

# Operações de desaguamento na indústria mineral

## Dewatering operations in the mineral industry

Suellen Cristina da Silva Marques dos Santos

Bolsista PCI, Eng. de Materiais, M.Sc.

Sílvia Cristina Alves França

Supervisora, Eng. Química, D. Sc.

### Resumo

Polpas de rejeitos minerais apresentam, em geral, distribuição granulométrica com partículas ultrafinas que tendem a dificultar as operações de desaguamento, demandando, conseqüentemente, por maior dosagem de reagentes coagulantes e floculantes. No presente trabalho são comparados o uso de dois polímeros floculantes, um comercial Magnafloc® 1011 e o outro a mucilagem da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* L.), um polímero natural. O ensaio de agregação foi realizado com dosagem de 120 g/t para ambos os polímeros. A filtração ocorreu em um equipamento de bancada Filtratest® (Bokela), sob queda de pressão  $\Delta p = 1$  bar, para as amostras floculadas e sem uso de reagente, para efeito comparativo. Foi observado melhor desempenho para o Magnafloc, constatando menor turbidez, maior velocidade de sedimentação e taxa unitária de filtração (TUF). Porém, para ambos os polímeros estudados verificou-se elevado teor de umidade da torta, acima de 40%, o que dificultará a disposição direta do rejeito em pilhas.

**Palavras-chave:** filtração; polímeros floculantes; palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* L.); rejeito de fosfato.

### Abstract

Mineral tailings pulps containing particle size distribution with ultrafine particles tend to make dewatering operations more difficult, consequently requiring a higher dosage of coagulating and flocculant reagents. In the present work, the use of two flocculant polymers will be compared, one commercial Magnafloc® 1011 and the other using forage cactus mucilage (*Opuntia ficus-indica* L.), a natural polymer. The aggregation test was carried out at a dosage of 120 g/t for both polymers. Filtration tests took place on a Filtratest® bench equipment (Bokela), under  $\Delta p = 1$  bar for flocculated and unflocculated (no reagents used) samples for comparative purposes. Better performance was observed for the pulp treated with Magnafloc polymer, which presented lower turbidity, higher sedimentation speed and unit filtration rate (TUF). However, for both polymers studied, there was a high moisture content in the cake, above 40%, making the direct dry disposal of tailings unfeasible.

**Keywords:** filtration; Flocculating polymers; forage cactus (*Opuntia ficus-indica* L.), phosphate tailings.

## 1. Introdução

O desenvolvimento de novas tecnologias e o estudo mais detalhado sobre as variáveis de processo envolvidas nas operações de desaguamento vem se tornando cada vez mais relevantes no setor mineral. Após rompimentos de barragens no Brasil, fez-se necessário analisar de modo mais criterioso o processo produtivo e as tecnologias utilizadas na disposição dos rejeitos por mineradoras que visam melhorias dos pontos de vista técnico, sustentável e socialmente responsável. Embora ainda exista a disposição de rejeitos em barragens, uma alternativa a este método é a disposição a seco (INSTITUTO MINERE, 2019).

A etapa de agregação de partículas é fundamental para a melhoria da eficiência das operações de desaguamento como a filtração, esta etapa é comumente descrita pelos mecanismos de coagulação e floculação. Sendo assim, a agregação tem um papel importante na operação de filtração, influenciando nos parâmetros que a descrevem, como pode ser observado na Equação 1 (FRANÇA *et al.*, 2018).

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu_f}{A(\Delta P)} \left[ \frac{\langle \alpha \rangle V \rho_f C}{A} + R_m \right] \quad (1)$$

onde  $t$  é tempo de filtração,  $V$  é o volume de filtrado,  $A$  é área de filtração,  $\Delta P$  é queda de pressão no filtro,  $\langle \alpha \rangle$  é a resistividade média da torta,  $C$  é a concentração de sólidos na polpa que alimenta o filtro e  $R_m$  é a resistência do meio filtrante.

Os estudos sobre coagulantes/floculantes naturais vêm se tornando cada vez mais promissores, devido a características como biodegradabilidade, abundância e inocuidade. Diferentes formas de obtenção destes polímeros vêm sendo estudadas, sejam por meio de microrganismos, plantas e animais, com o objetivo de correlacionar a eficiência na separação sólido-líquido, com redução de impacto ambiental e menor custo. Alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o uso da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* L.), um tipo de cacto oriundo do México, o qual foi trazido ao Brasil por portugueses no período da colonização (ABRAJAN, 2008; FARIAS, 2016). No Brasil, a Paraíba é um dos maiores produtores de palma forrageira, registrando no último Censo Agropecuário de 2017 uma produção de 356.350 toneladas de palma, ficando atrás apenas de Pernambuco (468.826 toneladas) e Bahia (1.303.149 toneladas), tornando-se um recurso indispensável na região Nordeste onde se tem períodos de secas prolongadas, local também onde se concentram pequenos produtores de minerais industriais, cujo processo de beneficiamento demanda grandes volumes de água (AUNIÃO, 2022).

No presente trabalho serão apresentados os resultados acerca da influência de agentes floculantes nas operações de espessamento e filtração, para amostras de rejeito da deslamagem de minério de fosfato, levando em consideração as variáveis envolvidas nas operações de separação sólido-líquido com base na equação de taxa unitária de filtração (TUF), com foco na disposição mais segura de rejeitos, além de possibilidade do reuso de água de processo.

## 2. Objetivos

Avaliar as variáveis envolvidas nas operações de separação sólido-líquido, com base em equações matemáticas que descrevem os processos, além de estudar os efeitos do uso de um polímero floculante comercial e outro natural, e a influência distribuição granulométrica da polpa.

## 3. Material e Métodos

### 3.1. Materiais

- Polpa de rejeito da deslamagem de processo de beneficiamento de rocha fosfática, com 6,9% de sólidos;
- Polímero floculante Magnafloc® 1011 (poliacrilamida);
- Biopolímero (mucilagem da palma forrageira);

### 3.2. Métodos

#### Higienização e extração da mucilagem da palma forrageira

As amostras de raquete de palma foram coletadas em Campina Grande – PB, durante uma visita ao Instituto Nacional do Semiárido – INSA. Estas foram então higienizadas por meio de escovação, para retirada de espinhos, e imersas em solução de hipoclorito de sódio 1% (m/v) por 10 minutos, finalizando com lavagem em água corrente (ABRAJÁN, 2008; CONTRERAS-PADILLA et al., 2015, 2016). Feita a higienização, as raquetes de palma foram cortadas em cubos de 2x2 cm, para aumentar a eficiência de extração da mucilagem; a extração foi realizada por meio de imersão em água destilada, por um período de 24 horas, na proporção mássica de 1:3 (biomassa/água), à temperatura ambiente. Posteriormente a solução foi filtrada em funil de Buchner, com o auxílio de uma bomba de vácuo; o filtrado foi pesado com a finalidade de se obter o rendimento da mucilagem extraída.

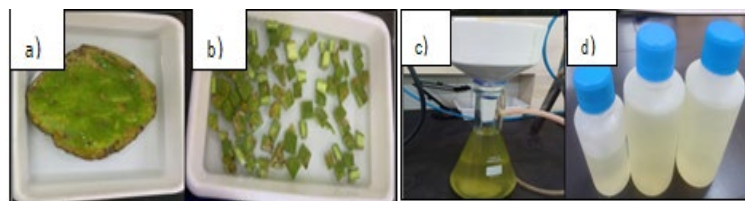


Figura 1. a) cladódio de palma; b) cladódio em cubos imersos em água destilada; c) obtenção da mucilagem por filtragem; d) acondicionamento da mucilagem em frascos de amostras

#### Ensaio de floculação em *Jartest* e sedimentação

Os ensaios de agregação foram realizados em *Jartes* utilizando-se o polímero Magnafloc® 1011e a mucilagem da palma, com dosagem de 120 g/t. Estes ensaios ocorreram da seguinte forma: adicionou-se a solução

polimérica à polpa, sob agitação de 300 rpm ao longo de 1 minuto, e posteriormente a rotação foi reduzida para 150 rpm, até completar 3 minutos de ensaio.

Para a sedimentação foi utilizado um espessador de pasta formado por dois tubos de acrílico ( $H = 0,5$  m e  $D_{in} = 8,4$  cm), acoplados por flange, com oitos pontos de amostragem distribuídos uniformemente ao longo do tubo, e um cone com angulação de  $45^\circ$ , para facilitar a remoção do material. Este foi utilizado para espessar as amostras floculadas com o Magnafloc® 1011 e com a mucilagem de palma; cada polpa floculada foi mantida em repouso por uma hora, após este intervalo de tempo as polpas espessadas foram amostradas para ensaios de filtragem e caracterização reológica; já para o sobrenadante foram retiradas alíquotas de 80 mL, para medição de turbidez e condutividade elétrica.

#### Ensaio de filtragem em *Filtratest*

Em um equipamento *Filtratest*® Bokela foram feitos os ensaios de filtragem à pressão aproximada de 1 bar. Levando em consideração o baixo teor de sólidos da polpa, estipulou-se a quantidade de 80 mL de amostra de polpa espessada, e um tempo total de filtragem de 120 s. Após a filtragem, o teor de umidade da torta formada foi determinado por secagem em estufa a  $100^\circ\text{C}$ .

#### 4. Resultados e Discussão

Nesta sessão serão apresentados e discutidos os resultados referentes ao rejeito da deslamagem (ultrafino) de fosfato sem reagente (branco), rejeito fino de fosfato floculado com Magnafloc® 1011 (Rej.Ultrafino\_Mag120g/t) e rejeito fino de fosfato floculado com mucilagem de palma (Rej.Ultrafino\_Palma120g/t). Com base em estudos prévios utilizando também dosagens de 60 e 80 g/t, no presente trabalho serão apresentados os resultados referentes às amostras floculadas com dosagem de 120 g/t, por apresentar maior potencialidade para a aplicação da mucilagem de palma. É importante salientar que para a metodologia utilizada neste trabalho, para a extração da mucilagem foi possível obter um rendimento de 58% em massa.

#### Distribuição granulométrica do rejeito

Por meio da caracterização granulométrica da polpa de rejeito da deslamagem, mais de 90% das partículas têm granulometria abaixo de  $37\ \mu\text{m}$  (400 *mesh*), como apresentado na Figura 2.

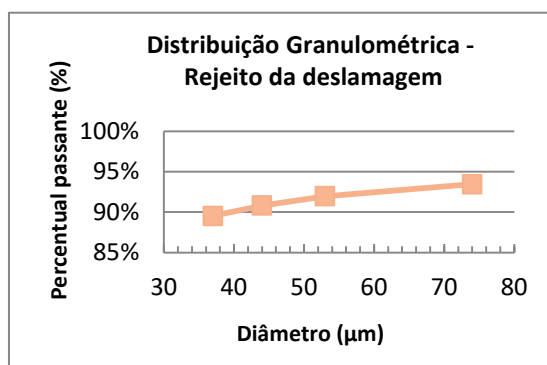


Figura 2. Curva de distribuição granulométrica do rejeito da deslamagem de minério de fosfato.

Para a fração granulométrica abaixo de 37  $\mu\text{m}$  (400 *mesh*), a distribuição de tamanho de partículas foi determinada pela técnica de difração a laser, no equipamento Mastersizer 2000, Malvern e apresentou os seguintes diâmetros equivalentes:  $D(0,1)=1,31 \mu\text{m}$ ,  $D(0,5)=6,71 \mu\text{m}$  e  $D(0,9)=29,23 \mu\text{m}$ .

A distribuição granulométrica é um dos fatores de maior influência para a determinação da eficiência e custo dos processos de separação sólido-líquido. A presença de partículas finas ou ultrafinas dificulta a separação sólido-líquido devido a área superficial específica. Em caso de polpas minerais como a estudada, onde se tem  $D(0,5)$  abaixo de 10  $\mu\text{m}$ , o processo de separação sólido-líquido sofre grande influência do efeito de dispersão das partículas, devido ao movimento browniano, e conseqüentemente dificultando a sedimentação destas partículas em suspensão. Grande quantidade de partículas finas e ultrafinas também afetará o processo de filtração, tendendo a reduzir as taxas de filtração e promovendo um acúmulo de umidade indesejada nas tortas formadas. Sendo assim, torna-se necessário um pré-tratamento do material por meio do uso de coagulantes e floculantes (FRANÇA *et al.*, 2018).

### **Ensaio de floculação em *Jartest* e espessamento da polpa**

Para os ensaios de agregação foram coletadas alíquotas de 2L de rejeito da deslamagem, em duplicata para cada polímero floculante, com teor de sólidos de 6,9%, e em pH natural da polpa em torno de 8,0. Neste ensaio utilizou-se como polímeros floculantes Magnafloc® 1011 e mucilagem de palma com dosagem de 120 g/t, além do ensaio do rejeito sem a presença de reagentes. Posterior à floculação, realizou-se o espessamento das amostras, deixando-as em repouso por 60 minutos.

A velocidade de sedimentação se mostrou mais acentuada para a amostra contendo Magnafloc® 1011 (6,0 cm/min) frente aos ensaios com a mucilagem da palma (1,8 cm/min) e com a polpa natural (0,49 cm/min). O uso do floculante comercial Magnafloc® 1011 implicou em um aumento de 12 vezes a velocidade, frente ao ensaio sem floculante; já a mucilagem de palma promoveu um aumento de 4 vezes. Porém, como apresentado na Figura 3, o rejeito estudado possui 90% de partículas sólidas ultrafinas em sua composição, ou seja, trazendo maior dificuldade para promover a separação sólido-líquido, como pode ser observada na Figura 4 a presença de partículas em suspensão no sobrenadante nas três condições operacionais avaliadas, e para o material espessado, verificou-se teores de sólidos equivalentes a 13,4, 18,9 e 35,6% para as amostras sem reagente, a contendo mucilagem de palma e a contendo Magnafloc1011, respectivamente.

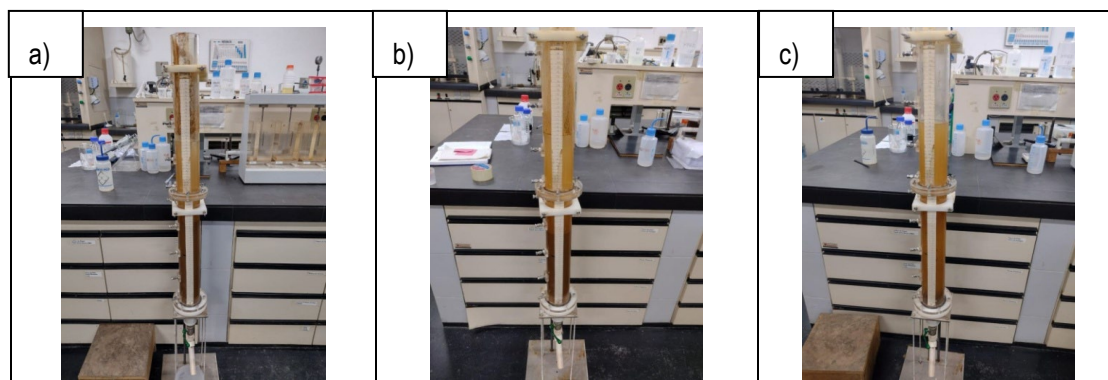


Figura 3. Rejeito de deslamagem após 1h de sedimentação: a) polpa natural  $C_{su}=13,4\%$ ; b) polpa flocculada com mucilagem da palma  $C_{su}=18,9\%$ ; c) polpa flocculada com Magnafloc 1011  $C_{su}=35,6\%$ .

A polpa estudada apresenta pH em torno de 8,0, e segundo Otálora *et al.* (2022), no estudo da flocculação com a mucilagem de palma para tratamento de água de esgoto, foi observada maior eficiência de remoção de turbidez para  $pH=13$ . Este fato sugere a necessidade de uma investigação de flocculação em diferentes condições de pH, com a finalidade de constatar a melhor interação entre mucilagem e partículas sólidas.

Com base na Tabela 1, é possível destacar alguns pontos, como o aumento da condutividade do sobrenadante após a flocculação com a mucilagem. Segundo Santos *et al.* (2023), a mucilagem da palma contém em sua composição sais de cálcio e ferro, indicando a possibilidade da dissociação dos mesmos no sobrenadante. Além disso, observa-se uma redução significativa da turbidez em 65,6% e 40,3% com o uso do Magnafloc1011 e a mucilagem da palma, respectivamente.

Tabela 1. Valores de teor de sólidos, turbidez e condutividade dos sobrenadantes referentes as três amostras analisadas.

Amostra	% sólidos (espessado)	Turbidez sobrenadante (NTU)	pH (sobrenadante)	Condutividade sobrenadante ( $\mu S/cm$ )
Polpa natural (branco)	13,40	160,67	7,95	860
Rej.Ultrafino_Mag120g/t	35,60	55,23	7,70	816,9
Rej.Ultrafino_Palm120g/t	18,90	95,9	7,66	931,1

O potencial uso da mucilagem da palma como flocculante pode estar associado à ação da pectina (ácido poligalacturônico) que, a partir de sua estrutura (Figura 4a), favorece interações químicas durante o processo de flocculação, além de possuir uma cadeia aniônica, levando à formação de ligações com os cátions presentes no efluente industrial, ocasionando a remoção dos mesmos (THEODORO *et al.*, 2015; YIN, 2010). Com o auxílio da caracterização por infravermelho (Figura 4b) analisada em uma faixa de comprimento de onda entre  $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ , foi possível identificar algumas bandas características da mucilagem de palma, associadas à presença de pectina, como o grupamento O-H, assim como as ligações N-H e C=O associadas ao Magnafloc1011, uma poliacrilamida (SANTOS *et al.*, 2023).

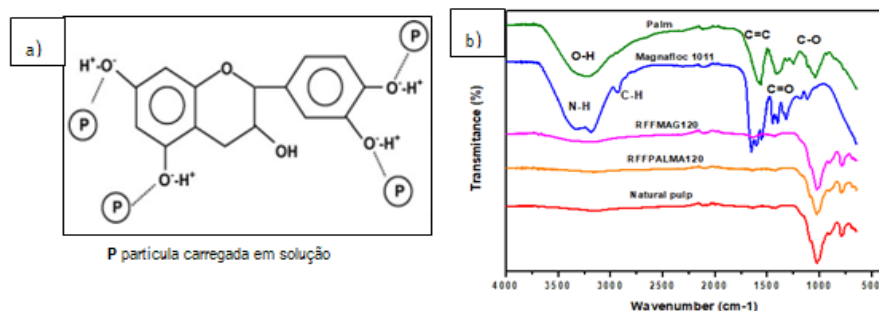


Figura 4. a) Representação esquemática da estrutura básica da pectina em solução aquosa e possíveis interações moleculares (Adaptado YIN, 2010); b) espectros de infravermelho para as amostras de mucilagem da palma, magnafloc1011, rejeitos floculados e polpa natural

### Ensaio de filtragem em *Filtratest*

As alíquotas em triplicata de 80 mL coletadas do material espessado foram submetidas à filtragem no equipamento *Filtratest*@Bokela, considerando um tempo total de filtragem de 120 s para estudos iniciais, e posteriormente estudar a influência da variação do tempo de filtragem. Foram medidas a turbidez e a condutividade do filtrado, além de teor de umidade da torta e calculada a taxa unitária de filtragem (TUF) (Tabela 2).

Na Tabela 2 é possível observar que apesar do elevado teor de umidade, o filtrado para todas as amostras apresentaram potencial para reuso, com redução de turbidez em 83% e 49% para as amostras contendo Magnafloc® 1011 e palma respectivamente.

Como evidenciado na Figura 2, a polpa é composta por mais de 90% de partículas abaixo de 37 µm (400 mesh), podendo gerar um aumento na resistência do meio filtrante, já que a presença de partículas finas pode ocasionar a colmatação do tecido.

Tabela 2. Valores de teor de sólidos, turbidez e condutividade dos filtrados referentes às três amostras analisadas.

Amostra	Turbidez do filtrado (NTU)	Condutividade (µS/cm)	Teor de umidade da torta (%)	TUF (t/m <sup>2</sup> /h)	Rm (kg/m <sup>2</sup> )
Polpa natural (branco)	95,67	815,63	63,33	0,20	4,38E+11
Rej.Ultrafino_Mag120g/t	16,40	800,65	49,26	0,63	4,43E+9
Rej.Ultrafino_Palm120g/t	49,17	849,4	43,15	0,14	1,75E+11

Na Figura 5 é possível visualizar que não houve formação de torta para as amostras sem floculante e a floculada com a mucilagem, além de aparente colmatação do meio filtrante, indicando que a eficiência de agregação foi muito baixa. Apenas para a amostra contendo Magnafloc® 1011 houve formação de torta, mas como evidenciado anteriormente, o seu elevado teor de umidade indica aprisionamento de água na estrutura dos flocos.

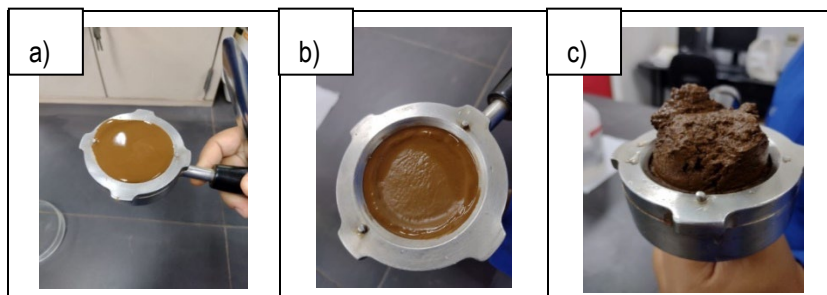


Figura 5. Rejeito de deslamagem após filtragem: a) polpa natural; b) polpa floculada com mucilagem da palma; c) polpa floculada com Magnafloc 1011.

## 5. Conclusão

Evidentemente a filtrabilidade do rejeito está associada às suas características de distribuição granulométrica, uma vez que a presença de partículas finas e ultrafinas tende a colmatar o meio filtrante. Ainda que o polímero comercial tenha apresentado maior redução de turbidez, velocidade de sedimentação e taxa unitária de filtragem (TUF) frente ao uso do polímero natural, o primeiro também apresentou elevado teor de umidade, acima de 40%, ou seja, indicando o aprisionamento de moléculas de água na estrutura dos flocos formados, e assim inviabilizando a disposição direta do rejeito. Além disso, a mucilagem mostrou a potencialidade de sua aplicação para o tratamento de rejeitos minerais por apresentar uma redução em 40% de turbidez do sobrenadante após espessamento, e uma redução em torno de 50% de turbidez do filtrado. Futuramente serão avaliados outros tipos de polímeros naturais, além de caracterizações da mucilagem da palma para investigar com maior detalhamento da interação química entre os polímeros naturais e diferentes tipos de rejeitos minerais.

## 6. Agradecimentos

Agradeço ao MCTI pela concessão da bolsa por meio do programa PCI/CETEM/MCTI; à supervisora Sílvia França e ao auxílio dos bolsistas Beatriz Teixeira e Neanderson Galvão, assim como ao CETEM pela infraestrutura. “Ao Instituto Nacional do Semiárido (INSA) pela parceria no projeto Diagnóstico sobre tecnologias de reuso de água na mineração” e ao MCTI, pelo apoio financeiro a este projeto.

## 7. Referências Bibliográficas

- CONTRERAS-PADILLA, M. et al. **Characterization of crystalline structures in Opuntia ficus-indica**. Journal of Biological Physics, v. 41, n. 1, p. 99-112, 2015.
- FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. **Separação sólido-líquido**. In: **Tratamento de minérios**. 6.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap.14, p.597-647.
- SANTOS, S.C.S.M; FRANÇA, S.C.A.; GALVÃO, N.; BATISTA, B.T. **Estudo sobre impacto do uso de diferentes polímeros floculantes nas variáveis de processo do desaguamento**. 22º Simpósio de Mineração. v. 22. n.22 (2023).
- THEODORO, J. D. P.; LENZ, G. F.; ZARA, R. F.; BERGAMASCO, R. **Coagulants and natural polymers: perspectives for the treatment of water**. Plastic and Polymer Technology, n. 3, v. 2, p. 55-62, 2013.
- YIN, C. **Emerging usage of plant based coagulants for water and wastewater treatment**. Process Biochemistry, v. 45, 2010.