

## ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO PARA OS IMPACTOS CAUSADOS POR RESÍDUOS GERADOS PELA INDÚSTRIA DE EXTRAÇÃO MINEIRA

MAIRA DE LOURDES REZENDE<sup>1</sup>; PATRICIO HERNÁN MARABOLÍ ALBORNOZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fatec Sorocaba – Coordenadoria de Tecnologia em Polímeros

<sup>2</sup>Instituto de Capacitación Profesional (INACAP Chile) – Departamento de Minería y Logística  
maira.rezende@fatec.sp.gov.br

*Alternative solutions to the impacts of waste generated by the mining industry*

Eixo Tecnológico: Ambiente e Saúde

### Resumo

O desenvolvimento de um projeto COIL com a instituição chilena INACAP, durante o primeiro semestre de 2021, permitiu diagnosticar a problemática ocasionada por 4 tipos de resíduos oriundos de mineração. Estes destacam, dentre outras problemáticas já abordadas em projetos anteriores, a contaminação de solos por metais potencialmente tóxicos e lubrificantes, bem como o acúmulo de Polietileno de alta densidade (PEAD) e de pneus “Off the Road” (OTR), que são feitos especificamente para atuar em terrenos irregulares, como os encontrados em mineradoras. O projeto desenvolvido teve como objetivo principal avaliar formas de minimizar os impactos ambientais gerados por resíduos oriundos da indústria de extração mineira com base em uma pesquisa científica e tecnológica colaborativa internacional com a INACAP. Os objetivos específicos consistem em promover a reciclagem de tubos de PEAD oriundos de atividades de mineração; verificar a viabilidade de utilizar o PEAD reciclado em compósitos com cargas e reforços naturais e minerais para a substituição da madeira; avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos obtidos e compará-las com as propriedades da madeira e da madeira plástica comercialmente utilizada. Compósitos de PEAD (virgem e reciclado) com farinha de madeira foram obtidos por meio de processo de injeção. Suas propriedades foram avaliadas por meio de ensaios mecânicos. Os resultados permitiram concluir que a produção de compósitos com incorporação de PEAD reciclado é viável e pode minimizar os problemas de impactos ambientais causados pelo descarte de resíduos provenientes da indústria extrativa mineira. Entretanto, com relação ao comportamento mecânico apresentado pelas amostras obtidas, pode-se afirmar que este é menor quando comparado ao polímero virgem, o que não compromete sua aplicação em aplicações que não exijam um desempenho elevado. Faz-se necessário avaliar a interação da carga com a matriz por meio de técnicas como a microscopia eletrônica de varredura, o que pode ser realizado em trabalhos futuros.

**Palavras-chave:** Polímeros, Resíduos, Impactos Ambientais, Mineração.

### Abstract

The development of a COIL project with the Chilean institution INACAP during the first half of 2021 has made it possible to diagnose the problems caused by four types of mining waste. These include, among other problems already addressed in previous projects, the contamination of soils by potentially toxic metals and lubricants, as well as the accumulation of high-density polyethylene (HDPE) and “Off the Road” (OTR) tires, which are made specifically to work on uneven terrain, such as those found in mining companies. The main objective of the project was to evaluate ways of minimizing the environmental impacts generated by waste from the mining industry, based on international collaborative scientific and technological research with INACAP. The specific objectives are to promote the recycling of HDPE pipes from mining activities; to verify the feasibility of using recycled HDPE in composites with natural and mineral fillers and reinforcements to replace wood; to evaluate the mechanical properties of the composites obtained and compare them with the properties of wood and commercially used plastic wood. Composites of HDPE (virgin and recycled) with wood flour were obtained by injection molding. Their properties were assessed using mechanical tests. The results show that the production of composites incorporating recycled HDPE is viable and can minimize the environmental impact caused by the disposal of waste from the mining industry. However, with regard to the mechanical behavior of the samples obtained, it can be said that this is lower when compared to virgin polymer, which does not compromise its application in applications that do not require high performance. It is necessary to evaluate the interaction between the filler and the matrix using techniques such as scanning electron microscopy, which can be done in future work.

**Key-words:** Polymers, Waste, Environmental Impacts, Mining.

## 1. Introdução

A mineração é uma atividade que gera emprego e renda para muitas comunidades em todo o mundo. Porém, existem problemas diretamente associados ao exercício desta prática, uma vez que os resíduos originados durante o processo de mineração caracterizam a fonte de poluição ambiental. A contaminação do solo, do ar e da água pode afetar negativamente a biodiversidade e os ecossistemas, podendo conferir riscos para a saúde [1].

Drenagens ácidas, dissolução oxidativa e reductiva, e falhas catastróficas de barragens constituem os principais problemas que levam diretamente à perda da licença social para operação da indústria de mineração. De acordo com Dold [2], a estratégia de prevenção mais adequada consiste em eliminar os resíduos da mina a fim de recuperar a licença social para operar a partir da economia circular. As operações de mineração causam contaminação de solos agrícolas adjacentes por meio de deposição de pó de fundição ou derramamento de rejeitos de mina [3]. Porém, não são apenas resíduos de metais pesados, como o cobre, que exercem impacto negativo em relação ao meio ambiente. Sabe-se que a geração de resíduos e disposição de rejeitos é fator crítico da mineração, e pode ser extremamente custoso e danoso aos ecossistemas naturais [4].

O desenvolvimento de um projeto COIL com a instituição chilena INACAP, durante o primeiro semestre de 2021, permitiu diagnosticar a problemática ocasionada por 4 tipos de resíduos oriundos de mineração no país. Estes destacam, dentre outras problemáticas já abordadas em projetos anteriores, a contaminação de solos por metais pesados e lubrificantes, bem como o acúmulo Polietileno de alta densidade (PEAD) e de pneus “Off the Road” (OTR), também conhecidos como pneus “Fora de Estrada”, que são feitos especificamente para atuar em terrenos anormais e duros. Esses pneus são atribuídos ao transporte em terrenos profundamente irregulares, como aqueles encontrados em mineradoras [5].

O projeto em questão é aderente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS) da ONU e apresenta relevância para a Unidade e para o CEETEPS, uma vez que a parceria firmada com a IES chilena INACAP proporcionou maior visibilidade e divulgação de seus cursos por meio da internacionalização da pesquisa. Outro indicador que merece destaque é que a temática proposta é extremamente relevante, pois a poluição e os impactos ambientais ocasionados por resíduos de mineração e metais pesados constituem uma preocupação que afeta toda a cadeia produtiva, inclusive sua economia. Sabe-se que o modo como as sociedades se apropriam dos recursos naturais para satisfação de suas necessidades tem se tornado cada vez menos sustentável. Ainda que diversas melhorias tenham ocorrido nas últimas décadas, tais como o aumento da ecoeficiência, estas não têm se mostrado suficientes – principalmente por manter um caráter “linear” da economia (extrair– fabricar- usar- descartar). Dentre as propostas para uma mudança dos padrões de produção e consumo encontra-se o conceito de Economia Circular, que busca a circularidade no uso de materiais e energia de forma intencional já no projeto dos produtos [6].

Dessa forma, além dos aspectos relevantes apontados, entende-se que os dados obtidos com a realização deste projeto contribuíram para um maior entendimento dos impactos desses resíduos na natureza e fornecer informações relevantes para o setor econômico a fim de buscar a consolidação de uma economia circular e com menos desperdício e, conseqüentemente, menor impacto ambiental.

Diante do exposto acima, o projeto desenvolvido durante o período compreendido entre 01/02/2024 e 31/01/2025 teve como objetivo principal avaliar formas de minimizar os impactos

### *Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ*

ambientais gerados por resíduos oriundos da indústria de extração mineira com base em uma pesquisa científica e tecnológica colaborativa internacional com a IES INACAP.

Os objetivos específicos consistem em promover a reciclagem de tubos de polietileno de alta densidade (PEAD) oriundos de atividades de mineração; verificar a viabilidade de utilizar o PEAD reciclado em compósitos com cargas e reforços naturais e minerais para a substituição da madeira e avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos obtidos e compará-las com as propriedades da madeira e da madeira plástica comercialmente utilizada.

## **2. Materiais e métodos**

### 2.1. Materiais

Os seguintes materiais foram utilizados no desenvolvimento desse trabalho: Polietileno de alta densidade (PEAD) reciclado, fornecido pela NBR Plásticos, Sorocaba - SP, Brasil; Polietileno de alta densidade (PEAD) virgem GF4950 (MFI (melt flow index) 0,36 g/10min), fornecido pela Braskem - Brasil; Farinha de madeira de Araucária e Pinus, fornecida pela Madeplast, Mandirituba - PR, Brasil, com as seguintes especificações: densidade 0,52 - 0,60 g/cm<sup>3</sup>; densidade aparente 0,12 - 0,16 g/cm<sup>3</sup>; teor de umidade entre 7,0 e 10% e teor máximo de cinzas de 0,60%; pH 4,0 - 6,0; calor de combustão 4.065 kcal/kg; coeficiente de transmissão de calor 0,15 - 0,20 W/m) utilizada como carga vegetal na matriz polimérica de PEAD; Carbonato de cálcio utilizado como carga; Estearato de cálcio utilizado como lubrificante.

### 2.2. Metodologia

Os compósitos foram obtidos por meio da dispersão de 30% de farinha de madeira na matriz de PEAD. Esta quantidade de farinha de madeira foi definida com base na literatura [7, 8] e a homogeneização/dispersão foi realizada em um misturador termocinético do tipo Drais (Nº 5280, MH equipamentos Ltda, São Paulo, Brasil).

Com o intuito de verificar a influência da farinha de madeira nos compósitos obtidos, foram confeccionadas misturas sem a farinha de madeira, porém com a mesma quantidade de carbonato de cálcio, o qual foi adicionado com a finalidade de atuar como agente de carga e como lubrificante.

Os insumos foram secos antes do processamento a fim de evitar a degradação por hidrólise. A farinha de madeira foi seca a 100°C durante 4 horas e o PEAD (reciclado e virgem) a 80°C durante 2 horas, ambos em estufa. Após a secagem, os materiais foram misturados manualmente antes de serem introduzidos no misturador termocinético, onde os materiais foram homogeneizados durante 15 segundos a baixa velocidade e durante 15 segundos à alta velocidade até completa fusão. Após a fusão, os materiais foram homogeneizados durante mais 10 segundos à alta velocidade e, em seguida, durante 10 segundos à baixa velocidade, com arrefecimento.

A parede da câmara de processamento foi mantida a 170 °C e a massa total do lote foi de 650 g, em todos os casos. As misturas foram moídas num moinho de facas e contrafacas da marca Seibt, de 10 cv. Todos os compostos obtidos e estudados neste trabalho são apresentados na Tab. 1.

**Tab. 1** - Compostos obtidos e estudados

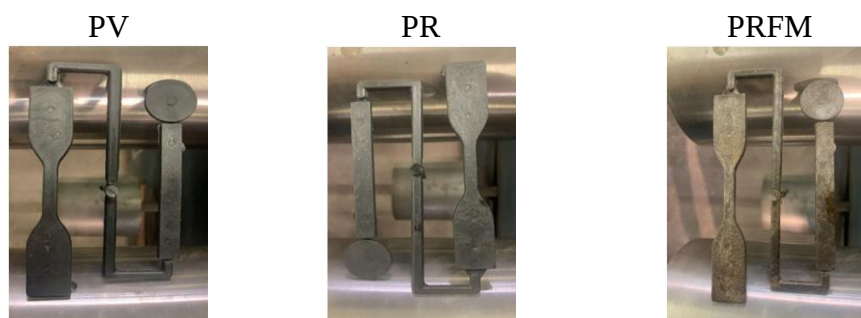
| <b>Sigla do Compósito</b> | <b>Quantidade de PEAD (%)</b> | <b>Farinha de Madeira (%)</b> | <b>Carbonato de Cálcio (%)</b> | <b>Estearato de Cálcio (%)</b> |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| PV                        | 100                           | 0                             | 0                              | 0                              |
| PR                        | 100                           | 0                             | 0                              | 0                              |
| PREC                      | 70                            | 0                             | 30                             | 0,3                            |
| PVEC                      | 70                            | 0                             | 30                             | 0,3                            |
| PVFM                      | 70                            | 30                            | 0                              | 0,3                            |
| PRFM                      | 70                            | 30                            | 0                              | 0,3                            |

Legenda: PV: polímero virgem; PR: polímero reciclado; PREC: polímero reciclado com estearato e carbonato de cálcio; PVEC: polímero virgem com estearato e carbonato de cálcio; PVFM: Polímero virgem com farinha de madeira; PRFM: Polímero reciclado com farinha de madeira.

**Fonte:** (Autores, 2025).

O material triturado foi moldado em corpos de prova para análise mecânica de tração e impacto, de acordo com a norma ASTM D638. A moldagem foi realizada com o auxílio de uma injetora automática PIC 22/10 (Petersen & Cia. Ltda., Sorocaba - SP, Brasil), com capacidade de injeção de 22 g de poliestireno (PS) e uma força de fixação de 10 toneladas. A temperatura na zona 1 do injetor foi de 160°C e na zona 2 foi de 200°C. A Fig. 1 apresenta as imagens dos corpos de prova injetados.

**Fig. 1** – Corpos de provas obtidos a partir do processo de moldagem por injeção



**Fonte:** (Autores, 2025).

A caracterização das propriedades mecânicas dos compósitos estudados foi efetuada por meio do ensaio de resistência à tração e do ensaio de impacto IZOD. Os ensaios foram realizados com o intuito de observar a influência da farinha de madeira na resistência à tração, de acordo com a norma ISO 527. As análises foram realizadas à temperatura ambiente, em uma máquina de ensaios universal Emic Modelo DL 2000, com velocidade de deslocamento de 2,5 mm/min.

### 3. Resultados e Discussão

A Tab. 2 apresenta os resultados obtidos na análise de impacto IZOD.

**Tab. 2 - Resultados obtidos durante ensaio de impacto**

| Amostra | Impacto IZOD (KJ/m <sup>2</sup> ) |
|---------|-----------------------------------|
| PV      | 79,06                             |
| PR      | 34,55                             |
| PREC    | 32,65                             |
| PVEC    | 86,79                             |
| PVFM    | 19,59                             |
| PRFM    | 6,53                              |

Fonte: (Autores, 2025).

Os resultados apresentados na tabela 2 demonstram que a amostra que apresentou maior resistência ao impacto foi o PVEC.

A dimensão das partículas dos materiais de reforço é outro fator que pode influenciar a resistência ao impacto dos compósitos. Este comportamento foi estudado por Sosiati et al. [9], cujo trabalho permitiu verificar que os compósitos reforçados com partículas de menor tamanho apresentam melhor resistência ao impacto, uma vez que as partículas menores apresentam uma maior área superficial, resultando numa melhor resistência ao impacto.

Quando a área de superfície das partículas é maior, resulta em uma melhor adesão entre a matriz e o reforço.

Assim, considerando a dispersão das cargas utilizadas, o carbonato apresenta menor tamanho de partícula, o que justifica os resultados obtidos para a resistência ao impacto para os compósitos com farinha de madeira, uma vez que esta possui dimensões maiores que as partículas da carga de carbonato.

Além disso, uma boa adesão matriz/fibra indica uma boa resistência mecânica através de uma eficiente transferência de carga da matriz para a fibra, porém, o material torna-se frágil.

Este comportamento frágil afeta a resistência ao impacto, uma vez que a sua capacidade de absorver o impacto é reduzida, tornando-se menos tenaz [10].

É importante considerar também que, de acordo com Scheeren et al. [11], os resíduos de farinha de madeira têm uma distribuição granulométrica muito heterogênea.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaios universal. Foram obtidos os dados de tensão na força máxima e de tensão na ruptura.

Os resultados dos ensaios de tração das amostras estudadas são apresentados na Tab. 3.

**Tab. 3 - Resultados obtidos durante ensaio de tração**

| Amostra | Tensão na Força Máxima<br>(MPa) | Tensão na Ruptura<br>(MPa) |
|---------|---------------------------------|----------------------------|
| PV      | 66,23                           | 64,81                      |
| PR      | 54,84                           | 49,14                      |
| PREC    | 45,58                           | 44,15                      |
| PVEC    | 64,1                            | 52,7                       |
| PVFM    | 84,04                           | 79,05                      |
| PRFM    | 43,44                           | 41,3                       |

Fonte: (Autores, 2025).

As fraturas apresentadas pelas amostras apresentaram fibrilas, resultantes do fluxo frio do material, ou seja, existe uma estricção da amostra devido à deformação plástica até uma tensão

#### *Anais da VIII Mostra de Docentes em RJI*

quase constante, em que as cadeias de polímero são orientadas na direção da deformação, seguida de cristalização induzida e fratura após completa organização [12].

Tomando o polímero virgem como referência, pode-se observar que, quando a farinha de madeira foi adicionada a compósitos com polietileno de alta densidade (PEAD), houve uma diminuição da resistência à tração atribuída à diminuição da adesão da matriz polimérica entre si, o que pode ser justificada pela fraca adesão entre elas.

É possível observar que o polímero virgem (PV) apresenta maior resistência à tração, propriedade que é reduzida nos compósitos contendo polímero reciclado com estearato e carbonato de cálcio (PREC) e no polímero reciclado com farinha de madeira (PRFM), os quais apresentam propriedades similares entre si.

De acordo com a literatura, a resistência à tração diminui com a incorporação de farinha de madeira sem a adição de agentes de acoplamento [13].

#### **4. Considerações finais**

Dessa forma, além dos aspectos relevantes apontados, entende-se que os dados obtidos com a realização deste projeto contribuíram para um maior entendimento dos impactos desses resíduos na natureza e fornecer informações relevantes para o setor econômico a fim de buscar a consolidação de uma economia circular e com menos desperdício e, conseqüentemente, menor impacto ambiental.

#### **Referências**

- [1] TARVAJINEN, T. et al. Acceptable soil baseline levels in Taltal, Chile, and in Tampere, Finland. **Appl Geochem**, 123, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104813>
- [2] DOLD, D. Sourcing of critical elements and industrial minerals from mine waste – The final evolutionary step back to sustainability of humankind?. **J Geochem Explor**, v. 219, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106638>
- [3] STUCKEY, J. W. et al. Impact of mining contamination source on copper phytotoxicity in agricultural soils from central Chile. **Agro Sur**, v. 49, 1, 2021. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2021.v49n1-04>
- [4] DUTHIE, A. C. R. et al. A economia circular e o papel da mineração. VI Jornada do Programa de Capacitação Institucional – **PCI/CETEM**, 2017. Disponível em [https://www.academia.edu/124104272/a\\_economia\\_circular\\_e\\_o\\_papel\\_da\\_minera%C3%A7%C3%A3o](https://www.academia.edu/124104272/a_economia_circular_e_o_papel_da_minera%C3%A7%C3%A3o) Acesso em 13 de abril de 2025.
- [5] RODOVALHO, E. et al. Reducing GH Emissions through efficient tire consumption in open pit mines. **J Clean Prod**, 255, 2020.
- [6] RIBEIRO, F. M., KRUGLIANSKAS, I. A. A economia circular no contexto europeu: conceito e potenciais de contribuição na modernização das políticas de resíduos sólidos [Internet]. Inovação e sustentabilidade: um desafio para enfrentar as mudanças climáticas e seus impactos planetários. 2014; Disponível em: <http://www.engema.org.br/XVIENGEMA/473.pdf>, Acesso em 13 de abril de 2025.
- [7] NOGUEIRA, B. R. Avaliação dos efeitos da radiação ionizante por feixe de elétrons na incorporação de fibras de piaçava (*Attalea funifera* Mart.) no copolímero de etileno e álcool vinílico (EVOH). 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-03042012-103716/>. Acesso em: 13 abr. 2025.
- [8] ROSÁRIO, F. et al. Resíduos de sisal como reforço em compósitos de polipropileno virgem e reciclado. **Polímeros**, 21 (2), 2011. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282011005000021>

*Anais da VIII Mostra de Docentes em RJI*

- [9] SOSIATI, H. et al. Effect of CaCO<sub>3</sub> Particles Size and Content on Impact Strenght of Kenaf/CaCO<sub>3</sub>/Epoxy Resin Hybrid Composites. **Indones. J. Appl. Phys**, 10, 2020. <https://doi.org/10.13057/ijap.v10i01.37748>
- [10] CALLISTER, W. D. Ciencia e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 7th Edition, LTC, Rio de Janeiro, 2008.
- [11] SCHEEREN, R.; SPERLING, D. M. Flexible multi-scalar system: 3D printing of modular components for adaptable tensioned structures. Proceedings. São Paulo: Edgar Blucher, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/sigradi2020-51>. Acesso em: 13 abr. 2025.
- [12] RAMOS, V. D. et al. Propriedades mecânicas de polietileno de alta densidade (pead) reciclado a partir de embalagens pós-consumo. Congresso: 13o Congresso Brasileiro de Polímeros (13 CBPol), Natal – RN, 2015.
- [13] CORREA, C. A. et al. Compósitos termoplásticos com madeira, Polímeros, 13, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000300005>