cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Estudo da separação e recuperação de metais em LEDs de lâmpadas por metalurgia a vácuo

Esteves, C.R.B[1]; Eschtiler, E.C.A[1]; Rosa, J.S[2]; Moraes, C.A. M[1]
1.Universidade do Vale do Rio dos Sinos; 2.Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Introdução

A crescente demanda por dispositivos eletrônicos tem impulsionado o consumo de metais críticos, como gálio (Ga), índio (In) e ouro (Au), essenciais para a fabricação de componentes eletrônicos de alto desempenho. No entanto, a extração desses metais é ambientalmente impactante e economicamente onerosa. Uma rota mais sustentável é a reciclagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) para recuperação desses elementos, reduzindo a dependência da mineração primária e minimizando os impactos ambientais. Neste contexto, a metalurgia a vácuo surge como uma abordagem promissora para a separação e purificação desses metais. Este método utiliza diferenças de volatilidade entre os metais presentes nos REEEs para obter uma recuperação seletiva e de alta pureza, reduzindo a necessidade de reagentes químicos agressivos.

Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver e otimizar um processo de reciclagem baseado em metalurgia a vácuo para a recuperação de metais críticos a partir de LEDs extraídos de lâmpadas descartadas em Cooperativa de Coleta Seletiva da Cidade de Porto Alegre – Associação Chocolatão.

Metodologia

Inicialmente, os LEDs provenientes de lâmpaas tipo bulbo foram moídos em moinho Willey até obtenção de material passante em peneira mesh 30. Na etapa de pirólise, as amostras foram submetidas a tratamento em reator constituído por tubo de quartzo, sob atmosfera de vácuo (13,3 kPa a 5 Pa), sendo aquecidas em forno mufla horizontal (Sanchis) em temperaturas entre 800 °C e 1200 °C, com tempo de até 2h. As amostras foram caracterizadas por Fluorescência de Raios X (FRX) antes e após o tratamento de vácuo e temperatura.

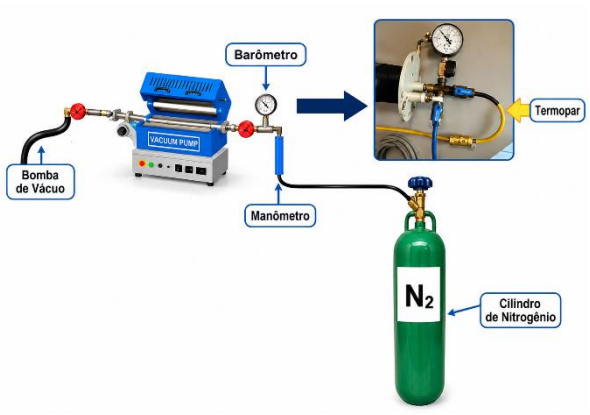


Figura 1. Conjunto de equipamentos utilizados para o processo de metalurgia a vácuo

Resultados e Discussão

A caracterização dos LEDs moídos apresentou elementos semelhantes aos identificados por Moraes et al. (2024), além de possíveis contaminações provenientes do processo de extração. Os resultados de FRX indicaram redução na concentração de elementos-traço com o aumento da temperatura. Nos ensaios preliminares, a condição de 800 °C, 13,3 kPa e 2 h indicou aumento da concentração de Ga no produto após a pirólise, associado à volatilização da fração orgânica. Já a 800 °C, 5 Pa e 1 h, foi identificada a presença de Ga no material condensado, indicando sua volatilização e posterior recuperação. Esses resultados são compatíveis com a abordagem de Zhan et al. (2018), na qual a pirólise da fração orgânica antecede a separação dos metais por metalurgia a vácuo.

Tratamento térmico	Elementos majoritários (>50%)	Menor quantidade (5% < x < 50%)	Elementos Traços (< 5%)
sem tratamento	–	Ti, Sn, Cu, Y, Fe	Pb, Ga, Ca, Ag, Zn, Ni, Si, Sr, Bi, Br, P
T = 800°C; 2h	–	Sn, Ti, Y, Fe, Cu, Pb, Ga	Nd, Ca, Ag, Zn, Si, Ni, Sr, Bi, P, Al
T= 1000 °C; 1h	–	Cu, Ti, Sn, Si, Fe, Y	Ga, Ca, Nd, P, Ag, Sr, Ni
T = 1100°C; 1h	–	Cu, Sn, Ti, Fe, Si, Y	Ga, Nd, P, Sr, Ag, Ni, Zn
T = 1200°C; 1h	–	Ti, Si, Cu, Sn, Y, Fe, Al,	Ga, Ca, Nd, Sr, Ni

Figura 2. Resultado da análise de FRX para amostras de LED com e sem pirólise em vácuo.

a)

Descrição da amostra	Elementos majoritários (>50%)	Menor quantidade (5% < x < 50%)	Elementos Traços (< 5%)
Tubo 1 ponto 1	Zn	Pb	Cu
Tubo 1 ponto 2	Pb	Zn, Bi	Cu
Tubo 1 ponto 3	–	Mg, Na	Zn, S, Cu
Tubo 2 ponto 1	Mg	–	Pb, Cu, Zn
Tubo 2 ponto 2	Mg	S	Cu
Tubo 2 ponto 3	Mg	–	Cu
Tubo 3 ponto 1	Mg	Zn	Pb, Cu
Tubo 3 ponto 2	Mg	–	Cu
Tubo 7 ponto 1	Mg	–	Pb
Tubo 7 ponto 2	Mg	S	Cu, Sn
Tubo 8 ponto 1	–	Pb, Mg, S	Bi, Ag, Sn, Cu, Zn, Fe
Tubo 8 ponto 2	Mg	Cu, Si	Pb, Sn, Mn, Bi, Ag
Tubo 8 ponto 3	Mg	Cu, Sn	Fe
Tubo 10 ponto 1	Mg	Na	Pb, Zn, Cu
Tubo 10 ponto 2	Mg	Na	Cu, Zn

b)

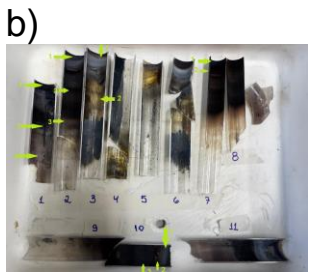


Figura 3. a) Resultado da análise de FRX para o material condensado após pirólise do LEDs. b) Material condensado no tubo quartzo após pirólise das amostras de LEDs.

Conclusões

De acordo com a teoria da metalurgia a vácuo, a redução da pressão do sistema favorece a volatilização dos materiais. Nesse contexto, pressões inferiores a 10 Pa são favoráveis à recuperação de materiais como o Ga, conforme mostrado por JI, W. et al. (2020). Entretanto, a eficiência do processo também depende das espécies químicas presentes e das condições de tratamento térmico. Zhan et al. (2018) demonstraram que os produtos gerados pela decomposição dos materiais orgânicos durante a pirólise podem interferir nas transformações químicas dos metais. A remoção das frações orgânicas da decomposição constitui um importante aspecto para otimizar a recuperação dos metais por metalurgia a vácuo.

Referências e Agradecimentos

1. ZHAN, L. et al. Recycle gallium and arsenic from GaAs-based E-wastes via pyrolysis–vacuum metallurgy separation: theory and feasibility. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 6, n. 1, p. 1336–1342, 2018.
2. JI, W. et al. A new method of recycling gallium from yellow phosphorus flue dust by vacuum thermal reduction process. Journal of Hazardous Materials, v. 400, art. 123234, 2020.
3. Moraes et al. Chemical analysis of LED bulb components: strategies for efficient recycling, *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 21, e3042, 2024.