ISSN:2594-6153

Economia Circular e Reciclagem de PVC de Cabos Elétricos: caracterização, impacto nas propriedades mecânicas e estratégias para o reaproveitamento sustentável

Fabiano Caio José[1,2], Edilene de Cássia Dutra Nunes[1], Nelize Maria de Almeida Coêlho[2]

[1]Faculdade de Tecnologia SENAI Mario Amato, São Bernardo do Campo - SP, Brasil
[2]Universidade Santa Cecília, Santos - SP, Brasil

E-mail: fabiano.jose@sp.senai.br

Resumo: A Economia Circular impulsiona a reciclagem de polímeros, como o PVC de cabos elétricos, face ao crescente descarte inadequado em aterros. Este estudo investiga os desafios na caracterização do PVC reciclado oriundo desses cabos, avaliando o impacto nas propriedades do material. A metodologia envolveu a reciclagem de PVC de cabos pós-consumo (trituração e separação primária) e caracterização mecânica. Os resultados revelaram contaminação persistente, afetando propriedades como resistência e processabilidade. A análise destaca a necessidade de métodos de reciclagem aprimorados e tecnologias de descontaminação para garantir a viabilidade do PVC reciclado em aplicações de alto desempenho, promovendo a circularidade e reduzindo a dependência de PVC virgem e o envio para aterros. A pesquisa aponta para a importância de otimizar o processamento e a caracterização para ampliar o uso seguro e eficaz de PVC reciclado.
Palavras-chave: Economia Circular; Reciclagem de PVC; Cabos elétricos; Caracterização; Propriedades mecânicas.

Circular Economy and Recycling of PVC from Electrical Cables: characterization, impact on mechanical properties and strategies for sustainable reuse

Abstract: The Circular Economy is driving the recycling of polymers, such as PVC from electrical cables, in the face of increasing inappropriate disposal in landfills. This study investigates the challenges in characterizing recycled PVC from these cables, assessing the impact on material properties. The methodology involved recycling PVC from post-consumer cables (shredding, primary separation) and comprehensive characterization (mechanical). The results revealed persistent contamination, affecting properties such as strength and processability. The analysis highlights the need for improved recycling methods and decontamination technologies to ensure the viability of recycled PVC in high-performance applications, promoting circularity and reducing reliance on virgin PVC and landfilling. The research highlights the importance of optimizing recycling and characterization processes to expand the safe and effective use of recycled PVC.
Keywords: Circular Economy; PVC Recycling; Electrical Cables; Polymer Characterization Mechanical Properties.

Introdução

O crescente volume de resíduos sólidos, especialmente aqueles provenientes de equipamentos eletroeletrônicos, representa um desafio ambiental significativo na sociedade contemporânea [1]. O modelo linear de produção e consumo, caracterizado pela extração, produção, uso e descarte, tem gerado um acúmulo de resíduos com potencial de contaminação

do solo e da água, além de contribuir para o esgotamento de recursos naturais [2]. Nesse contexto, a Economia Circular emerge como uma alternativa promissora, preservando materiais e produtos em ciclos de uso por mais tempo, reduzindo a geração de resíduos e a regenerando os sistemas naturais [3].

A reciclagem de polímeros, como o Policloreto de Vinila (PVC) - um dos mais utilizados no mundo, desempenha um papel essencial na transição para uma Economia Circular. O PVC possui aplicações em diversos setores, incluindo a construção civil, indústria automotiva, de eletrodomésticos e eletrônicos, embalagens, entre outros. Além disso, os fios e cabos elétricos utilizados nessas aplicações também contêm PVC, contribuindo com milhares de toneladas de resíduos plásticos gerados anualmente [4]. Portanto, o descarte inadequado de produtos plásticos representa uma questão ambiental significativa devido ao grande volume de espaço ocupado e aos altos custos de destinação [5].

A reutilização do PVC presente nos cabos elétricos apresenta desafios específicos, principalmente devido à presença de aditivos como plastificantes, retardantes de chama etc. que conferem heterogeneidade ao material [6]. Dessa forma, a caracterização do PVC reciclado pode ser complexa, dispendiosa e demandar métodos analíticos específicos. No entanto, é essencial para garantir a qualidade e a segurança do material, permitindo a identificação de potenciais riscos e assegurando sua aplicação adequada [7].

Objetivos

O presente estudo teve como objetivos caracterizar o PVC reciclado proveniente de fios e cabos elétricos pós-consumo de duas fontes (das escolas do SENAI-SP e Industrial), avaliando o impacto da reciclagem nas propriedades mecânicas do PVC, e propor uma sistemática para promover a reciclagem desse material de forma mais eficiente e sustentável.

Material e Métodos

O presente estudo utilizou resíduos de cabos elétricos pós-consumo provenientes de duas fontes: de escolas do SENAI-SP e de uma empresa que agrega resíduos Industriais. Os cabos elétricos são constituídos de condutores de cobre revestidos por uma camada de polímero e aditivos, como plastificantes e estabilizantes térmicos.

A reciclagem do material foi realizada na Faculdade de Tecnologia SENAI Mario Amato, sendo iniciada em um Moinho Granulador Triaxis MS100, com capacidade nominal de 80 a 120 quilogramas por hora, para separar o cobre do revestimento polimérico. O material resultante, ainda com teor de cobre residual (desafio chave deste tipo de reciclagem), foi

encaminhado ao processo de extrusão para avaliação da processabilidade e da qualidade final do produto. Equipamentos adicionais incluíram uma calandra aquecida, uma extrusora granuladora, uma extrusora de tubos e mangueira, uma injetora, e uma Máquina Universal Kratos com dispositivo de tração e célula de carga de 5 kN. Os materiais obtidos em cada etapa estão apresentados na Figura 1.



Figura 1. Materiais obtidos no processo de reciclagem de fios e cabos elétricos. 1) Material polimérico pós trituração, com cerca de 10% de cobre, 2) Cobre retirado do triturador, sem resíduos plásticos, 3) Material virgem adicionado ao PVC do pote 1, 4) Material após 1ª extrusão e 5) Material final após 2ª extrusão.

A partir do material do pote 5 (Figura 1) corpos de prova foram confeccionados na máquina Injetora Romi 80 t Prática. A caracterização mecânica dessas amostras foi realizada através de ensaios de tração, conforme norma ASTM D638. O planejamento experimental consistiu em 10 corpos de prova de cada material (SENAI e Industrial), sob 2 velocidades de deslocamento: 50 mm/min (V50) e 500 mm/min (V500).

O conjunto de dados foi submetido a um filtro estatístico, removendo os valores que excediam a média em mais de um desvio padrão, recalculando-se as estatísticas descritivas com as amostras válidas restantes. O refinamento dos dados foi permitido neste caso, visto que o número de 5 amostras válidas foi satisfeito em todos os casos, conforme a norma de referência.

Resultados

A avaliação primária dos produtos revelou que, embora o processo de trituração e separação mecânica tenha se mostrado eficiente na recuperação do cobre, uma quantidade residual desse metal permaneceu no material polimérico, permitindo sua identificação visual.

A caracterização física do PVC reciclado revelou desafios significativos em relação à sua qualidade e propriedades; gráficos comparativos de Força Máxima (N), Limite de Resistência (MPa), Alongamento (%) e Módulo de Elasticidade (MPa) foram elaborados (Figura 2). Outro parâmetro avaliado foi a velocidade de deslocamento a fim de analisar a resposta elástica da matriz polimérica diante da velocidade de aplicação de uma força de tração.

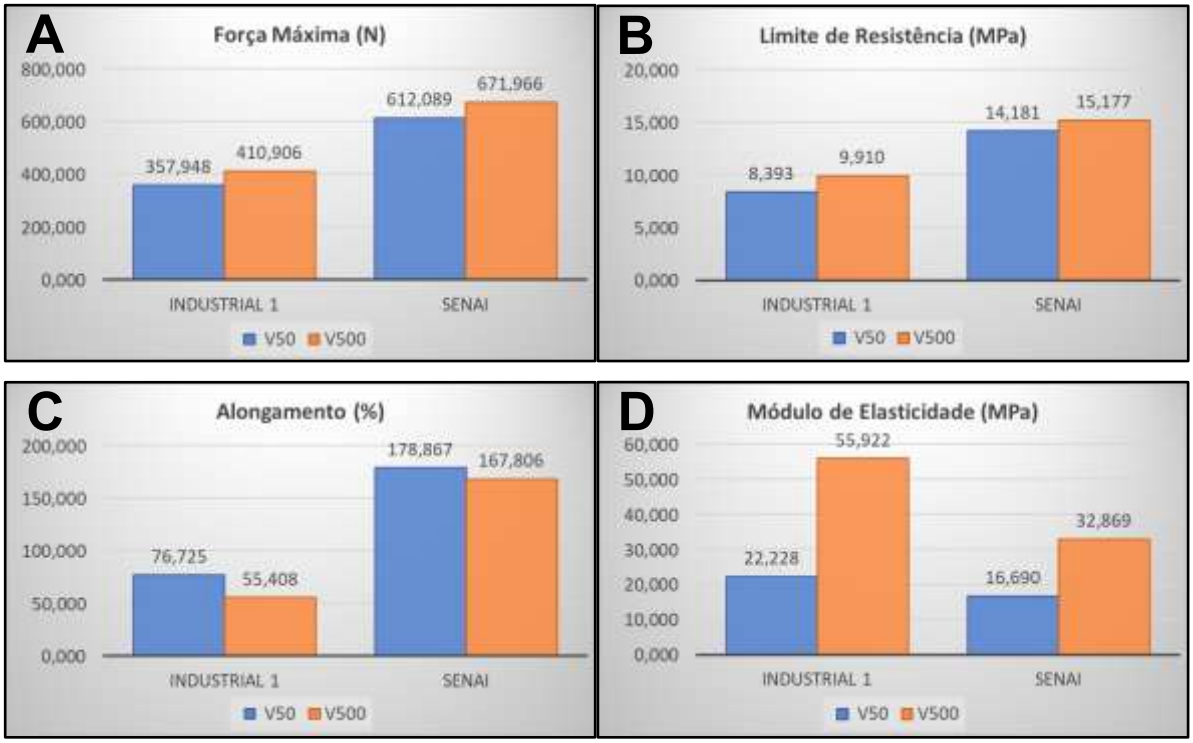

Figura 2. Comparativo dos materiais reciclados em relação à: A) Força Máxima, B) Limite de Resistência, C) Alongamento e D) Módulo de Elasticidade.

Discussão

Os resultados mostraram diferenças significativas entre as fontes. O material SENAI apresentou consistentemente maior força máxima e limite de resistência à tração que o Industrial (Figura 2A e B), independentemente da velocidade do ensaio, indicando maior resistência intrínseca. O material do SENAI também exibiu maior alongamento (Figura 2C), sugerindo maior ductilidade. Inversamente, o material Industrial mostrou maior módulo de elasticidade (Figura 2D), sendo, portanto, mais rígido. A menor resistência e ductilidade da amostra industrial pôde ser atribuída à presença de uma quantidade maior de partículas metálicas residuais, que atuam como pontos de concentração de tensão, facilitando a iniciação e propagação de trincas durante a solicitação mecânica. Essa diferença é plausível dada a origem mais heterogênea do material Industrial (agregado de diversas fontes).

O efeito da velocidade de ensaio foi consistente com o comportamento viscoelástico dos polímeros. O aumento da velocidade resultou em um aumento da força máxima, do limite de resistência e do módulo de elasticidade pois o material ficou mais rígido e, em uma diminuição do alongamento para ambos os materiais pois ficam mais quebradiços (menos dúcteis). Em taxas de deformação mais altas, as cadeias poliméricas têm menos tempo para relaxar e se orientar, resultando em maior rigidez aparente e comportamento mais frágil. Em taxas mais lentas, a mobilidade segmentar permite maior deformação antes da ruptura.

Para viabilizar o uso mais amplo do PVC reciclado de cabos elétricos, especialmente em aplicações mais exigentes, são necessárias melhorias no processo, principalmente na separação das frações metálica e polimérica. Adicionalmente, o uso de aditivos compatibilizantes pode melhorar a dispersão das partículas metálicas na matriz polimérica e aumentar a adesão entre as fases, resultando no aumento da resistência mecânica do material.

Em suma, a reciclagem de PVC de cabos elétricos apresenta desafios e oportunidades. Superar os desafios técnicos relacionados à contaminação e à alteração das propriedades do material, através do aprimoramento de tecnologias de separação e aditivação permitirá que estes resíduos sejam reintegrados à cadeia produtiva, reduzindo a extração de recursos virgens e minimizando o impacto ambiental associado ao descarte.

Conclusões

O presente estudo permitiu concluir que, no processo de reciclagem mecânica do PVC oriundo de cabos elétricos, a contaminação da matriz polimérica por partículas metálicas comprometeu significativamente a resistência à tração do produto, limitando sua aplicação em projetos menos exigentes. Trabalhos futuros devem focar na otimização desses processos e na avaliação do ciclo de vida do PVC, para desenvolvimento de produtos mais nobres.

Agradecimentos: Os autores gostariam de agradecer à Faculdade de Tecnologia SENAI Mario Amato pelo apoio e expertise essenciais para a realização deste estudo.

Referências

1. MACHADO, G.B. Reciclagem de fios elétricos. Disponível em: https://portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-fios-eletricos/. Acesso: 17 set. 2024.
2. GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production, 114, p. 11-32, 2016.
3. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards the circular economy. 2012. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/towards-the-circular-economy. Acesso: 17 set. 2024.
4. CORRADINI, E.; COSTA, M.; CAROSIO, F.; DICHIARANTE, A. Recycling of polyvinyl chloride (PVC) from waste cable sheaths: An overview of the current technological scenario. Resources, Conservation and Recycling, 120, p. 137-152, 2017.
5. AZEVEDO, S. A.; RIBEIRO, R. M. Reciclagem de cabos elétricos: uma análise do processo produtivo e da logística reversa. Revista Brasileira de Logística, 12(1), p. 39-49.
6. DUARTE, L. C.; MONTEIRO, A. L. Reciclagem de cabos elétricos: análise do processo e da viabilidade econômica. Revista Ambiente & Sociedade, 17(2), p. 217-233, 2014.
7. FERREIRA, A. M.; GONÇALVES, M. L. S. A reciclagem de cabos elétricos: uma oportunidade de negócios. Revista Brasileira de Tecnologia e Inovação, 5(1), p. 1-15, 2019.