

CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DE PILHAS ZINCO-CARBONO: PERSPECTIVA PARA RECUPERAÇÃO E REAPROVEITAMENTO

PRELIMINARY CHARACTERIZATION OF ZINC-CARBON BATTERIES: PERSPECTIVE FOR RECOVERY AND REUSE

Alex Henrique Moraes da Cruz

Aluno de Graduação do curso de Engenharia Química, 3º período
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Período PIBIC/CETEM: abril de 2025 a agosto de 2025
alexhmcruz@eq.ufRJ.br

Larissa Oliveira Alexandre

Orientadora, Química Industrial, M.Sc.
larissalalexandre@eq.ufRJ.br

Andrey Linhares Bezerra de Oliveira

Coorientador, Química com Atribuições Tecnológicas, D.Sc.
aloliveira@cetem.gov.br

RESUMO

As pilhas zinco-carbono, que são de uso comum e difundido em dispositivos de baixo consumo energético, tais como controles remotos e brinquedos, são compostas por metais de transição externa como: zinco, manganês, níquel e ferro. No entanto, estas pilhas mostram baixo desempenho e baixa durabilidade. Além disso, por serem pilhas primárias, sua reação interna que converte potencial químico em potencial elétrico é irreversível. Isso resulta no descarte anual de milhões de toneladas desses metais, sem reaproveitamento eficiente ou adequado. Diante dessa problemática, este estudo propõe a caracterização química preliminar de pilhas zinco-carbono em final de vida útil, com o objetivo principal de quantificar as concentrações dos metais presentes. Os resultados demonstraram a presença de quantidades significativas de metais estratégicos como zinco (17,10%) e manganês (16,81%) e também, que o zinco se concentrou majoritariamente no ânodo (49,2%), enquanto todo o manganês estava presente na pasta eletrolítica (32,8 %). Ferro e níquel se concentraram nos conectores (97,7% e 2,3%, respectivamente). Esses resultados demonstram que o desenvolvimento de uma tecnologia para automatizar o desmantelamento dos componentes da pilha seria útil para facilitar a recuperação dos elementos ferro, níquel, zinco e manganês, o que representa um passo crucial para as estratégias de economia circular.

Palavras-chave: pilhas zinco-carbono, economia circular, mineração urbana.

ABSTRACT

Zinc-carbon batteries, which are commonly used in low-energy devices such as remote controls and toys, are composed of outer transition metals including zinc, manganese, nickel, and iron. However, these batteries exhibit low performance and limited durability. In addition, as primary batteries, their internal reaction that converts chemical potential into electrical potential is irreversible, resulting in the annual disposal of millions of tons of these metals without efficient or proper reuse. Given this issue, the present study proposes the preliminary chemical characterization of end-of-life zinc-carbon batteries, with the main objective of quantifying the concentrations of the constituent metals. The results showed the presence of significant amounts of strategic metals, such as zinc (17.10%) and manganese (16.81%). Moreover, zinc was found to be mainly concentrated in the anode (49.2%), while all the manganese was located in the electrolyte paste (32.8%). Iron and nickel were predominantly found in the connectors (97.7% and 2.3%, respectively). These results demonstrate that the development of a technology to automate the dismantling of the battery components would be useful to facilitate the recovery of iron, nickel, zinc and manganese, which represents a crucial step for circular economy strategies.

and 2.3%, respectively). These findings indicate that the development of a technology to automate the disassembly of battery components would be beneficial to facilitate the recovery of iron, nickel, zinc, and manganese, representing a crucial step toward circular economy strategies.

Keywords: zinc-carbon batteries, circular economy; urban mining.

1. INTRODUÇÃO

Pilhas são dispositivos onde acontecem reações eletroquímicas que convertem o potencial químico dos reagentes em potencial elétrico. No período de 2020 a 2024 uma média anual de 622 toneladas de pilhas zinco-carbono foi acumulada no Brasil (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2025). Este dado leva em consideração apenas a diferença entre importação e exportação, sem levar em conta a produção, que não foi desprezível. Em 2023, apenas 335 toneladas foram recicladas, que permite contabilizar um acúmulo de 287 toneladas/ano no período de 2020-2024 (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2025; ABRERPI, 2025).

Dessa forma, considerando que as pilhas podem conter uma série de elementos químicos que podem ser recuperados, como o zinco e o manganês, e que a taxa de reciclagem é insuficiente, fica clara a importância da precisa caracterização química e do desenvolvimento contínuo de processos de recuperação e reciclagem dos materiais contidos nas pilhas para evitar e minimizar os riscos da lixiviação desses elementos para rios ou outras fontes de água, por exemplo.

Além disso, é importante notar que o núcleo de pesquisa de mineração urbana é um tópico emergente e que surge como essencial para o desenvolvimento de cidades sustentáveis. Essa prática tem o potencial de maximizar o volume de recursos disponíveis e o valor dos resíduos de produtos descartáveis produzidos, como no caso das pilhas primárias (ARORA et al., 2017). Por fim, um dos principais argumentos em favor do modelo de mineração urbana são os reduzidos custos e riscos com relação à mineração primária (XAVIER et al., 2023). Os autores Zeng et al. (2021) ressaltam os custos econômicos e ambientais da exploração de novas minas como argumentos a favor da mineração urbana em seu estudo.

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi realizar a caracterização química preliminar de pilhas zinco-carbono e avaliar o potencial de separação e recuperação dos metais presentes.

3. METODOLOGIA

Para esse estudo foram coletadas pilhas em final de vida útil fornecidas por servidores do CETEM. As pilhas desmanteladas e usadas para caracterização foram da marca ALFACELL todas dentro da validade. As análises descritas foram realizadas em triplicata.

O procedimento consistiu em remover manualmente o revestimento plástico, cortar a parte superior da pilha e com um alicate remover o invólucro de zinco (ânodo) da pasta eletrolítica.

Os conectores da pilha, a pasta eletrolítica e o invólucro de zinco foram separados em recipientes diferentes e pesados em balança analítica. Para a análise química de ferro, níquel e zinco por espectrometria de absorção atômica (AAS), os conectores foram digeridos com 3,5 mL de HCl 37% m/m (Merck), o invólucro de zinco foi digerido com mistura de 40 mL de HCl e com 20 mL de água deionizada (Milli-Q), ambos sob aquecimento em chapa elétrica durante 1

h. As soluções resultantes dos conectores e do invólucro de zinco foram filtradas e aferidas com água para respectivamente 100 mL e 200 mL em balão volumétrico e analisadas por AAS da marca Varian, modelo SpectrAA 50B.

A pasta eletrolítica foi seca em estufa à 60°C por 1 h, pesada e moída no almofariz de ágata. O preparo da amostra para análise química foi realizado por fusão com tetraborato de lítio em máquina da FORJ (Panalytical) a 1100°C para posterior determinação de manganês, zinco, ferro e níquel por espectrometria de fluorescência de raios-X por dispersão em comprimento de onda (WDXRF) no espectrômetro AXIOS MAX da PANalytical.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O trabalho de caracterizar pilhas é bem explorado na literatura recente, seja de pilhas zinco-carbono, alcalinas ou de lítio. Contudo, os dados de massa e concentrações não são tão uniformes, mas uma faixa de composição pode ser estabelecida servindo para pilhas secas e alcalinas com a composição de zinco entre 12% e 25% (AGOURAKIS et al., 2006) e a de MnO_2 na pasta eletrolítica entre 30% e 45% (FARZANA et al., 2018; AGOURAKIS, et al., 2006; GARCÍA et al., 2024).

Neste trabalho preliminar foram analisadas apenas pilhas das marcas ALFACELL por estarem disponíveis em maior quantidade. Durante o desmantelamento foi possível observar que as pilhas primárias de zinco-carbono possuem uma estrutura cilíndrica multicamada com o invólucro de zinco atuando como ânodo, papel poroso atuando como separador, a pasta eletrolítica de MnO_2 e a haste de grafite atuando como cátodo na parte central da pilha. A Figura 1 exemplifica os componentes da pilha desmantelada.



Figura 1: Componentes da pilha ALFACELL

A partir dos resultados de composição química obtidos por AAS e por WDXRF foi calculada a massa total dos elementos presentes nas partes analisadas das pilhas. A massa total média medida para as pilhas foi igual a 14,3218 g. A massa média de cada componente e o percentual médio de manganês, zinco, ferro e níquel são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Massa média de cada componente analisado e percentual médio de manganês, zinco, ferro e níquel (n=3).

| | Ânodo | Pasta eletrolítica | Conector |
|-----------|--------|--------------------|----------|
| Massa (g) | 3,8739 | 7,3411 | 0,3451 |
| Mn (%) | <0,1 | 32,8 | <0,1 |
| Zn (%) | 49,2 | 7,4 | 0,0038 |
| Fe (%) | <0,1 | 0,5 | 97,7 |
| Ni (%) | <0,1 | <0,1 | 2,3 |

A partir da Tabela 1 é possível observar que o somatório das massas dos conectores, pasta eletrolítica e ânodo é igual a 11,5601 g, o que equivale a 80,7% da massa total da pilha (14,3218 g). A massa do grafite (1,0962 g), que não foi analisado, representa 7,65% da massa total da pilha. Por fim, o restante da massa da pilha (1,6656 g) é composta pelo revestimento plástico e pelo separador do ânodo e catodo, também não analisados. Vale destacar que a barra de grafite não foi analisada por ser um componente puro, podendo ser reutilizada na fabricação de outras pilhas sem nenhum tipo de processamento ou purificação.

Em relação aos elementos de interesse, os dados apresentados na Tabela 1 mostram que grande parte do zinco analisado está contida no ânodo, apresentando um teor de 49,2%. Já o manganês está presente unicamente na pasta eletrolítica, apresentando um teor de 32,8%, enquanto que o conector é composto quase exclusivamente de ferro (97,7%) e níquel (2,3%), ambos na forma metálica. Tais resultados demonstram que o desenvolvimento de uma tecnologia para automatizar o desmantelamento dos componentes da pilha seria útil para facilitar a recuperação dos elementos ferro, níquel, zinco e manganês.

A Tabela 2 apresenta a massa de manganês, zinco, ferro e níquel em cada componente analisado, a massa total de cada elemento na pilha e também o percentual de cada um dos elementos em relação à pilha inteira.

Tabela 2: Massa elementar de cada componente analisado, massa total de cada elemento na pilha e percentual de cada um dos elementos em relação à pilha inteira.

| | Ânodo | Pasta eletrolítica | Conector | Massa total | % |
|---------------|-------|--------------------|----------|-------------|-------|
| Mn (g) | 0,00 | 2,41 | 0,00 | 2,41 | 16,81 |
| Zn (g) | 1,91 | 0,54 | 0,00 | 2,45 | 17,10 |
| Fe (g) | 0,00 | 0,04 | 0,34 | 0,37 | 2,61 |
| Ni (g) | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,06 |

A partir dos dados da Tabela 2 é possível perceber que os percentuais elementares na pilha inteira, calculados a partir da composição de cada componente, é igual a 16,81% para o manganês, 17,10% para o zinco e 2,61% para o ferro. Níquel por sua vez representa menos de 0,1% da pilha inteira. Considerando o percentual total de zinco e manganês nas pilhas apresentados na Tabela 2 e o total de pilhas zinco-carbono acumuladas no Brasil por ano igual a 287 toneladas, pode-se concluir que a reciclagem dessas pilhas representaria o reaproveitamento anual de 48,2 toneladas de manganês e 49,1 toneladas de zinco metálico.

A indústria siderúrgica consome uma parte significativa da produção de zinco e manganês do Brasil, principalmente para a fabricação de ligas metálicas. No entanto, devido à transição global para fontes de energia sustentáveis, a demanda por esses elementos para aplicação em baterias está aumentando. Além disso, há uma demanda crescente por manganês e zinco para aplicações agrícolas, como na produção de fertilizantes e enriquecimento de solos. Na edição de 2025, o documento “*Critical and Strategic Minerals Potential of Brazil*” reforça a importância

desses elementos para economia e manutenção da soberania nacional. Diante disso, o aproveitamento desses elementos a partir de fontes secundárias, como as pilhas, é relevante para redução de impactos ambientais causados pela mineração primária (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, 2025).

5. CONCLUSÃO

Este trabalho visou à caracterização preliminar de pilhas zinco-carbono em final de vida útil, confirmando a presença de quantidades significativas de metais estratégicos como zinco (17,10%) e manganês (16,81%). Concluiu-se também, que o zinco se concentrou majoritariamente no ânodo (49,2%), enquanto todo o manganês estava presente na pasta eletrolítica (32,8%) e o ferro e níquel se concentraram nos conectores (97,7% e 2,3%, respectivamente). Esses resultados demonstram que o desenvolvimento de uma tecnologia para automatizar o desmantelamento dos componentes da pilha seria útil para facilitar a recuperação dos elementos ferro, níquel, zinco e manganês, o que representa um passo crucial para as estratégias de economia circular.

6. AGRADECIMENTOS

Dedico agradecimentos ao meu pai, minha mãe e meu irmão por me apoiar independente do caminho que eu escolho seguir, à minha orientadora e ao coorientador Larissa Oliveira Alexandre e Andrey Linhares Bezerra de Oliveira por terem sido acolhedores e pacientes, ao CETEM por toda a estrutura e recursos e também aos meus amigos Heitor e Mariane que me deram o apoio emocional para nunca duvidar de mim e das minhas escolhas. Agradeço ao CNPq pelo apoio fundamental concedido por meio da bolsa, que viabilizou a realização deste trabalho e aprimoramento da ciência nacional.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRERPI. Quase 1.300 toneladas de pilhas e baterias foram enviadas para a reciclagem em 2023. Associação Brasileira de Reciclagem de Pilhas e Baterias, 2025. Disponível em: <www.abrerpi.org.br>. Acesso em: 22 Jul. 2025.

AGOURAKIS, D. C. et al. Comportamento de zinco e manganês de pilhas alcalinas em uma coluna de solo. Quim. Nova, vol. 29, n.º. 5, 960-964, out. 2006.

ARORA, R. et al. Potential and relevance of urban mining in the context of sustainable cities, IIMB Management Review, v. 29, 3, p 210-224, 0970-3896, set. 2017.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA. Comex Stat: estatísticas de comércio exterior. Brasília: MDIC, 2025. Disponível em: <<https://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>> Acesso em: 22 de Julho, 2025.

FARZANA, R. et al. Zinc Oxide Nanoparticles from Waste Zn-C Battery via Thermal Route: Characterization and Properties. Nanomaterials 2018, 8(9), 717, set. 2018.

GARCÍA, N.M. et al. Extraction and separation of potassium, zinc and manganese issued from spent alkaline batteries by a three-unit hydrometallurgical process. J Chem Technol Biotechnol, 99: 1553-1563, abr. 2024.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). An overview of critical and strategic minerals potential of Brazil – 2025 edition. Brasília: SGB, 2025. Disponível em: <https://sgb.gov.br/pdac/> Acesso em: 30 jul. 2025.

XAVIER, L. H. et al. A comprehensive review of urban mining and the value recovery from e-waste materials. Resources, Conservation and Recycling, v. 190, 106840, mar. 2023.

ZENG, X. et al. Comparing the costs and benefits of virgin and urban mining. J. Manag. Sci. Eng; v 7, p 98-106, mai. 2021.