



Reutilização de solventes eutéticos hidrofóbicos como estratégia sustentável para a recuperação de cobalto de baterias de íon-lítio descartadas

Ueslei G. Favero¹ (PG), Lunna C. Silva¹ (G), Maria C. Hespanhol^{1*} (PQ)

¹Grupo de Análise e Educação para a Sustentabilidade (GAES), Departamento de Química, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 36570-900.

*mariacarmo@ufv.br

RESUMO

RESUMO – A recuperação de cobalto a partir de baterias de íon-lítio descartadas é essencial frente à crescente demanda por esse metal crítico. Neste estudo, foi investigada a reutilização de um solvente eutético hidrofóbico (HES) na extração seletiva de cobalto, visando aumentar a sustentabilidade do processo. A reutilização do HES recuperou cerca de 75 % de cobalto mesmo após quatro ciclos. Outra abordagem foi a reutilização do HES em uma extração sequencial, onde cerca de 96 % de todo o cobalto foi extraído utilizando duas etapas no processo reduzindo drasticamente o consumo de reagentes e a geração de resíduos. Essa abordagem alinha-se aos Princípios da Química Verde, especialmente no uso renovável de solventes, prevenção de resíduos e melhoria da eficiência atômica. Os resultados indicam que a recuperação eficiente de cobalto pode ser combinada à reutilização do solvente, promovendo um processo mais limpo, econômico e ambientalmente responsável.

Palavras-chave: Mineração urbana, hidrometalurgia, economia circular, reaproveitamento de solvente.

Introdução

O crescimento acelerado do mercado de baterias de íon-lítio (LIBs), impulsionado pela demanda por veículos elétricos e dispositivos portáteis, tem gerado um volume crescente de resíduos eletroquímicos. A recuperação de metais estratégicos dessas baterias ao final de sua vida útil tornou-se essencial tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico (1). Entre esses metais, o cobalto é especialmente relevante devido à sua importância na estabilidade térmica e desempenho das LIBs, bem como por sua escassez geopolítica — com grande parte da produção concentrada na República Democrática do Congo (2). Entretanto, os métodos convencionais de recuperação de cobalto, como a pirometalurgia e a hidrometalurgia tradicional, enfrentam limitações. Eles exigem altos consumos energéticos, geram resíduos perigosos e dependem de reagentes agressivos (3). Como alternativa, uma abordagem mais sustentável baseada nos Princípios da Química Verde, é o uso de solvente eutético profundo (Deep Eutectic Solvent, DES), particularmente os hidrofóbicos. Os solventes eutéticos hidrofóbicos (HDESs) são formados pela combinação de compostos orgânicos com forte interação intermolecular, resultando em misturas com baixo ponto de fusão e propriedades únicas. Por sua baixa toxicidade, biodegradabilidade e facilidade de preparo, os HDESs têm se destacado como uma alternativa verde aos solventes orgânicos convencionais (4). Sua natureza hidrofóbica permite a extração seletiva de metais como o cobalto, sem necessidade de etapas aquosas de separação, reduzindo significativamente a geração de efluentes.

Um diferencial crítico e pouco explorado desses solventes é sua reutilização. A possibilidade de usar o mesmo HDES em múltiplos

ciclos de extração, mantendo sua eficiência, representa um avanço importante em direção a processos mais limpos e economicamente viáveis. Essa prática melhora diretamente métricas fundamentais da química verde, como o E-factor (menor geração de resíduos) e a Atom Economy, além de reduzir custos operacionais e o impacto ambiental do processo (5). Neste trabalho, investigamos a reutilização de um HDES na recuperação de cobalto de baterias de íon-lítio gastas, avaliando seu desempenho ao longo de múltiplos ciclos. A eficiência de extração, a estabilidade do solvente e sua viabilidade como insumo renovável foram analisadas à luz dos Princípios da Química Verde. A reutilização eficaz do HDES demonstrada neste estudo reforça seu potencial como ferramenta promissora no reaproveitamento de metais críticos e no avanço de tecnologias químicas mais sustentáveis.

Experimental

Preparo da mistura eutética:

A mistura eutética foi preparada utilizando proporções molares entre os componentes de 1:1 (óxido de trioctilfosfina (TOPO):ácido decanoico (ACD)). Para isso, quantidades apropriadas de TOPO e ACD foram pesadas e postas em contato sob agitação (300 rpm) a 50°C por 1 hora. Após finalização do tempo, a amostra foi resfriada e armazenada em frasco apropriado.

1ª etapa - Extração dos metais para a fase hidrofóbica:

Para a extração, o licor lixiviado contendo cobalto (9613 mg kg⁻¹), níquel (1300 mg kg⁻¹), manganês (1968 mg kg⁻¹), lítio (894 mg kg⁻¹), alumínio (341 mg kg⁻¹) e cobre (76 mg kg⁻¹) foi posto em contato

com o solvente eutético hidrofóbico mantendo a proporção A/O 1:1. O sistema foi agitado em vortex por 2 min e centrifugado a 10000 rpm por 20 min. Após centrifugação as fases foram separadas e quantificadas via espectrometria de emissão ótica com plasma induzido por microondas (MIP-OES).

2ª etapa – Re-extração dos metais para a fase aquosa e reuso do HDES:

A fim de reutilizar o solvente, a fase eutética após extração foi posta em contato com água deionizada mantendo as proporções entre as fases A/O 1:1. Agitou-se em vortex por 2 min e centrifugou-se a 10000 rpm por 20 min. Dessa forma, os metais presentes na fase eutética foram extraídos para a fase aquosa, resultando na purificação da fase, que após separação, foi posta novamente em contato com uma nova solução lixiviado para extração dos metais, sendo realizado por mais 3 ciclos. Para verificar a estabilidade da fase eutética, foram realizadas análises de espectrometria de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) do HDES inicial preparado e após cada ciclo de extração.

Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta a eficiência de extração dos elementos metálicos após cada uso da mistura eutética.

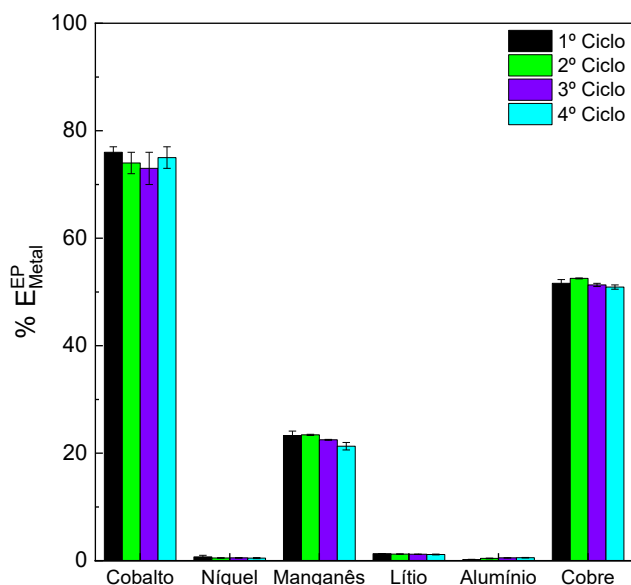


Figura 1. Eficiência de extração dos elementos metálicos em cada ciclo de reuso do HDES TOPO+ACD. Proporção A/O 1:1, T:25 °C, t:30 min.

O solvente eutético manteve sua capacidade de extração constante por pelo menos 4 ciclos completos de extração. A viabilidade da reutilização do solvente eutético hidrofóbico se deve à sua baixa solubilidade em água e à ausência de reações de degradação dos compostos formadores de HDES. Isso pode ser confirmado pela caracterização da fase após cada etapa, como mostrado na Figura 2 os espectros de FTIR não apresentam diferenças.

As bandas de absorção observadas em 2921, 2854 cm^{-1} e 1457 cm^{-1} referem-se aos modos vibracionais das cadeias alquílicas de TOPO e ACD. Essas bandas de absorção permanecem inalteradas, sem deslocamento, após cada ciclo de extração, demonstrando a estabilidade do HDES (5).

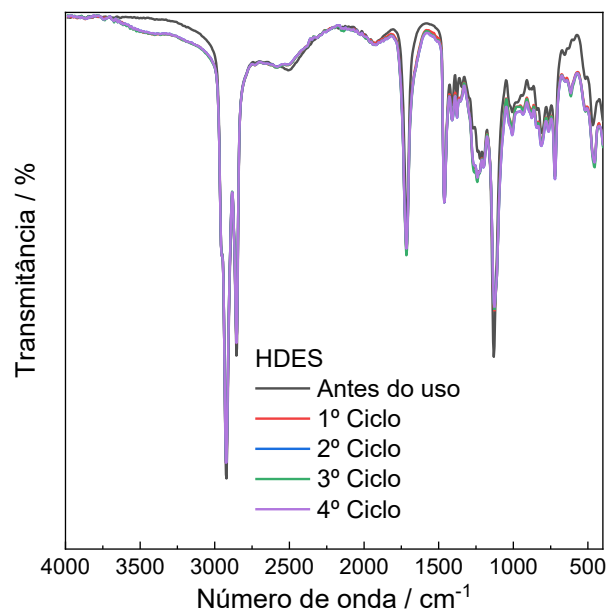


Figura 2. Espectros de FTIR do solvente eutético hidrofóbico (HDES) antes do processo de extração e após cada ciclo.

Conclusões

A estabilidade do solvente eutético hidrofóbico durante seu reuso para extração foi mantida por 4 ciclos consecutivos, indicando que este solvente é uma ótima alternativa para extrair metais de resíduos de baterias íon-Li gastas, reduzindo os custos operacionais e aumentando a viabilidade ambiental do processo.

Referências

- (1) A. P. Abbott, D. Boothby, G. Capper, D. L. Davies, R. K. Rasheed, *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, 126(29), 9142–9147.
- (2) M. Francisco, A. van den Bruinhorst, M. C. Kroon, *Angew. Chem. Int.* **2012**, 52(11), 3074–3085.
- (3) P. Meshram, B. D. Pandey, T. R. Mankhand, *Hydrometal.* **2020**, 150, 192–197.
- (4) P. T. Anastas, J. C. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press, **1998**.
- (5) K. A. Cruz, F. R. Rocha, M. C. Hespanhol, *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2024**, 12(16), 6169–6181.

Agradecimentos

PROBIC/FAPEMIG, CNPq, FAPEMIG, CAPES