



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



## PROCESSO DE PIRÓLISE COMO ESTRATÉGIA PARA DESTINAÇÃO SUSTENTÁVEL DO LODO DE FOSFATIZAÇÃO PROVENIENTE DE UMA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.9.26.I-015>

Betina Kleinschmidt Leal Santos (\*), Ana Flávia Locateli Godoi, Juliana Schultz, Emmanuel Sarnacki Bernardi

\* Universidade Federal do Paraná, betinakls@ufpr.br.

### RESUMO

A gestão de resíduos industriais é essencial para minimizar impactos ambientais e promover práticas alinhadas à economia circular e à Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS). Entre os resíduos industriais, destaca-se o lodo de fosfatização (LF), subproduto do processo de pintura em indústrias automobilísticas, caracterizado pela presença de metais como zinco (Zn) e níquel (Ni), que conferem periculosidade ao material. A pirólise apresenta-se como uma alternativa de tratamento capaz de reduzir o volume, imobilizar metais de alta densidade e gerar um material carbonáceo denominado *char*, com potencial de aplicação ambiental e tecnológica. Nesse contexto, este trabalho visa investigar a pirólise como estratégia de tratamento e destinação do LF, produzindo *chars* em diferentes temperaturas e avaliando seu rendimento e sua composição elementar.

**PALAVRAS-CHAVE:** pirólise, resíduos industriais, lodo de fosfatização, *char*.

### ABSTRACT

The management of industrial waste is essential to minimize environmental impacts and to promote practices aligned with the circular economy and Brazil's National Solid Waste Policy. Among industrial wastes, phosphate sludge (PS) stands out as a by-product of the painting process in the automotive industry, characterized by the presence of metals such as zinc (Zn) and nickel (Ni), which contribute to its hazardous characteristics. Pyrolysis can be used as a treatment alternative capable of reducing waste volume, immobilizing heavy metals, and producing *char*, a carbon-rich material with potential environmental and technological applications. In this context, this study aims to investigate pyrolysis as a treatment and disposal strategy for PS by producing *chars* at different temperatures and evaluating their yield and elemental composition.

**KEY WORDS:** pyrolysis, industrial waste, phosphate sludge, *char*.

### INTRODUÇÃO

O modelo linear tradicional de produção, baseado na lógica de produzir, consumir e descartar, resulta na geração contínua de resíduos em todas as etapas do processo produtivo. Os resíduos industriais, carregando compostos característicos das matérias-primas e dos processos que lhes deram origem, quando mal manejados, têm elevado potencial de contaminação de solos e corpos d'água. A presença de substâncias químicas perigosas, metais de alta densidade e outros poluentes, amplia ainda mais os riscos associados à contaminação, configurando uma ameaça significativa à saúde humana e ao meio ambiente. Por outro lado, diversos tipos de resíduos industriais apresentam alto potencial de reciclagem e recuperação, podendo gerar valor econômico e contribuir para práticas produtivas mais sustentáveis quando adequadamente aproveitados (SALMAN *et al.*, 2025).

A indústria automobilística é reconhecida como uma das maiores geradoras de resíduos sólidos no setor industrial, em razão da complexidade de seus processos produtivos e da diversidade de materiais utilizados (ŠTULOVIĆ *et al.*, 2025). Estima-se que sejam produzidos entre 200 e 250 toneladas de resíduos sólidos por veículo fabricado, dos quais cerca de 5% são classificados como perigosos e necessitam de estratégias específicas para destinação (VOLKSWAGEN DO BRASIL, 2024).

Entre os resíduos gerados em indústrias automotivas, destaca-se o lodo de fosfatização (LF), subproduto do tratamento de superfície utilizado para conferir proteção anticorrosiva e melhorar a aderência da pintura (GOKDAG; CETIN, 2025). Em razão dos aditivos presentes na solução fosfatizante e de sua interação com o aço, o LF apresenta elevados teores de metais, especialmente zinco (Zn) e níquel (Ni) (UCAROGLU; TALINLI, 2012). Atualmente, suas principais



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



rotas de destinação incluem a estabilização/solidificação seguida de disposição em aterro ou o coprocessamento. Dessa maneira, o setor automotivo tem sido pressionado a adotar práticas de gestão mais sustentáveis, priorizando a redução, a reutilização e a valorização de resíduos, conforme os princípios da economia circular e com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

Nesse contexto, a pirólise surge como uma alternativa de tratamento térmico capaz de reduzir o volume e converter o LF em produtos de maior valor agregado após remoção dos metais tóxicos (SØRMO *et al.*, 2024). A reação térmica converte o material de partida em três frações: uma fração sólida rica em carbono (carvão pirolítico ou *char*); uma fração líquida composta por condensados orgânicos voláteis (óleo de pirólise); e uma fração gasosa não condensável (gás de síntese – syngas) (BEHERA; PODDAR; BYUN, 2025). Entre esses produtos, destaca-se o *char*, um material carbonáceo de estrutura porosa e elevada estabilidade, com potencial para aplicações como adsorvedor de poluentes (SYLWAN *et al.*, 2023) ou como condicionador de solo (CHANAKA UDAYANGA *et al.*, 2019a). A proporção e as características dos produtos dependem de parâmetros operacionais, especialmente taxa de aquecimento, tempo de residência e temperatura, e da natureza do substrato.

Entre os parâmetros mais utilizados para avaliar o potencial de uso do *char*, ressalta-se a composição elementar (C, N, H) como um indicador do seu grau de carbonização e da sua estabilidade, avaliados pela razão H/C. Valores inferiores a 0,3 são associados à presença de anéis aromáticos altamente condensados, enquanto valores acima de 0,7 indicam estruturas menos condensadas e, portanto, menor estabilidade. Assim, valores baixos indicam um material mais estável e recalcitrante, ou seja, resistente a degradação (MATOS *et al.*, 2021).

Diante disso, este estudo investiga a pirólise como alternativa para o tratamento e a valorização do LF proveniente de uma indústria automotiva, considerando seu potencial de conversão em *char*.

## OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo produzir *char* a partir da pirólise do lodo de fosfatização proveniente de uma indústria automotiva, avaliando a influência da temperatura no rendimento e nas características do material obtido. Adicionalmente, as amostras de lodo *in natura* foram caracterizadas quanto ao teor de umidade e de cinzas, visando compreender a influência dessas propriedades no processo e nos produtos gerados.

## METODOLOGIA

A amostra de LF é proveniente de uma indústria automobilística de grande porte na Região Metropolitana de Curitiba/PR. A coleta foi realizada pela equipe da própria indústria, diretamente na saída do filtro prensa, onde o resíduo já se encontra preparado para a destinação final.

Inicialmente, foi realizada a etapa de secagem com o objetivo de remover a umidade das amostras de lodo para garantir a eficiência do processo de pirólise e aumentar o rendimento de *char*. Cada amostra foi pesada em seu estado natural para determinação do peso inicial ( $m_i$ ). Em seguida, colocada em estufa (modelo Gehaka) a 100 °C, sendo pesada em intervalos de 30 minutos até atingir massa constante ( $m_f$ ). O teor de umidade é calculado segundo a Equação 1:

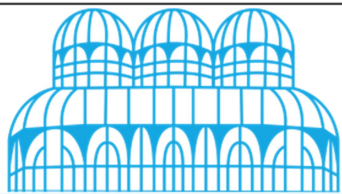
$$\text{Teor de umidade (\%)} = \frac{m_i \text{ (g)} - m_f \text{ (g)}}{m_i \text{ (g)}} \times 100 \quad \text{equação (1)}$$

em que:  $m_i$  = massa inicial de LF utilizada (g) e  $m_f$  = massa final de LF obtida (g).

O teor de cinzas foi obtido por meio do método de calcinação a 750°C, conforme especificado na norma D3174-12 E01, da Sociedade Americana de Testes e Materiais (American Society for Testing and Materials – ASTM) (2018). As amostras foram pesadas antes e após a queima, e o teor de cinzas foi calculado pela Equação 2:

$$\text{Teor de cinzas (\%)} = \frac{A \text{ (g)} - B \text{ (g)}}{C \text{ (g)}} \times 100 \quad \text{equação (2)}$$

em que: A = massa do cadinho com o resíduo de cinzas após a calcinação (g); B = massa do cadinho vazio antes da calcinação (g); e C = massa da amostra utilizada para análise (g).



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



A produção de *char* foi realizada a partir da pirólise das amostras secas de LF, sendo obtidas três amostras, pirolisadas em diferentes temperaturas finais (450, 550 e 600°C), com taxa de aquecimento de 5 °C/min e tempo de residência de 30 minutos. A pirólise foi conduzida em um forno cilíndrico EDG Equipamentos (FT-HI/40) (Figura 1), localizado no Laboratório de Processos e Projetos Ambientais (LABPPAM) do Departamento de Química da UFPR.



Figura 1: Forno cilíndrico utilizado na pirólise. Fonte: Rocha, 2022.

Ao final, o rendimento foi definido pela razão entre a massa de *char* obtida ( $m_{CH}$ ) e a massa inicial de LF utilizada ( $m_i$ ), expressando o resultado em porcentagem, conforme a Equação 3:

$$\text{Rendimento } (Y_{CH}) (\%) = \frac{m_{CH}(\text{g})}{m_i(\text{g})} \times 100 \quad \text{equação (3)}$$

em que:  $m_{CH}$  = massa de *char* obtida (g) e  $m_i$  = massa inicial de LF utilizada (g).

Por último, foi realizada uma análise elementar nas amostras de LF e dos *chars* produzidos para determinar o seu teor de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N). A análise foi conduzida em analisador elementar (modelo vario EL cube) com amostras em triplicata (20 mg).

## RESULTADOS

A caracterização do LF revelou teor de umidade de 57,11% e conteúdo de cinzas de 77,38% (base seca), indicando a predominância de fração inorgânica no material já observada em outros estudos (NAVARRO-BLASCO *et al.*, 2015; XIE *et al.*, 2020).

O processo de pirólise resultou em três amostras de *char*, com rendimentos em base seca expressos na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1. Rendimento dos *chars* de acordo com a temperatura de pirólise. Fonte: Autor do Trabalho.

Temperatura (°C)	Rendimento (%)
450	61,19
550	55,39
600	58,77

Observa-se que o rendimento de *char* foi alto nas três temperaturas de pirólise, sendo acima de 50%. Esses valores estão condizentes com estudos de pirólise em lodos industriais, geralmente caracterizados por alto teor de cinzas (XIE *et al.*, 2020).

Embora o comportamento esperado para processos de pirólise seja a redução progressiva do rendimento sólido conforme o aumento da temperatura, devido à maior volatilização da matéria orgânica (AL-RUMAIHI *et al.*, 2022),



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



observou-se um leve incremento de 3,38% na amostra produzida a 600°C em relação à de 550°C. Essa tendência, apesar de representar uma diferença percentual pequena, pode ser atribuída à composição característica do resíduo, que apresenta um alto teor de cinzas. Uma vez que a maior parte da fração orgânica já se encontra decomposta em temperaturas inferiores (entre 250°C e 550°C), o aumento sutil no rendimento a 600°C sugere fenômenos de reorganização da matriz inorgânica (CHANAKA UDAYANGA *et al.*, 2019b).

Temperaturas a partir de 550°C favorecem a migração de metais de frações instáveis para formas mais estáveis. O processo envolve a desidratação e decomposição de compostos inicialmente associados à matéria orgânica e a nódulos de Fe-Mn, resultando em fases minerais mais densas ou quimicamente estáveis (CHANAKA UDAYANGA *et al.*, 2019b). Nesse contexto, a cristalização pode ser entendida como um dos mecanismos responsáveis por essa reorganização estrutural, caracterizada pela transformação de fases amorfas em estruturas cristalinas mais ordenadas e energeticamente estáveis. A cristalização do LF em temperaturas superiores a 550 °C foi observada por Minikauskas *et al.*, (2016), por meio de picos exotérmicos em análises de calorimetria diferencial de varredura, evidenciando processos de estabilização da fase sólida nessa faixa de temperatura.

Dessa maneira, o maior rendimento a 600°C pode ser explicado pelo fato de que, nesta temperatura, o material atinge um estado mais estável, reduzindo a perda de massa durante a pirólise. Em contraste, a 550 °C, o sistema ainda se encontra em uma condição de decomposição ativa, que favorece a continuidade da volatilização de matéria orgânica e, conseqüentemente, menor rendimento.

A Tabela 2 apresenta os teores de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N), bem como as razões atômicas H/C e N/C para o LF e os *chars* produzidos em diferentes temperaturas de pirólise:

**Tabela 2. Resultados da análise elementar do LF e dos *chars*. Fonte: Autor do Trabalho.**

Amostra	Temperatura (°C)	C (%)	H (%)	N (%)	H/C	N/C
LF	-	1,49	1,46	1,08	0,98	0,72
<i>char</i>	450	1,11	0,32	0,89	0,29	0,80
	550	1,24	0,09	0,54	0,07	0,43
	600	0,94	0,07	0,43	0,08	0,46

A partir da Tabela 2, observa-se que o LF apresenta baixos teores de C, H e N (todos em torno de 1%), os quais sofrem redução após o processo de pirólise. Essa diminuição está associada à liberação de compostos voláteis durante o aquecimento, resultando na concentração da fração inorgânica no material residual.

Verifica-se ainda uma redução acentuada na razão H/C com o aumento da temperatura de pirólise, passando de 0,98 no LF para valores inferiores a 0,30 nos *chars*. Essa redução indica a ocorrência de reações de desidrogenação e polimerização, associadas ao aumento do grau de aromaticidade e, conseqüentemente, à maior estabilidade estrutural do material carbonáceo (XIE *et al.*, 2020). Em relação ao nitrogênio, observa-se a diminuição do teor de N e a diminuição da razão N/C após a pirólise, o que sugere a degradação de grupos funcionais nitrogenados presentes na matriz original.

De modo geral, os resultados indicam que os *chars* obtidos apresentam maior estabilidade química em comparação ao LF, sendo caracterizados por baixos valores de H/C, típicos de materiais mais condensados e resistentes à degradação (XIE *et al.*, 2020).

## CONCLUSÕES

A pirólise do lodo de fosfatização demonstrou ser uma estratégia tecnicamente viável para a valorização desse resíduo industrial, resultando na formação de *chars* com altos rendimentos (>50%) nas três temperaturas avaliadas (450, 550 e 600°C). Esse comportamento está diretamente associado ao elevado teor de cinzas do material, evidenciando que a fração inorgânica exerce papel determinante na retenção de massa durante o processo térmico.

Os resultados indicam que a temperatura de pirólise, embora relevante, não atua como único fator controlador do rendimento de *char*. A leve elevação observada a 600°C sugere a ocorrência de processos de reorganização estrutural da fração inorgânica, como cristalização e formação de fases mais estáveis, que contribuem para a redução da perda de massa em temperaturas mais elevadas.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



A análise elementar evidenciou a redução significativa dos teores de C, H e N após a pirólise, bem como a diminuição da razão H/C, indicando a progressiva aromatização e aumento da estabilidade química dos *chars*. Esses resultados confirmam a formação de materiais mais condensados, com maior resistência à degradação, especialmente nas temperaturas mais elevadas.

Dessa maneira, os resultados sugerem que os *chars* obtidos apresentam características promissoras do ponto de vista estrutural e de estabilidade, embora sua aplicabilidade dependa de outras propriedades físico-químicas e da presença de metais potencialmente tóxicos. Assim, estudos complementares, incluindo avaliação de metais, porosidade e grupos funcionais são essenciais para definir rotas seguras e eficientes de aplicação, como em materiais adsorventes, condicionadores de solo ou matrizes para imobilização de contaminantes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Behera, U.S., Poddar, S., Byun, H. An integrated approach to waste tire pyrolysis for value-added products: process optimization and a comprehensive economic study for scalability. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 9, n. 15, p. 4103–4124, 2025.
2. Chanaka Udayanga, W.D. *et al.* Pyrolysis derived char from municipal and industrial sludge: Impact of organic decomposition and inorganic accumulation on the fuel characteristics of char. **Waste Management**, v. 83, p. 131–141, jan. 2019a.
3. Chanaka Udayanga, W.D. *et al.* Insights into the speciation of heavy metals during pyrolysis of industrial sludge. **Science of The Total Environment**, v. 691, p. 232–242, nov. 2019b.
4. Gokdag, H., Cetin, A. Single bath zirconium coating: a greener and smarter industrial surface treatment. **International Journal of Corrosion and Scale Inhibition**, v. 14, n. 3, 27 set. 2025.
5. Matos, T.T.S. *et al.* Low temperature production of biochars from different biomasses: Effect of static and rotary lab reactors and application as soil conditioners. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, p. 105472, ago. 2021.
6. Minikauskas, A. *et al.* Phosphating sludge: properties and immobilization in ceramics. **Chemija**, v. 27, n. 1, 2016.
7. Al-Rumaihi, A. *et al.* A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 167, p. 112715, 2022.
8. Navarro-Blasco, I. *et al.* A safer disposal of hazardous phosphate coating sludge by formation of an amorphous calcium phosphate matrix. **Journal of Environmental Management**, v. 159, p. 288–300, ago. 2015.
9. Salman, S. *et al.* Pathways to advancing sustainable practices in industrial solid waste management: Unveiling obstacles and implications. **Next Research**, v. 2, n. 1, p. 100124, mar. 2025.
10. Sørmo, E. *et al.* Heavy Metals in Pyrolysis of Contaminated Wastes: Phase Distribution and Leaching Behaviour. **Environments**, v. 11, n. 6, p. 130, 19 jun. 2024.
11. Štulović, M. *et al.* Sustainable Integrated Approach to Waste Treatment in Automotive Industry: Solidification/Stabilization, Valorization, and Techno-Economic Assessment. **Sustainability**, v. 17, n. 19, p. 8553, 23 set. 2025.
12. Sylwan, I. *et al.* Primary and digested sludge-derived char as a Cd sorbent: feasibility of local utilisation. **Water Science & Technology**, v. 88, n. 11, p. 2917–2930, 1 dez. 2023.
13. Ucaroglu, S., Talinli, İ. Recovery and safer disposal of phosphate coating sludge by solidification/stabilization. **Journal of Environmental Management**, v. 105, p. 131–137, ago. 2012.
14. Volkswagen do Brasil. **Relatório de Sustentabilidade 2023**. 2024. Disponível em: <https://www.relatostar.com.br/2023/wp-content/uploads/2024/05/12928-Relatorio-Sustentabilidade-VWB-2023.pdf>. Acesso em: 03 set. 2025.
15. Xie, S. *et al.* Treatment of high-ash industrial sludge for producing improved char with low heavy metal toxicity. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 150, p. 104866, set. 2020.