temperatura de processamento na extrusora durante a elaboração dos filmes foi de 270 °C, é certo que houve parcial degradação do plastificante durante a blendagem, o que resulta na fração real divergente da fração teórica, conforme observado por Palhares *et al.* (2025).

As temperaturas de transição vítrea (T_g) dos filmes 100% r-PET, r-PET + 10% TOTM e r-PET + 20% TOTM foram 67,1 °C, 60,8 °C e 61,4 °C, respectivamente. Já as temperaturas de recristalização (T_{rec}) foram 125,1 °C, 120 °C e 120,5 °C para os filmes 100% r-PET, r-PET + 10% TOTM e r-PET + 20% TOTM, respectivamente. Nota-se que houve diminuição nas T_g e T_{rec} dos filmes plastificados se comparados com o filme 100% r-PET, algo já esperado devido à maior liberdade de movimento das cadeias poliméricas do r-PET causada pelas interações com as moléculas do plastificantes.

Para os testes de EIE, foram realizados ensaios após 24 h, 72 h, 7 dias, 15 dias, 30 dias, 60 dias e 90 dias de imersão em solução salina. A Figura 4 apresenta os resultados após o maior período de exposição: 90 dias. Os resultados foram comparados com a performance da pintura epóxi (que é o padrão de revestimento na indústria) e com fitas comerciais (que têm a mesma função anticorrosiva proposta para os filmes de r-PET).

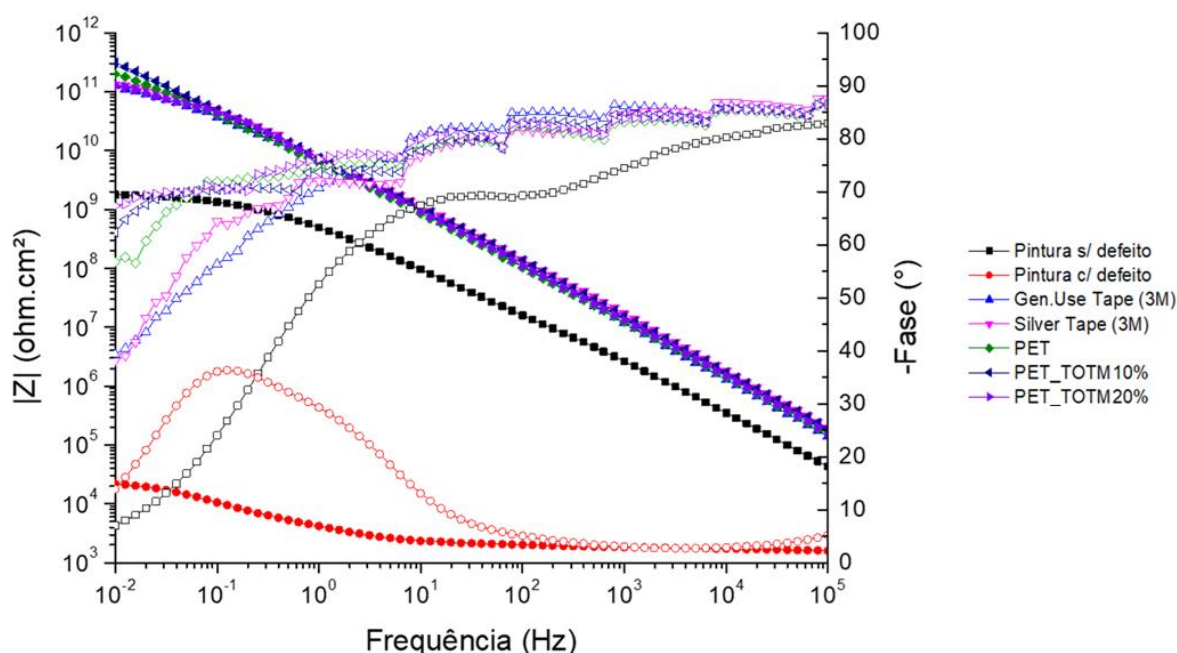


Figura 4. EIE após 90 dias de exposição sob condição de elevada salinidade

Boa resistência à corrosão pode ser atribuída a sistemas com $|Z|$ acima de $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$ em baixas frequências (por exemplo, $f < 0,1$ Hz) e frequência de ponto de ruptura f_b (que é definida como a frequência f na qual o ângulo de fase ϕ é igual a -45°) também abaixo de 0,1 Hz (LEE e MANSFELD, 1998). Baixa resistência, por outro lado, pode ser atribuída a



sistemas com $|Z|$ em torno ou abaixo de $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ em baixas frequências e f_b acima de algumas centenas de Hertz (ou seja, $f_b > 300\text{-}400 \text{ Hz}$).

A partir dos resultados obtidos com as superfícies metálicas revestidas com a pintura epóxi padronizada e utilizada na indústria (Figura 4, linha preta), é possível verificar que tanto as fitas comerciais como os filmes, plastificados ou não, tiveram resultados superiores em termos de resistência à corrosão. Como os filmes produzidos a partir da resina reciclada de PET tem custo inferior às fitas comerciais da 3M® avaliadas, os resultados apresentados apontam para possíveis vantagens econômicas do revestimento alternativo frente às opções convencionais. Os resultados mostraram, ainda, que houve diferença mínima na performance anticorrosiva entre os filmes 100% r-PET e ambos os filmes plastificados com TOTM. Isto indicou que, para a finalidade de atuar como revestimento anticorrosivo, o plastificante se mostrou desnecessário.

Conclusões

Os resultados apresentados e discutidos neste trabalho demonstram, de forma clara, que há viabilidade na produção de filmes plásticos a partir de resina 100% oriunda de reciclagem.

Os resultados discutidos evidenciaram, ainda, que embora o plastificante estudado, o TOTM, tenha contribuído com a flexibilidade do filme, sua participação no aumento da resistividade à corrosão não foi quantificável, não havendo justificativa técnica para seu uso para a finalidade anticorrosiva aqui proposta.

A análise da capacidade resistiva à corrosão evidenciou superioridade do filme 100% r-PET sobre a tinta padronizada e desempenho semelhante às fitas comerciais avaliadas. Embora seja necessário um completo estudo de viabilidade econômica, os resultados aqui apresentados de viabilidade técnica são animadores e indicam que os filmes provenientes de reciclagem podem representar uma alternativa economicamente atrativa, o que poderá despertar interesse comercial que colaborará para aumento da reciclagem e da circularidade econômica no contexto da indústria brasileira.

Referências

ABIPLAST (Associação Brasileira da Indústria do Plástico). Perfil 2025. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2025/10/PERFIL_2025ABIPLAST_digital.pdf>. Acessado em: 04 mai. 2026.

BLÁZQUEZ-BLÁZQUEZ, E.; BARRANCO-GARCÍA, R.; CERRADA ML.; PÉREZ, E. Effect of thermo-oxidation on loss of plasticizers, on crystalline features and on properties in a metallocene isotactic polypropylene. *Polymer*, v. 181, e121749, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.121749>

BRANDÃO, R. PET reciclado custa mais do que a resina. Valor Econômico, 2022. Disponível em: <<https://valor.globo.com/um-so-planeta/noticia/2022/01/26/pet-reciclada-custa-mais-do-que-a-resina.ghml>>. Acessado em: set 2025.

KIM, H.; YARIN, A. L.; LEE, M. W. Self-healing corrosion protection film for marine environment. *Composites Part B: Engineering*, 182(1), e.107598, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107598>



LEE, CC.; MANSFELD, F. Automatic classification of polymer coating quality using artificial neural networks. *Corrosion Science*, v. 41, p. 439–461, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00127-9](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00127-9)

PALHARES, HG.; BRAGA, JO.; DIAS, BMA.; ROSARIO, TCAV.; CUNHA, FR.; VILLALOBOS, PR.; COTTING, F. Evaluation of the Use of Plasticizer in the Development of a Post-Consumer Pet Adhesive by Thermomechanical Processing with Anticorrosive Properties. *Materials Research*, v. 28, e20250052, 2025. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2025-0052>

TAMIZHDURAI, P.; MANGESH, V. L.; SANTHOSH, S.; VEDAVALLI, R.; KAVITHA, C.; BHUTTO J. K.; ALRESHIDI, M. A.; YADAV, K. K.; KUMARAN, R. A state-of-the-art review of multilayer packaging recycling: Challenges, alternatives, and outlook. *Journal of Cleaner Production*, 447(1), e.141403, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141403>