

ESTUDO PRELIMINAR DE OBTENÇÃO DE POTÁSSIO ATRAVÉS DA CALCINAÇÃO ASSISTIDA POR MICRO-ONDAS

PRELIMINARY STUDY ON POTASSIUM RECOVERY VIA MICROWAVE- ASSISTED CALCINATION

Marcelo Lôbo Nogueira Santos

Aluno de Graduação de Engenharia de Materiais, 5º período

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Período PIBIC: de outubro de 2025 a agosto de 2026

marcelo.lobo2005@gmail.com

André Luiz Alvarenga Santos

Orientador, Engenheiro de Minas, D.Sc.

asantos@cetem.gov.br

RESUMO

O desenvolvimento de rotas de obtenção de potássio de minerais silicáticos pode ser uma alternativa para a crescente demanda interna de potássio no território brasileiro. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a extração de potássio do minério verdete através de calcinação assistida por micro-ondas. Foram utilizados planejamento de experimentos para avaliação das variáveis potência do micro-ondas, porcentagem de carvão e de cloreto de cálcio e tempo de exposição. O tempo e a porcentagem de cloreto de cálcio foram as variáveis mais significativas para o sistema com carvão de coco. Nesse sistema, foram obtidas extrações de até 18,9%, indicando a possibilidade de resultados promissores em condições otimizadas. Para o sistema carvão ativado os resultados variaram entre 0,7% e 65%, sendo o maior valor obtido nas condições de 70% da potência nominal (1120 W), 10 min, 50% de carvão ativado e 100% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Novos estudos serão realizados para otimizar as extrações e condições operacionais.

Palavras-chave: Verdete; extração de potássio; calcinação, aditivos.

ABSTRACT

The development of new routes to extract potassium from silicate minerals could seeks the Brazilian growing demand. In this context, this study aimed to evaluate potassium extraction from verdete ore using microwave-assisted calcination. An experimental design approach was used to evaluate microwave power, the percentages of coal and calcium chloride as additives and exposure time. The time and calcium chloride were the most significant variables for coconut coal system. Potassium extraction reaches up to 18,9% suggesting promising values under optimize conditions. In addition, potassium extraction on activated carbon system ranged from 0.7% to 65%, with the highest value achieved under the following conditions: 70% of labeled power (1120 W), 10 minutes of exposure, 50% activated carbon, and 100% $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Further studies will be conducted to optimize potassium extraction and operational conditions.

Keywords: Verdete ore; potassium extraction; calcination, additives.

1. INTRODUÇÃO

O potássio é um dos três macronutrientes essenciais para o desenvolvimento vegetal, sendo amplamente utilizado na produção de fertilizantes. Embora esteja presente em depósitos minerais, apenas uma pequena fração se encontra disponível para solubilização e absorção vegetal. A produção de sais de cloreto de potássio, obtida de depósitos evaporíticos, é a principal fonte de potássio para fertilizantes. No Brasil, os depósitos evaporíticos são insipientes para suprir a demanda nacional. Entretanto, o país possui depósitos de potássio em rochas silicáticas como os verdetes de Minas Gerais que podem se tornar uma fonte alternativa para obtenção desse nutriente.

O verdete, uma rocha silicática composta principalmente por filossilicatos e feldspatos potássicos, pode ser uma fonte de potássio. Contudo, a liberação de K desses minerais requer a ruptura das estruturas cristalinas. Estudos realizados por Guimarães (2024) indicaram a possibilidade de extração de até 87% do potássio em amostra de verdete por processo de calcinação com aditivos em temperaturas elevadas ($> 800^{\circ}\text{C}$). As altas temperaturas em que o processo ocorre representam consumo de energia significativo, entretanto é inerente ao processo.

Como alternativa às elevadas temperaturas do processo, o tratamento por micro-ondas tem se destacado por promover rápido aquecimento nos materiais. O aquecimento por micro-ondas contribui também para a formação de microfissuras nas partículas e para fusão parcial dos aditivos responsáveis pela liberação de potássio das estruturas cristalinas dos minerais.

Estudos realizados por Zhao et al. (2019) em que os autores observaram 95% de extração do potássio contido no feldspato, utilizando o micro-ondas apenas como pré-tratamento, seguido de uma etapa hidrotérmica alcalina com NaOH e CaO, a 200°C , durante 3 h. Jena et al. (2016) também obtiveram recuperações de 85% e 88% de potássio com amostra de nefelino sienito, empregando carvão ativado em micro-ondas entre 6 e 8 min. Essas diferenças de eficiência e tempo de processamento estão relacionadas não apenas à mineralogia das matérias-primas e aos aditivos empregados, mas também à capacidade dos materiais de interagir com a radiação de micro-ondas.

Os materiais, no entanto, absorvem radiação do micro-ondas de maneira diferente. Materiais absorvedores de energia, como carvões ativados, apresentam maior incremento de temperatura podendo chegar até 1000°C , enquanto minerais apresentam baixa capacidade de absorção (Jena, 2016). O uso de carvão ativado no processo pode encarecê-lo dado seu alto valor de mercado, entretanto, o carvão de biomassa, como carvão de coco pode ser uma alternativa ao uso do carvão ativado.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a extração de potássio do verdete através do tratamento do material com micro-ondas. O projeto busca avaliar também a extração utilizando duas fontes de carvão como absorvedores da radiação de micro-ondas: carvão de coco e carvão ativado.

3. METODOLOGIA

3.1. Materiais

Nos experimentos foram empregados o minério de verdete proveniente de Dolores do Indaia, como fonte de potássio. Como material absorvedor de calor foram utilizados carvão de coco, produzido por pirólise e cedido por pesquisador da UFMG, e carvão ativado convencional (CABOT). E, como aditivo para calcinação, foi utilizado cloreto de cálcio di-hidratado comercial PA (Isofar).

3.2. Caracterização dos Materiais

Amostra de verdete foi caracterizada física por técnicas química e mineralogicamente utilizando técnicas para avaliação da distribuição granulométrica (peneiramento e difração a laser). A caracterização química de verdete e carvão de coco e ativado foi realizada por fluorescência de raios X. E a caracterização mineralógica do verdete foi realizada por difração de raios X com refinamento Rietveld.

3.3. Preparações dos Ensaios

A amostra de verdete foi cominuída a seco em moinho de barras de 21,5cm x 29,2cm com 8 barras de 20mm x 20cm (diâmetro comprimento) em 76,2 rpm por 48 min. O carvão de coco foi cominuído em graal de ágata utilizando como malha de controle 106µm.

3.4. Ensaios de Calcinação

Os ensaios de calcinação foram realizados buscando avaliar a influência dos parâmetros operacionais no processo, apresentados na Tabela 1, utilizando delineamento composto central (DCC) e delineamento composto central rotacional (DCCR) de planejamento de experimentos.

Tabela 1: Parâmetros e níveis avaliados no DCC e DCCR.

Variáveis		Unidade	-1	0	+1
X1	Potência	%	50	60	70
X2	Tempo	min	6	8	10
X3	Carvão	%	30	40	50
X4	CaCl ₂ ·2H ₂ O	%	35	67,5	100

O verdete, o carvão e o cloreto de cálcio necessário para cada ensaio foram pesados em cadinho de porcelana, homogeneizados e submetidos ao tratamento com micro-ondas nas condições indicadas para cada experimento. Após o tratamento a temperatura da mistura foi medida e o material e posteriormente lixiviado com água destilada (sólido líquido 1:10) por 30 minutos a 60°C e agitação de 500rpm. O licor foi filtrado em papel de filtro faixa azul e membrana de 0,45 µm e encaminhados para análise química.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização Química, Física e Mineralógica

As amostras do verdete apresentaram redução do d₈₀ de 500 µm (inicial) para 20 µm após a cominuição. Essa redução no tamanho favorece as reações de liberação do potássio pelo aumento da área superficial. Foram observadas recuperações de 83,9% e 80,9% para granulometrias de 75 e 100 µm, respectivamente, enquanto partículas de 3.350 µm apresentaram recuperação de apenas 38,9%, resultado atribuído à maior área reativa e à melhor liberação mineral nas frações finas (Jena, 2016).

A caracterização mineralógica do verdete identificou microclina (52,7%), phengita (34,4%), illita (5,8%), ortoclásio (5,5%) e glauconita (1,6%), como portadores de potássio. Por outro lado, o quartzo (16,0%) e o anatásio (<1%) correspondem à ganga deste minério. A composição química é apresentada na Tabela 2. É possível verificar que o verdete possui 9,1% de K₂O, a amostra de carvão de coco possui também um teor de potássio que foi considerado no cálculo das extrações do processo. Ademais, o carvão ativado não apresenta composição de cinzas.

Tabela 2: Composição química do verdete e dos carvões.

Teor (%)	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	SiO ₂	TiO ₂	PPC
Verdete	16,7	na	6,9	9,1	2,5	0,1	60,4	0,9	3,3
Carvão de coco	<0,1	0,23	<0,1	2,3	0,32	<0,1	0,36	nd	94,4
Carvão ativado	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	100

Considerando o teor de potássio do verdete e os minerais constituintes é possível verificar que grande parte do potássio encontra-se associado a feldspatos potássicos (microclina - KAlSi_3O_8 - e ortoclásio - KAlSi_3O_8), sendo 42% associado a phengita ($\text{K}(\text{Al,Mg})_2(\text{OH})_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}$), illita ($(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})]$) e glauconita ($(\text{K}, \text{Na})(\text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Mg})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$).

4.2. Ensaios de Calcinação com Carvão de Coco

As extrações de potássio variaram entre 1,9 e 18,9%, entretanto, nas condições estudadas não foi possível verificar um ponto de máxima extração. A maior extração foi obtida no ensaio realizado com 70% da potência nominal do equipamento, correspondente a 1.120 W, durante 6 minutos, com adição de 50% de carvão de coco e 100% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ em relação à massa de verdete. O modelo descrito pela equação 1, com intervalo de confiança de 85%, embora apresente coeficiente de correlação reduzido (60,14%) indica que os fatores tempo de exposição e cloreto de cálcio foram os que mais afetaram o processo, seguido das interações de potência e carvão de coco.

$$Y_1 = 11,50 + 1,14x_2 + 2,64x_4 + 1,01x_1x_4 + 1,01x_3x_4 \quad (1)$$

A Figura 1 apresenta a superfície resposta para a extração de potássio e é possível observar que o aumento do tempo e da potência promovem um aumento praticamente linear da extração (Fig. 1A). Entretanto, as curvas de contorno que relacionam CaCl_2 x Potência e CaCl_2 x Carvão (Fig. 1B e 1C) sugerem que há uma curvatura indicando a possibilidade de existência de máximos.

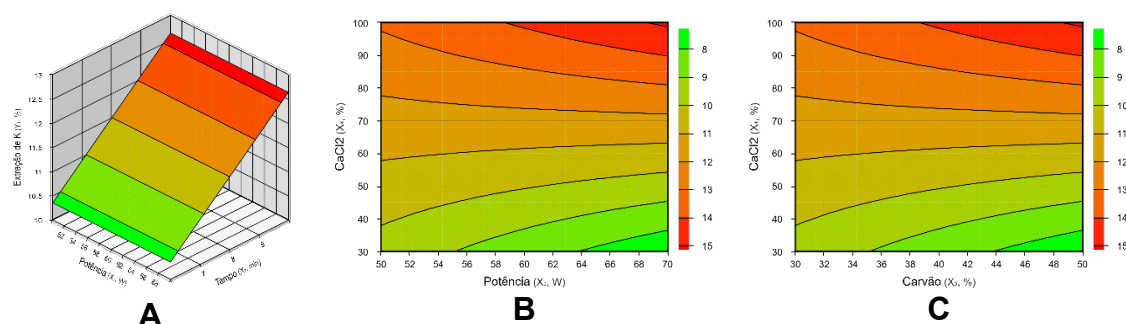
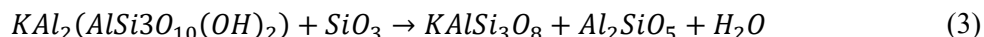
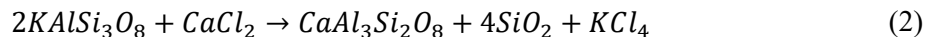


Figura 1: Superfície de resposta de extração para Tempo x Potência (A) e curvas de contorno de extração para Potência x CaCl_2 (B) e Carvão de coco x CaCl_2 (C).

Associado a esses parâmetros está o aumento da temperatura superficial da amostra resultado da absorção das micro-ondas e sua transformação em calor. Nas condições avaliadas a temperatura variou entre 85 e 127°C, sendo os maiores resultados de extração (>15%) obtidos em temperaturas superficiais da ordem de 120°C. Nessas condições observou-se que foram utilizadas maiores porcentagens de carvão e cloreto de cálcio.

Os mecanismos de reação das Equações 2 e 3, conforme descritos por Yuan et al. (2015) e Jena et al. (2019), indicam que o processo ocorre em temperaturas elevadas. A extração de potássio se baseia na difusão do cloreto de cálcio fundido (CaCl_2) e nas reações químicas do cálcio com feldspato potássico ou com feldspatos formados a partir de outros silicatos (micas). Essas transformações mineralógicas favorecem a formação de compostos solúveis de potássio e, em geral, requerem temperaturas próximas de 800 °C (Guimarães, 2024).



Embora as temperaturas superficiais não tenham atingido 800°C, temperaturas próximas a essa podem ter sido atingidas em microescala com o carvão pulverizado sendo o principal absorvedor de energia da mistura. Em algumas situações mais drásticas, foi possível observar o material ficar incandescente em certas regiões.

4.3. Ensaios de Calcinação com Carvão Ativado

Nos ensaios de calcinação com carvão ativado observou-se que a extração de potássio variou entre 0,7 e 65%, sendo o máximo obtido nas condições de 70% da potência nominal do equipamento, durante 10 minutos, com adição de 50% de carvão ativado e 100% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ em relação à massa de verdete. Em alguns ensaios, a amostra atingiu temperatura na superficial superior a 550 °C, provavelmente decorrido de a maior capacidade do carvão ativado absorver a radiação de micro-ondas. Nas mesmas condições, o carvão ativado pode produzir temperaturas locais muito superiores, favorecendo a reação entre o verdete e o CaCl_2 .

Apesar de ter obtido temperaturas e extrações superiores às de carvão de coco, não foi possível ajustar um modelo às condições experimentais. Isso pode ter ocorrido devido a necessidade de interrupção manual de alguns experimentos, causados pelo rápido aquecimento do material que levou a mistura à sua combustão.

5. CONCLUSÃO

A extração de potássio por calcinação com cloreto de cálcio assistida por micro-ondas demonstrou ser uma possibilidade para extração de potássio, no entanto, necessita de otimização. Não se verificou um ponto de máxima extração de potássio na faixa estudada com o carvão de coco, ficando as extrações próximas a 18%, e novos estudos serão realizados para otimizar as condições. A extração máxima de 65% foi obtida com o carvão ativado nas condições de 50% de carvão, 100% de cloreto de cálcio, 70% de potência (1120W) e 10 min de tratamento.

6. AGRADECIMENTO

Agradeço ao CNPq pela bolsa de iniciação científica concedida, ao CETEM/MCTI pela infraestrutura de pesquisa e ao FNDCT/CT - AGRO/FINEP (Convênio 01.22.0080.00, Ref. 1219/21) pelo suporte financeiro. Também, agradeço ao meu orientador, André pelo apoio e orientação na produção.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GUIMARÃES, Y. F. **Extração de potássio de fonte mineral alternativa visando ao uso como fertilizante**. 2024. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2024.

JENA, S. K.; DHAWAN, N.; RATH, S. S.; RAO, D. S.; DAS, B. Investigation of microwave roasting for potash extraction from nepheline syenite. **Separation and Purification Technology**, v. 161, p. 104-111, 2016.

JENA, S. K.; DASH, N.; SAMAL, A. K.; MISRA, P. K. Competency of chlorination roasting coupled water leaching process for potash recovery from K-feldspar: mechanism and kinetics aspects. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 36, p. 2060-2073, 2019.

SANTOS, W. O.; MATIELLO, E.M.; COSTA, L. M.; ABRAHÃO, W. A. P.; NOVAIS, R.F.; CATARUTTI, R. B. Thermal and chemical solubilization of verder for use as a potassium fertilizer. **International Journal of Mineral Processing**, v. 140, p. 72-78, 2015.

YUAN, B. et al. Extraction of potassium from K-feldspar via the CaCl_2 calcination route. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 23, n. 9, p. 1557-1564, 2015.

ZHAO, J.; LI, X.; MENG, J.; GE, W.; LI, W. Microwave-assisted extraction of potassium from K-feldspar in the presence of NaOH and CaO at low temperature. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, art. 275, 2019.