

## REVALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE FIOS E CABOS ELÉTRICOS: ABORDAGEM INTEGRADA PARA A RECICLAGEM DE PVC E RECUPERAÇÃO DE COBRE NA ECONOMIA CIRCULAR

### REVALORIZATION OF WASTE FROM ELECTRICAL WIRES AND CABLES: INTEGRATED APPROACH FOR PVC RECYCLING AND COPPER RECOVERY IN THE CIRCULAR ECONOMY

Yasmim Oliveira Cordeiro<sup>1, i</sup>  
Fabiano Caio José<sup>2, ii</sup>  
Edilene de Cássia Dutra Nunes<sup>3, iii</sup>

#### RESUMO

A crescente geração de resíduos de fios e cabos elétricos impõe um desafio ambiental significativo, principalmente devido à complexidade da separação entre seus componentes metálicos e poliméricos. Este trabalho analisa, por meio de uma revisão bibliográfica, uma rota tecnológica consolidada para a revalorização integral destes resíduos, com foco no Policloreto de Vinila (PVC). O objetivo é validar um processo que não apenas mitiga os impactos ambientais, mas também gera materiais de alto valor agregado, alinhado aos princípios da Economia Circular. A metodologia sequencial abordada compreende quatro etapas. Os resultados indicam que essa abordagem multifásica é tecnicamente robusta e economicamente viável, permitindo a recuperação de cobre com pureza superior a 99,7% e a produção de um composto de PVC com qualidade para aplicações industriais. O processo transforma um passivo ambiental em duas correntes de receita, validando um modelo de negócio sustentável impulsionado pelo alto valor do metal recuperado. Conclui-se que a aplicação integrada destas tecnologias oferece uma solução completa para a gestão de resíduos eletroeletrônicos, promovendo o desenvolvimento industrial em harmonia com a preservação ambiental.

**Palavras-chave:** Reciclagem de PVC; Fios e Cabos Elétricos; Separação Eletrostática; Economia Circular; Recuperação de Cobre.

#### ABSTRACT

The increasing generation of waste from electrical wires and cables poses a significant environmental challenge, mainly due to the complexity of separating their metallic and polymeric components. This paper analyzes, through a literature review, a consolidated technological route for the integral revalorization of this waste, focusing on Polyvinyl Chloride (PVC). The objective is to validate a process that not only mitigates environmental impacts but also generates high-value-added materials, in line with the principles of the Circular Economy. The sequential methodology discussed includes the four stages. The results indicate that this multi-stage approach is technically robust and economically viable, enabling the recovery of copper with a purity exceeding 99,7% and the production of a PVC compound suitable for industrial applications. The process transforms an environmental liability into two revenue

---

<sup>1</sup>Aluna do Bacharel em Química Industrial na Faculdade de Tecnologia SENAI Mario Amato E-mail: cordeiroy49@icloud.com

<sup>2</sup>Coordenador Técnico na Faculdade de Tecnologia SENAI Mario Amato. E-mail: fabiano.jose@sp.senai.br.

<sup>3</sup>Docente na Faculdade de Tecnologia SENAI Mario Amato e Dr.<sup>a</sup> em Ciência e Engenharia de Materiais pela UFSCar. E-mail: ecassia@sp.senai.br

streams, validating a sustainable business model driven by the high value of the recovered metal. It is concluded that the integrated application of these technologies offers a complete solution for managing electronic waste, promoting industrial development in harmony with environmental preservation.

**Keywords:** PVC Recycling; Electrical Wires and Cables; Electrostatic Separation; Circular Economy; Copper Recovery.

## 1. INTRODUÇÃO

A produção industrial moderna e o consumo de bens eletrônicos geram um volume crescente de resíduos complexos, entre os quais os fios e cabos elétricos representam um desafio ambiental e tecnológico proeminente. Estes materiais são compósitos, formados essencialmente por um condutor metálico de alto valor (majoritariamente cobre) e um isolante polimérico, como o Policloreto de Vinila (PVC). A gestão inadequada desses resíduos, frequentemente destinados a aterros sanitários, resulta não apenas na perda de matérias-primas valiosas, mas também em significativos passivos ambientais.

### 1.1 Problema de pesquisa

O principal obstáculo para a reciclagem eficaz de fios e cabos reside na dificuldade de se obter uma separação limpa e eficiente entre o metal e o plástico. A presença de partículas metálicas residuais no fluxo de PVC reciclado compromete drasticamente suas propriedades mecânicas e o acabamento superficial, limitando sua aplicação a produtos de baixo valor agregado. Por outro lado, a contaminação do cobre com polímero reduz sua pureza e, conseqüentemente, seu valor de mercado.

### 1.2 Objetivo(s)

Com base nos princípios da Economia Circular, que propõe a eliminação de resíduos e a manutenção de materiais em ciclos produtivos, este estudo tem como objetivo central analisar uma rota tecnológica consolidada para a revalorização integral dos resíduos de fios e cabos. A abordagem busca validar um processo que transforma um resíduo complexo em duas correntes de materiais de alta qualidade: cobre com pureza elevada e um composto de PVC reciclado apto para novas aplicações industriais.

### 1.3 Justificativa

A justificativa para tal processo é tanto econômica quanto ambiental, pois reduz a exploração de recursos virgens (minério de cobre e petróleo), minimiza o volume de resíduos em aterros e cria oportunidades de mercado para produtos sustentáveis.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia proposta neste trabalho baseia-se na revisão de literatura científica e técnica, consolidando as melhores práticas para a reciclagem de fios e cabos. O processo é sequencial e multifásico, utilizando diferentes princípios físicos de separação para garantir a máxima eficiência. A rota pode ser dividida em quatro etapas fundamentais.

A cominuição (moagem) é o pré-requisito para qualquer processo de reciclagem mecânica. Seu objetivo é reduzir o tamanho dos resíduos de cabos a uma granulometria controlada, garantindo a completa liberação do núcleo metálico da matriz polimérica. A eficiência de todas as etapas subsequentes depende criticamente do grau de liberação alcançado

nesta fase. Tecnologias como moinhos de facas são comumente empregadas, pois oferecem um bom controle sobre a morfologia das partículas e evitam a geração excessiva de finos (Araújo, 2006). Após a moagem, as partículas liberadas de metal e plástico são submetidas a uma separação por densidade. Esta técnica explora a significativa diferença de massa específica entre o cobre ( $\rho \approx 8,96 \text{ g/cm}^3$ ) e o PVC ( $\rho \approx 1,4 \text{ g/cm}^3$ ). Equipamentos como mesas densimétricas ou separadores a ar são utilizados para realizar uma segregação primária robusta, concentrando a maior parte do cobre em uma corrente e o PVC em outra. Esta é uma etapa de baixo custo e alta capacidade, fundamental para processar grandes volumes de material (Cui; Forssberg, 2003). Embora a separação por densidade seja eficiente, ela não garante a pureza necessária para aplicações de alto valor. Para o "polimento" das frações, a tecnologia de separação eletrostática é a escolha ideal. Este método se baseia na diferença de condutividade elétrica entre os materiais. As partículas são carregadas eletricamente (por exemplo, por efeito corona) e, ao passarem por um campo elétrico, são desviadas em trajetórias distintas: os materiais condutores (cobre) perdem a carga rapidamente e são coletados separadamente dos materiais isolantes (PVC), que a retêm por mais tempo (Santana et al., 2016). Essa etapa é crucial para remover finas partículas metálicas do fluxo de PVC e vice-versa, garantindo frações com altíssimo grau de pureza.

O PVC, mesmo após a purificação, pode apresentar degradação termomecânica devido ao seu ciclo de vida anterior e ao próprio processo de reciclagem. Para restaurar suas propriedades e torná-lo compatível com as especificações de produtos industriais, a fração polimérica passa por uma etapa de extrusão com aditivação. Neste processo, são incorporados estabilizantes térmicos, lubrificantes e outros aditivos que melhoram a processabilidade, a estabilidade e as propriedades mecânicas do material final, fechando o ciclo de vida do produto de forma sustentável (Almeida, 2019; Scheirs, 2018).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da literatura científica valida que a abordagem sequencial descrita é altamente eficaz para a revalorização de resíduos de fios e cabos elétricos. O sucesso do processo reside na sinergia entre as etapas, onde cada uma prepara o material para a fase seguinte, maximizando a pureza e a recuperação. A cominuição adequada é consistentemente apontada como o fator determinante para o sucesso de toda a cadeia. Uma moagem ineficiente resulta em partículas mistas (metal-plástico) que contaminam ambas as correntes de saída, reduzindo a eficiência global e o valor dos produtos (Araújo et al., 2007).

A combinação da separação densimétrica como um método primário e robusto, seguida pela separação eletrostática como uma etapa de polimento de alta precisão, é crucial. Esta cascata de purificação permite atingir níveis de pureza no cobre recuperado superiores a 99,7% (Bahiense Neto, [20--]). Esse altíssimo grau de pureza é o principal motor econômico do processo. O elevado valor de mercado do cobre não apenas cobre os custos operacionais da reciclagem (energia, mão de obra, manutenção), mas também gera lucro, o que é fundamental para a sustentabilidade e escalabilidade da atividade em nível industrial.

Simultaneamente, a metodologia permite a obtenção de um concentrado de PVC com mínima contaminação metálica o que adequa as propriedades do polímero para aplicações industriais. Por exemplo, o estudo de Panizio (2022) evidenciou a importância da separação eficiente dos componentes durante o processamento de resíduos de isolamento de cabos elétricos, contribuindo para obtenção de materiais reciclados com características desejáveis. A subsequente etapa de extrusão aditivada é essencial para a "revalorização" efetiva do polímero. A incorporação de aditivos, como discutido por Ziliani (2023),

compensa a degradação e restaura as propriedades do material, tornando-o apto para competir com a resina virgem em diversas aplicações, como perfis, solados de calçados, tapetes automotivos, entre outros. Desta forma, a abordagem valida-se como um modelo eficiente de Economia Circular na prática (José; Nunes, 2025). Ela transforma um resíduo complexo e de difícil gestão em duas correntes de materiais de alto valor agregado, que são reintroduzidos na cadeia produtiva. O processo evita o descarte em aterros, reduz a demanda por recursos naturais e fortalece a indústria da reciclagem.

#### 4. CONCLUSÃO

O estudo permitiu concluir que a metodologia sequencial para a revalorização de resíduos de fios e cabos elétricos — abrangendo cominuição, separação por densidade, separação eletrostática e extrusão aditivada — é tecnicamente robusta, economicamente viável e ambientalmente vantajosa. A abordagem consolida-se como uma solução eficaz e integrada para a gestão sustentável de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). A eficácia do processo é intrinsecamente ligada à sinergia entre as etapas. A combinação estratégica das tecnologias de separação é crucial para obter frações de cobre e PVC com a pureza exigida pelo mercado, garantindo a viabilidade econômica do ciclo. A revalorização da fração polimérica complementa o ciclo, assegurando que ambos os componentes principais do resíduo sejam efetivamente reintroduzidos na cadeia produtiva, em um verdadeiro modelo de Economia Circular.

#### REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, T. A. **Reciclagem de PVC: degradação e estabilização**. São Paulo: Artliber Editora, 2019. Disponível em: [https://www.artliber.com.br/reciclagem-de-pvc-degradacao-e-estabilizacao\\_9788579274959](https://www.artliber.com.br/reciclagem-de-pvc-degradacao-e-estabilizacao_9788579274959). Acesso em: 14 ago. 2025.
- ARAÚJO, M. C. P. B. de. **Reciclagem de fios e cabos elétricos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-20112006-163236/pt-br.php>. Acesso em: 14 ago. 2025.
- ARAÚJO, M. C. P. B. de; CHAVES, A. P.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Reciclagem de fios e cabos elétricos - cabo paralelo. **Rem: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 1, p. 83-88, jan./mar. 2007. DOI: 10.1590/S0370-44672007000100012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/Cqxz9kRxVz7VzCqYh6Yg6Jc/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 14 ago. 2025.
- CUI, J.; FORSSBERG, E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 99, n. 3, p. 243-263, 2003. DOI: 10.1016/s0304-3894(03)00061-x. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12758010/>. Acesso em: 14 ago. 2025.
- JOSÉ, F. C.; NUNES, E. de C. D. Transformando resíduos em recursos: a economia circular e a reciclagem de cabos elétricos. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 12053-12067, fev. 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n2-017. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/24108>. Acesso em: 14 ago. 2025.
- PANIZIO, F. M. **Processamento de resíduos de isolamento de cabos elétricos para obtenção de materiais reciclados**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)

- Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2022. Disponível em: <http://dspace.mackenzie.br/handle/10899/30351>. Acesso em: 14 ago. 2025.

SANTOS, F. P. **Aplicação da separação eletrostática na purificação de polímeros reciclados de REEE**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/13515>. Acesso em: 14 ago. 2025.

SCHEIRS, J. **Polymer Recycling: Science, Technology and Applications**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/Polymer+Recycling%3A+Science%2C+Technology+and+Applications%2C+2nd+Edition-p-9781119054252>. Acesso em: 14 ago. 2025.

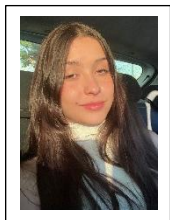
ZILIANI, C. Dicas de transformação #57 Reciclagem de PVC. *In: Ziliani Consultoria*. [S. l.]: YouTube, 20 out. 2023. 1 vídeo (10 min). Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=kY85a-y4y\\_A](https://www.youtube.com/watch?v=kY85a-y4y_A). Acesso em: 14 ago. 2025.

## AGRADECIMENTOS

Expressamos nossa gratidão ao SENAI-SP, em especial à Faculdade de Tecnologia SENAI Mario Amato, pela confiança e suporte essencial na realização deste projeto. Reconhecemos de maneira especial os colaboradores que se dedicaram à triagem do PVC e do cobre, cujo comprometimento, aliado à pesquisa, foi fundamental para o sucesso da Economia Circular.

## Sobre os autores:

### <sup>i</sup> Yasmim Oliveira Cordeiro



Possui Técnico em Assistente Administrativo (2021) pelo SENAI Almirante Tamandaré, Técnico em Química (2023) pelo SENAI Mario Amato, no qual participei do Programa Geração Inova em parceria com a empresa Hyundai. Atualmente cursando na graduação em Química Industrial (2025) pelo SENAI Mario Amato Campus Almirante Tamandaré, estou ingressando como estagiária no Distrito de Tecnologia SENAI Mario Amato no setor de Coleta.

### <sup>ii</sup> Fabiano Caio José



Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Santa Cecília - UNISANTA (1999), cursando atualmente a Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mecânica pela Universidade Santa Cecília – UNISANTA. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Projetos para Ferramentaria de Moldes para Plásticos, Administração de Empresas, Gestão de Negócio e Pedagogia. Atualmente é coordenador da Faculdade de Tecnologia SENAI Mario Amato.

### <sup>iii</sup> Edilene de Cássia Dutra Nunes



É graduada em Engenharia de Materiais – Polímeros (1990) e Metais (1992) pela UFSCar, Mestrado (1994) e doutorado (2000) em Ciência e Engenharia de Materiais também pela UFSCar e graduação em Administração de Empresas (UNICEP 1994). Atuou na área de Administração em várias Instituições de Ensino Superior, orientador de Polo da FATEC/SP, graduação e Pós-graduação. Atualmente, está como IFP-III da Faculdade de Tecnologia SENAI Mario Amato no curso de Bacharel em Química, docente do IPT/ALMACO e do Instituto Racine.