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

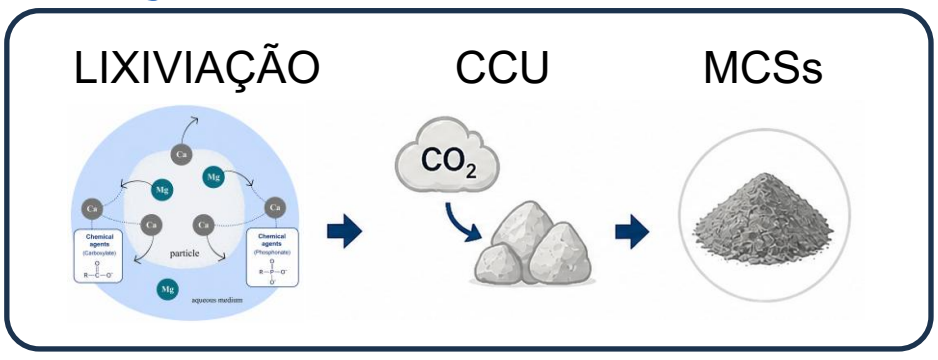
Lixiviação intensificada de metais em rejeitos de mineração para mineralização de CO_2 via ativação combinada e agentes químicos

Adinaldo Silva[1,2], Sarah Danieli[1], Vinícius Kartnaller[2], Elaine Ferreira[1], Gabriel Marins[3], Marlon Longhi[1]
[1] CIRCLUA; [2] UFRJ; [3] PETROBRAS

Introdução

As atividades de mineração geram grandes volumes de **rejeitos e estéreis**, criando desafios ambientais significativos.[1] No entanto, esses resíduos frequentemente contêm minerais portadores de cálcio e magnésio, que podem ser recuperados para a mineralização de CO_2 *ex situ*.[2] Esses elementos podem reagir com o CO_2 para formar carbonatos, os quais podem ser utilizados como materiais cimentícios suplementares (MCSs). Portanto, aumentar a disponibilidade de Ca e Mg reativos, por meio de pré-tratamentos e processos de lixiviação adequados, é fundamental para elevar a eficiência dessa abordagem.[3]

Objetivos



Avaliar os efeitos de pré-tratamentos térmicos e mecanoquímicos, combinados com diferentes agentes de lixiviação, na extração de cálcio e magnésio a partir de rejeitos de mineração.

Metodologia



Estéril de Mineração



Tratamento térmico ou Mecanoquímico (MQ)

Térmico: mufla a 800°C por 180 min

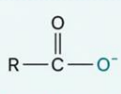
MQ1: 60 min, 600 rpm, grau de preenchimento de 1:25

MQ2: 120 min, 600 rpm, grau de preenchimento de 1:10



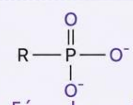
- Temperatura: **80 °C**
- Tempo de reação: **120 min**
- Razão sólido-líquido: **1:10 (m/v)**

Agente carboxilato



Fórmula geral

Agente fosfonato



Fórmula geral

Lixiviação



FRX DRX TGA



ICP OES

Caracterização

DRX: Difração de raios X
FRX: Fluorescência de raios X
TGA: Análise termogravimétrica
ICP OES: Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado

Resultados e Discussão

Pré-tratamentos

Tabela 1: Resultados de composição química da amostra antes dos tratamentos.

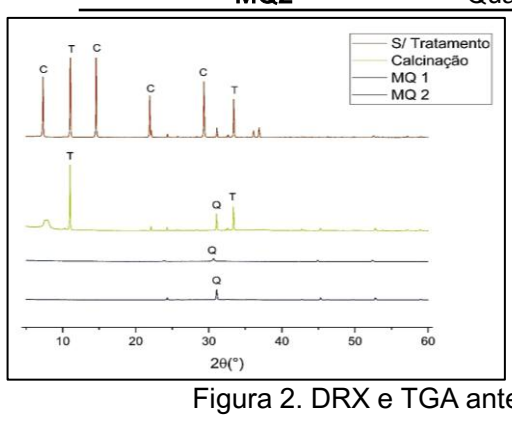
SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	Perda ao Fogo (%)
47,5	10,9	10,4	2,7	16,1	9,6



Figura 1. Amostras antes e após os tratamentos

Tabela 2. Resultados de DRX quantitativo de antes e após dos tratamentos.

	Principais Fases Mineralógicas
Sem tratamento	Clinocloro (54.9%); Talco (44,4%)
Calcinado	Talco (88,1%); Quartzo (5.6%)
MQ1	Quartzo (11,2%); Amorfo (86,8%)
MQ2	Quartzo (13,2%); Albita (5,5%); Amorfo (81,3%)



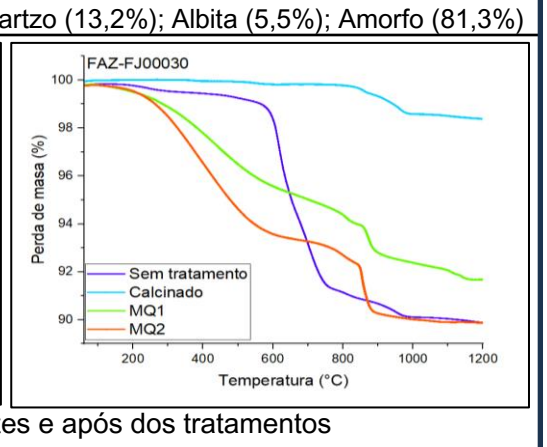


Figura 2. DRX e TGA antes e após dos tratamentos

A ativação mecanoquímica provocou mudanças mineralógicas, principalmente pela transformação do clinocloro em outras fases cristalinas e aumentando a fase amorfa, sendo muito eficazes em desorganizar a estrutura cristalina.
A TGA mostrou que, após a calcinação, praticamente não houve perda de massa durante o aquecimento, exceto após 800 °C, associada ao talco. Nas de MQ, a perda de massa começou em temperaturas mais baixas, indicando que moléculas de água permaneceram na estrutura do material de forma menos fortemente ligada.

Lixiviação

Tabela 3. Resultados de FRX, ΔM e DRX após a lixiviação com água.

	Ca (%)	ΔM (%)	Principais Fases Mineralógicas
Sem tratamento	0,16	-4,32	Talco (76,3%); Clinocloro (21,5%);
Calcinado	4,83	-6,99	Talco (99,1%); Quartzo (0,9%)
MQ1	0,09	-2,58	Amorfo (96,9%); Quartzo (2,0%)
MQ2	0,14	-3,01	Amorfo (97,4%); Quartzo (0,7%)

Tabela 4. Resultados de ICP OES da fase líquida.

Agente	Conc.	Ca	Mg	Fe	P
	g/L	mg/L			
-	-	378,25	0,08	<0,5	0,19
Carboxilato	0,01	378,75	0,01	<0,5	1,88
	0,02	353	0,01	<0,5	1,91
	2,00	607,25	0,01	<0,5	24,21
	20,00	1055,5	0,01	<0,5	233,88
Fosfonato	0,01	532	0,7	<0,5	1,56
	0,02	361,5	0,38	<0,5	1,34
	2,00	459,25	0,33	<0,5	46,48
	20,00	448,5	389,75	<0,5	1169,5

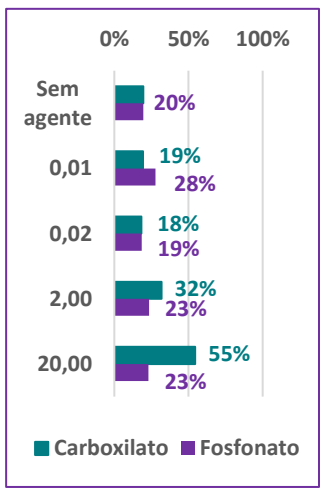


Figura 3. %Cálcio lixiviada.

Conclusões

A ativação mecanoquímica causou forte amorfização (>80%) da estrutura cristalina, enquanto a calcinação gerou transformações de fase mineral com menor amorfização. Nenhum dos tratamentos aumentou de forma significativa a liberação de cálcio na lixiviação convencional com água. Já com agentes químicos, as amostras calcinadas tiveram desempenho bem melhor: o fosfonato favoreceu a extração de Ca em baixas concentrações, e o carboxilato teve efeito dependente da concentração, chegando a 55% de extração a 20 g L^{-1}.

Referências e Agradecimentos

circlua PETROBRAS