


Emprego de CO₂ no espessamento de concentrado de espodumênio

Pedro Henrique Medeiros da Mata ^{1,2*} Adriane Aparecida de Melo ² Guilherme José Ramos Oliveira ¹ Daniela Gomes Horta ¹ 

Resumo

O CO₂ é empregado como regulador de pH em processos industriais. No entanto, sua aplicação em operações de processamento mineral em escala industrial se restringe a poucos trabalhos da literatura. Nosso objetivo foi investigar a ação de CO₂ no espessamento de concentrado de espodumênio, em comparação a um agente coagulante comercial. Os testes foram realizados em circuito industrial por meio da variação da dosagem de coagulante e vazão de CO₂ no espessador de concentrado. Durante os testes, foram coletadas amostras do *overflow* para a determinação de pH, turbidez e sólidos totais. O emprego de CO₂ gerou resultados mais satisfatórios, com menor turbidez e concentração de sólidos totais, em comparação ao coagulante. A quantidade de sólidos totais reduziu de 13400 mg/L com o coagulante para 523 mg/L com o CO₂. Isto pode significar um aumento de 83 t/mês de concentrado no *underflow* do espessador. Assim, este trabalho mostrou, de forma exploratória, a possibilidade de substituição de coagulantes por CO₂ no desaguamento de polpas em uma usina de beneficiamento de espodumênio.

Palavras-chave: Espessamento; Dióxido de carbono; CO₂; Controle de pH; Separação sólido-líquido.

Application of CO₂ in the thickening of spodumene concentrate

Abstract

CO₂ is employed as a pH regulator in industrial processes. However, its application in mineral processing operations at an industrial scale is restricted to a few works in the literature. Our objective was to investigate the use of CO₂ on the thickening of spodumene concentrate, in comparison to a commercial coagulating agent. The tests were carried out in an industrial circuit by varying the coagulant dosage and CO₂ flow rate in the concentrate thickener. For this, overflow samples were collected to determine pH, turbidity, and total solids. The use of CO₂ caused more satisfactory results, with lower turbidity and concentration of total solids, compared to the coagulant. The amount of total solids reduced from 13,400 mg/L with the coagulant to 523 mg/L with CO₂. This could mean an increase of 83 t/month of concentrate in the thickener underflow. Thus, this work showed in an exploratory way the possibility of replacing coagulants with CO₂ in the dewatering of pulps at a spodumene beneficiation plant.

Keywords: Thickening; Carbon dioxide; CO₂; pH control; Solid-liquid separation.

1 Introdução

No processamento mineral, as operações de separação sólido-líquido têm como principais objetivos a recuperação de água para recirculação, o preparo de polpas para etapas subsequentes e o desaguamento final de concentrados e rejeitos. Nas usinas de beneficiamento, o desaguamento é conduzido, principalmente, por operações unitárias de

espessamento, filtragem e ciclonagem. O volume de água empregado é elevado e, portanto, essas operações podem ser onerosas em termos de consumo de energia [1,2].

A separação entre sólidos e água, no espessamento, ocorre pela sedimentação das partículas em equipamentos chamados espessadores, onde o sólido adensado é retirado por

¹Grupo de Pesquisa em Processamento Mineral, GPPM, Núcleo de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL, Poços de Caldas, MG, Brasil.

²Departamento de Processos e P&D, AMG Brasil S.A., Nazareno, MG, Brasil.

*Autor correspondente: pedrohmata@yahoo.com.br



bombeamento pela parte inferior do equipamento, enquanto a água transborda pela parte superior e é recolhida em uma calha. Para tanto, faz-se uso de métodos de floculação e coagulação, que promovem a agregação de partículas, por meio do emprego de reagentes químicos, com consequente aceleração do processo de sedimentação [1-3].

A coagulação acontece quando partículas finas se aderem umas às outras em uma distância relativamente pequena, através da lei de atração de London-van der Waals. Este mecanismo envolve a redução da repulsão eletrostática entre as partículas, por meio da adição de pequenas quantidades de eletrólitos inorgânicos. Na floculação, por outro lado, reagentes poliméricos de cadeias médias a longas são introduzidos para estabelecer pontes de ligações entre as partículas, fazendo com que elas se agreguem. Em alguns casos, pode ser necessária a combinação de coagulantes e floculantes [1-3].

O pH da polpa é uma variável operacional que desempenha um papel importante nos processos de agregação. As espécies H^+ e OH^- atuam como íons determinantes de potencial e podem alterar a carga elétrica superficial das partículas, principalmente em polpas minerais contendo óxidos e silicatos, sendo capazes tanto inibir quanto facilitar a ação de coagulantes e floculantes. Por vezes, o controle do pH por si só já é suficiente para causar agregação das partículas. Portanto, para eficiência e bom desempenho de operações de espessamento, o uso de reguladores de pH é essencial [3].

O dióxido de carbono (CO_2) pode ser uma alternativa mais econômica e segura ao uso de produtos ácidos comumente usados para reduzir o pH de polpas [4,5]. Andrade e Athayde [5] relatam que ácidos são mais difíceis de controlar, uma vez que pequenas quantidades podem gerar grandes variações no pH, além de apresentarem maiores riscos operacionais, tais como queimaduras, problemas respiratórios e possíveis explosão, quando em contato com outras substâncias. Quando o dióxido de carbono entra em contato com a água, é produzido ácido carbônico, que ioniza e libera H^+ , conforme Equação 1 abaixo [6,7].

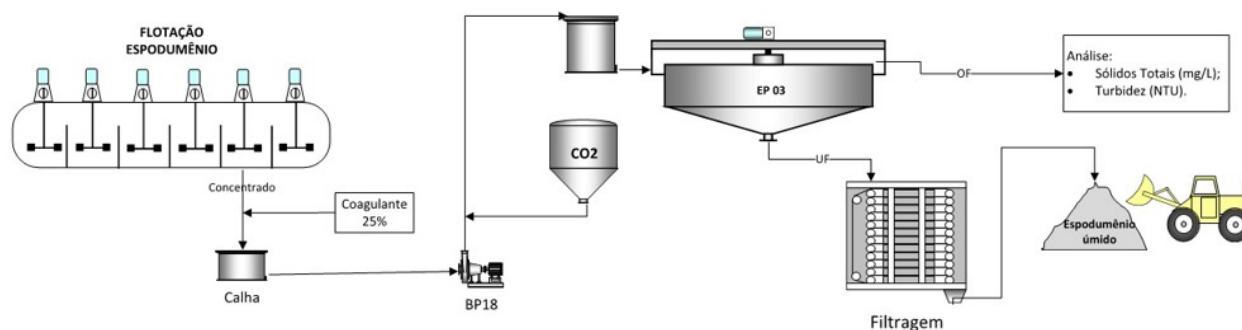
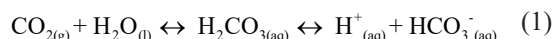


Figura 1. Fluxograma da operação de espessamento e da coleta de dados.

O emprego de CO_2 como regulador de pH tem sido reportado em várias áreas da ciência, principalmente na química e biotecnologia, em estudos envolvendo produção de biomassa, cultivo de algas e catálise verde [8-10]. No entanto, não foram encontrados na literatura vigente trabalhos que se dediquem a estudar o emprego de CO_2 como regulador de pH no espessamento de polpas de minério a nível industrial.

No campo da mineração, os trabalhos encontrados empregaram CO_2 para o aprimoramento de operações de processamento mineral, mais especificamente filtração [5] e flotação [7,11]. Andrade e Athayde [5] encontraram um aumento de 36% na taxa de filtração de concentrado de minério de ferro em filtro de disco à vácuo. De acordo com os autores, o efeito do CO_2 está relacionado à redução do pH da polpa filtrada. Freitas et al. [11] reportaram o emprego de CO_2 como gás que gera as bolhas na separação entre calcita e apatita por flotação reversa de calcita como uma alternativa viável aos reguladores inorgânicos de pH. Em um trabalho semelhante ao de flotação de calcita e apatita, Freitas et al. [7] relataram que, além de ser uma alternativa ao uso de ácidos inorgânicos, o emprego de CO_2 causa menor acúmulo de íons na água de processo, o que é vantajoso em termos de tratamento da água.

Desta forma, o objetivo do trabalho foi avaliar a possibilidade de emprego de CO_2 como redutor de pH para a agregação de partículas no espessamento de concentrado de minério de lítio. Os testes foram realizados em escala industrial, em uma planta de beneficiamento de espodumênio, variando-se a vazão de gás inserida e comparando-se com a utilização de diferentes dosagens de coagulante.

2 Materiais e métodos

A concentração do espodumênio se dá por flotação, com desaguamento inicial do concentrado por espessamento em um espessador *Outotec* do tipo *High Rate Thickener*, conforme ilustrado na Figura 1. O espessador tem 8 m de diâmetro, dimensionado de forma que atendesse uma taxa de remoção de água no *overflow* de $19 \text{ m}^3/\text{h}$ e de sólido adensado no *underflow* de 12 t/h , com vazão de alimentação de polpa de $25 \text{ m}^3/\text{h}$.

O coagulante é inserido antes de ser bombeado para o espessador, enquanto o CO₂ é injetado após a bomba. Em prática antecedente, o coagulante era dosado no tanque logo antes de entrar no espessador. Contudo, em função da pouca agitação, obtinha-se uma menor eficiência e a necessidade de maiores dosagens de coagulante. Dosando-se antes da bomba, tira-se proveito da agitação causada, promovendo maior contato do coagulante com as partículas e formação que flocos maiores e mais densos, auxiliando no processo de sedimentação. Como o CO₂ atua no sentido de reduzir o pH da polpa, a agitação do sistema não se configura como uma variável crítica.

Nos testes, variou-se a dosagem de coagulante de 97 g/t alimentada a 132 g/t alimentada, sendo este um polímero catiônico à base de PolyDADMAC. Para investigar o efeito do CO₂ na redução do pH e como coagulante, variou-se a vazão de adição entre 9,3 kg/h e 39,0 kg/h. As dosagens de reagente e vazão de CO₂ eram constantemente medidas por meio de painéis de controle de fluxo por sistemas automatizados de instrumentação e controle.

As amostras eram periodicamente coletadas no *overflow* do espessamento e submetidas a determinações de sólidos totais, turbidez e pH. A porcentagem de sólidos foi determinada medindo-se o volume da amostra e, posteriormente, realizando-se a separação do sólido por meio de decantação, filtragem e secagem. A determinação, então, era feita por meio da relação da massa de sólido seco pelo volume da amostra. As análises de turbidez foram feitas por um turbidímetro digital da marca *Akso*, modelo TU430, com um range de 0 a 1000 NTU. O pH foi medido por um pHmetro digital da marca *Digimed*, modelo DM-22, sempre cuidadosamente calibrado.

3 Resultados e discussão

Os efeitos da dosagem de coagulante e da vazão de CO₂ nos parâmetros turbidez, sólidos totais e pH estão apresentados nas Figuras 2 e 3, respectivamente. A turbidez e os sólidos totais do *overflow* reduzem tanto com o aumento da dosagem de coagulante, quanto com o aumento da vazão de CO₂. Este resultado indica que o CO₂ tem um efeito similar ao coagulante na sedimentação da polpa. Além disso, o aumento das quantidades, tanto de coagulante como de CO₂, aprimora o desempenho do espessamento, deixando uma menor quantidade de sólidos em suspensão. Na Figura 2, nota-se uma queda na quantidade de sólidos totais para a dosagem de coagulante de 106 g/t alimentada, que pode ser justificada, por exemplo, por flutuações na alimentação do espessador. No entanto, ainda é possível perceber o padrão de diminuição da quantidade de sólidos totais com o aumento da dosagem de reagente.

A sedimentação de particulados em suspensão de uma polpa de minério pode ser influenciada de várias maneiras pela adição de CO₂. A acidificação causada pela injeção de gás carbônico (Equação 1) é uma das maneiras

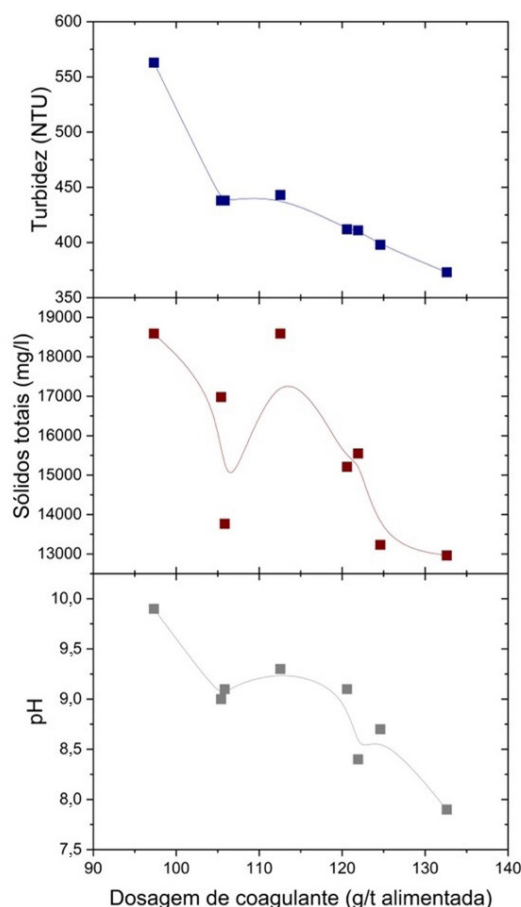


Figura 2. Variação de turbidez, sólidos totais e pH com a dosagem de coagulante.

pelas quais isso pode ocorrer e isto é evidenciado pela redução mais acentuada de pH quando o CO₂ é empregado em detrimento ao coagulante. No entanto, outros fatores podem ser considerados no efeito do CO₂ na sedimentação das partículas.

Na faixa de pH entre 4,4 e 8,4, pode haver a formação de íons solúveis de bicarbonato [5,12]. Dependendo da concentração destes íons na polpa, pode haver alteração de sua reologia, deixando-a mais ou menos viscosa. Para valores de pH mais alcalinos, a formação de íons carbonato insolúveis passa a acontecer, o que pode levar à formação de precipitados de carbonato [5,12]. Além de possibilidade de alteração da viscosidade da polpa, estes precipitados sólidos podem incorporar às partículas de minério em suspensão, tornando-as mais pesadas e propensas a sedimentar. Sendo assim, existe uma faixa de pH que otimiza os processos de agregação e sedimentação de partículas e a investigação de tais efeitos devem ser realizada em trabalhos futuros que envolvem, por exemplo, medidas de potencial zeta, velocidade de sedimentação e viscosidade.

É também importante ressaltar que a qualidade da água tem um papel importante nestes processos, uma vez que os íons existentes em sua composição podem influenciar,

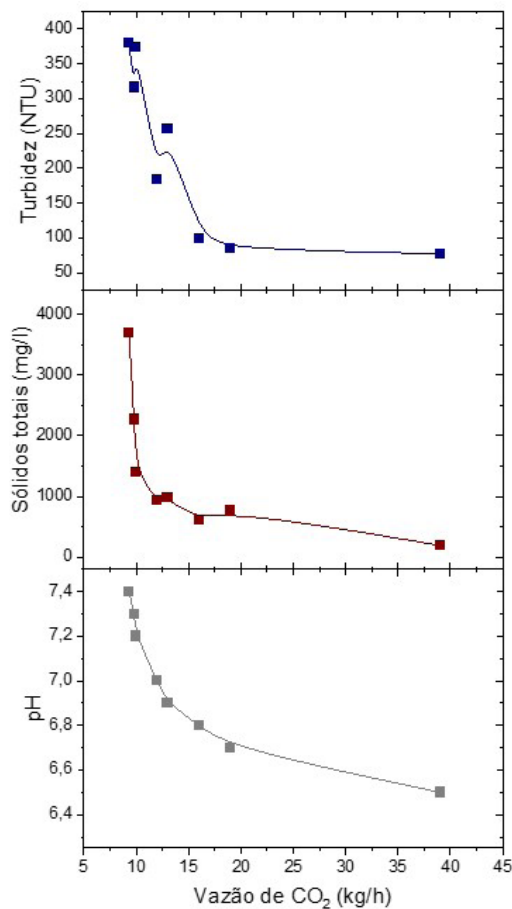


Figura 3. Variação de turbidez, sólidos totais e pH com a vazão de CO₂.

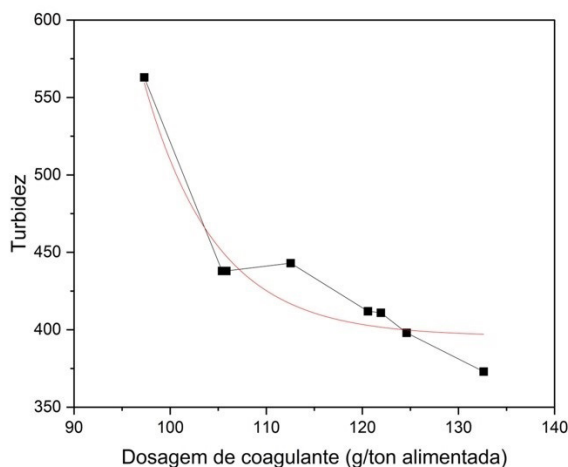
por exemplo, na ação dos reagentes e na formação de precipitados [13].

A Figura 4 compara um mesmo ajuste exponencial decrescente à curva de variação de turbidez com a dosagem de coagulante e com a vazão de CO₂. Os dados se ajustaram de forma razoável ao decrescimento exponencial, considerando os valores de R² de 0,89 e 0,88 para o coagulante e para o CO₂, respectivamente. Há uma tendência de estabilização da variação da turbidez com a dosagem do coagulante em, aproximadamente, 120g/t alimentada, e com a vazão de CO₂ em, aproximadamente, 25 kg/h. Nesta condição, que pode ser considerada ótima, os parâmetros turbidez, sólidos totais e pH aproximados estão na Tabela 1.

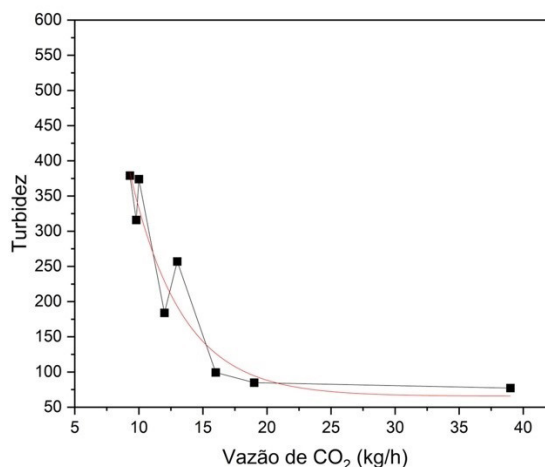
Ambas as estratégias geraram valores de turbidez inferiores à especificação da planta para o *overflow* do espessamento, que é de 600 NTU. No entanto, os valores de turbidez e sólidos totais com o emprego de CO₂ são muito inferiores em comparação ao emprego de coagulante (Figura 4 e Tabela 1). Além disso, a análise visual do espessamento indicou que a velocidade de sedimentação promovida pelo

Tabela 1. Valores aproximados dos parâmetros analisados na condição ótima de espessamento

	Coagulante	CO ₂
Dosagem	120g/t	25 kg/h
Turbidez (NTU)	404	74
Sólidos totais (mg/L)	13400	523
pH	8,4	6,6



Equação	$y = A1 \cdot \exp(-x/t1) + y0$
y0	395.71105 ± 12.37352
A1	8.10131E7 ± 3.2199E8
t1	7.42115 ± 2.25787
Adj. R-Square	0,89482



Equação	$y = A1 \cdot \exp(-x/t1) + y0$
y0	65.56401 ± 39.02711
A1	3144.44365 ± 2600.69866
t1	4.05687 ± 1.51738
Adj. R-Square	0,88113

Figura 4. Ajuste exponencial decrescente da variação da turbidez com a dosagem de coagulante e com a vazão de CO₂.

CO₂ é superior àquela promovida pelo coagulante. Assim, os resultados indicam que o CO₂ pode ser um agente promotor de sedimentação mais eficiente do que o coagulante para o desaguamento do concentrado de espodumênio.

O presente trabalho mostrou, de forma exploratória em escala de planta industrial, a possibilidade de emprego de CO₂ como alternativa a agentes coagulantes e floculantes no desaguamento de concentrado de espodumênio. Em termos práticos, nas quantidades consideradas ótimas (Tabela 1), a substituição do coagulante pelo CO₂, resultaria em um aumento de 83 t/mês de concentrado no *underflow* do espessador. Trabalhos futuros são necessárias para a compreensão mais detalhada do mecanismo de sedimentação promovido pelo CO₂, além do entendimento da viabilidade econômica do seu emprego.

4 Conclusão

Os resultados dos testes industriais de espessamento mostraram, de forma exploratória, que a sedimentação do concentrado de espodumênio promovida pelo CO₂ foi mais eficiente do que aquela causada pelo agente coagulante comercial usado na planta industrial.

Para a condição de dosagem de coagulante considerada ótima (120 g/t alimentada), a quantidade de sólidos totais no *overflow* do espessamento era de 13400 mg/L e a turbidez 404 NTU, ao passo que, considerando a condição ótima de vazão de CO₂ (25 kg/h), estes valores foram reduzidos para, respectivamente, 523 mg/L e 74 NTU. Além disso, com o uso de gás carbônico conseguiu-se uma redução maior de pH, chegando em 6,6, comparado com o valor de 8,4 quando utilizado somente o coagulante.

Este ganho indica um aumento de 83 t/mês de concentrado no *underflow* do espessador. Trabalhos futuros devem ser realizados para melhor compreender o mecanismo de atuação do CO₂ na sedimentação das partículas de espodumênio.

Agradecimentos

Agradecemos ao Curso de Especialização em Engenharia Mineral (CEEM) da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), no qual este trabalho foi executado como Trabalho de Conclusão de Curso.

Referências

- 1 Chaves AP. Teoria e prática do tratamento de minérios: desaguamento, espessamento e filtragem. 4ª ed. São Paulo: Oficina de Textos; 2013.
- 2 Wills BA, Finch JA. Wills' mineral processing technology. 8th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2016.
- 3 Baltar CAM. Agregação na separação sólido-líquido. In: Luz AB, França SCA, Braga PFA, editores. Tratamento de minérios. 6ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC; 2018.
- 4 Fu L, Ren Z, Si W, Ma Q, Huang W, Liao K, et al. Research progress on CO₂ capture and utilization technology. *Journal of CO₂ Utilization*. 2022;66:102260. <http://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102260>.
- 5 Andrade AG, Athayde M. Iron ore filtration process improvement through pH modification. *SN Applied Sciences*. 2021;3(4):433. <http://doi.org/10.1007/s42452-021-04446-2>.
- 6 Hassas BV, Miller JD. The effect of carbon dioxide and nitrogen on pyrite surface properties and flotation response. *Minerals Engineering*. 2019;144:106048. <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106048>.
- 7 Freitas AS, Matiolo E, Rodrigues RT. Flotation of calcite from apatite of a uranium-carbonate phosphate ore using carbon dioxide. *Minerals Engineering*. 2021;173:107240. <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107240>.
- 8 Przekop RE, Sztorch B, Pietrowski M, Zielinski M, Martyla A. Alumina and silica preparation via a sol-gel route with carbon dioxide as a pH regulator: a new method for green catalysis. *New Journal of Chemistry*. 2018;42(9):7060-7065. <http://doi.org/10.1039/C8NJ00865E>.
- 9 Mehar J, Shekh A, Nethravathy MU, Chauhan VS, Mudliar S. Automation of pilot-scale open raceway pond: a case study of CO₂-fed pH control on *Spirulina* biomass, protein and phycocyanin production. *Journal of CO₂ Utilization*. 2019;33:384-393. <http://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.07.006>.
- 10 Isiramen OE, Bahri PA, Moheimani NR, Vadiveloo A, Shayesteh H, Parlevliet DA. Improving pH control and carbon dioxide utilisation efficiency in microalgae cultivation systems with the use of a proportional-integral + dead-zone control strategy. *Bioresource Technology Reports*. 2022;17:100917. <http://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100917>.
- 11 Freitas AS, Matiolo E, Rodrigues RT. Effect of calcium concentration on calcite flotation from apatite using carbonic gas. *REM - International Engineering Journal*. 2020;73(2):253. <http://doi.org/10.1590/0370-44672019730063>.
- 12 Langelier WF. The analytical control of anti-corrosion water treatment. *Journal - American Water Works Association*. 1936;28(10):1500. <http://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1936.tb13785.x>.

- 13 Turrer HD, Gatti AM, Araujo A Jr, Doellinger TM, Zuchi MA, Peres AEC. Uso de coagulantes para manutenção do desempenho da filtração de minério de ferro. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. 2010;7(1-2):42-48. <http://doi.org/10.4322/tmm.00701008>.

Recebido em: 29 Out. 2023

Aceito em: 13 Maio 2024