

## INFLUÊNCIA DA AGREGAÇÃO DE PARTÍCULAS NO DESAGUAMENTO DE REJEITOS MINERAIS

Bruna Câmara Trampus<sup>1</sup>  
Sílvia Cristina Alves França<sup>2</sup>  
Guilherme Campos Moreira<sup>3</sup>

### Resumo

A disposição segura de rejeitos minerais é um grande desafio do setor rumo à maior sustentabilidade. O objetivo deste trabalho foi estudar o desaguamento do rejeito do beneficiamento de minério de ferro com o intuito de melhorar a eficiência das operações de separação sólido-líquido, como a agregação e espessamento, e consequentemente, a estabilidade para disposição em barragens de rejeitos. Para tanto, fez-se uso do polímero Magnafloc 5250 como floculante, variando a dosagem até 120 g/t; a eficiência da separação sólido-líquido foi analisada por meio das medidas de velocidade de sedimentação e turbidez do sobrenadante, e a consistência do sedimento, por ensaios reológicos com a geometria *Vane* e por meio de ensaios de abatimento. O rejeito espessado foi submetido a ensaios de filtragem, avaliando a influência dos polímeros floculantes na taxa unitária de filtragem (TUF) e umidade final da torta. Os resultados mostram que o polímero é eficiente na agregação/sedimentação das partículas, produzindo rejeitos espessados com elevada consistência e, reduções significativas no tempo de filtragem para produção de tortas, sendo uma alternativa mais segura para a disposição ambiental.

**Palavras-chave:** Rejeito de mineração; Polímero floculante; Desaguamento; Disposição.

## INFLUENCE OF PARTICLE AGGREGATION ON MINERAL TAILINGS DEWATERING

### Abstract

The safe disposal of mineral tailings is a major challenge for the sector towards greater sustainability. The objective of this work was to study the dewatering of iron ore tailings in order to improve the efficiency of solid-liquid separation operations, such as aggregation and thickening, and consequently, the stability for disposal in tailings dams or dry stacking areas. For this purpose, the polymer Magnafloc<sup>®</sup> 5250 was used as a flocculant, varying the dosage up to 120 g/t; the efficiency of solid-liquid separation was analyzed by means of measurements of sedimentation velocity and turbidity of the supernatant, and the consistency of the sediment, by rheological tests with the *Vane* geometry and slump tests. The thickened tailing was subjected to filtration tests, evaluating the influence of flocculant polymers on the unit filtration rate (TUF) and final moisture content of the cake. The results show that the polymer is efficient in the aggregation/sedimentation of particles, producing thickened tailings with high consistency and significant reductions in filtration time for cake production, being safer for environmental disposal.

**Keywords:** Mineral tailings; Flocculants; Dewatering; Disposal.

<sup>1</sup> Eng<sup>ª</sup>. Química, M.Sc, Doutoranda, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Eng<sup>ª</sup>. Química, D.Sc, Tecnol. Sênior, Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>3</sup> Eng. Químico, B.Sc, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento dos rejeitos minerais é um dos grandes desafios do setor para a sustentabilidade da atividade de mineração, devido ao elevado volume de água contido e à necessidade de técnicas de disposição diferentes das utilizadas em barragens de rejeitos convencionais. A disposição adequada de rejeitos deve considerar, idealmente, a minimização da água contida, por meio de operações de desaguamento – espessamento e/ou filtragem - cada vez mais eficientes.

Técnicas de agregação de partículas, como a coagulação e a floculação, são utilizadas, a fim de aumentar a eficiência das operações de separação sólido-líquido e melhorar a eficácia do desaguamento, visando não somente a fase sólida com menor umidade, mas também a recuperação de água de processo. Diversas variáveis como pH da polpa, reagentes utilizados, distribuição granulométrica e porcentagem de sólidos influenciam na agregação das partículas e formação dos flocos e, por consequência, na separação sólido-líquido [1, 2]. O pH afeta a carga superficial das partículas sólidas, a ionização do polímero utilizado e as forças atrativas ou repulsivas para aglomeração das partículas [1, 3, 4]. A granulometria interfere diretamente na sedimentação, pois a velocidade de sedimentação é função direta do diâmetro da partícula, assim a presença de partículas de granulometria fina e coloidais dificulta o processo de separação sólido-líquido [2, 3]. O tipo de polímero utilizado como floculante influencia na interação polímero-partícula, e as características do polímero, na densidade dos flocos formados, na maior ou menor captura de água intraflocular, com influência direta na sedimentação [2, 3, 4, 5].

A caracterização reológica de rejeitos espessados é uma ferramenta essencial para avaliar as formas possíveis de disposição, em função da sua estabilidade. Os fatores químicos, físicos e interfaciais influenciam na formação dos flocos e, por consequência, nas propriedades reológicas do material espessado, como viscosidade e a tensão limite de escoamento ( $\tau_0$ ) [1, 2]. Portanto, tais fatores são cada vez mais explorados para potencializar a produção de rejeitos minerais espessados e pastosos. Os rejeitos espessados de alta densidade têm como vantagens o baixo teor de umidade, a natureza homogênea e a ausência de segregação de partículas, sendo denominados pastas [2]. As pastas são fluidos não newtonianos e geralmente apresentam comportamento fluido de Bingham, com baixa tensão de escoamento (mínimo de 200 Pa) e características pseudoplásticas [1, 2].

A aplicação de desidratação de rejeitos para atingir alta consistência requer incentivos econômicos significativos e oferece importantes benefícios ambientais. A economia de água, diminuição do volume de rejeitos dispostos e, conseqüentemente, redução da área necessária para armazenamento, são algumas das vantagens da tecnologia de pastas [1, 2]. Além da tecnologia da produção de pastas, no contexto de operações unitárias, a filtragem é amplamente empregada para produção de material com baixa umidade. O termo filtragem refere-se à separação de fases sólida e líquida ao conduzir a mistura (polpa) através de uma barreira, denominada meio filtrante [6]. A filtragem visa, não somente a geração de produtos com elevada concentração de sólidos, para transporte ou descarte, mas também a recuperação de água de processo [6]. As partículas finas têm elevada influência na eficiência da filtragem devido ao seu tamanho reduzido, cargas de superfície e o elevado valor de área superficial, tornando a separação das fases difícil e extremamente lenta, o que pode, em alguns casos, inviabilizar o uso da operação unitária em processos industriais [6,7]. Assim, a agregação das partículas

por coagulação/floculação é essencial para a filtração, uma vez que potencializa a separação sólido-líquido, levando à produção de tortas com baixo teor de umidade, além de recuperação de água com baixa turbidez, passível de reutilização no processo [6,7].

Nesse contexto, esse estudo avaliou o desaguamento de rejeito mineral, por meio da influência de um polímero floculante na agregação das partículas da polpa e no comportamento reológico dos produtos desaguados (rejeito espessado e torta), visando obter máxima taxa de sedimentação, elevada tensão limite de escoamento e a produção de tortas de filtração com baixos teores de umidade, além de mínima turbidez do sobrenadante, a fim de maximizar os benefícios ambientais com o reuso de água industrial e disposição de rejeitos adensados/pastosos, ou tortas.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Material e Métodos

#### 2.1.1 Caracterização do material

Utilizou-se uma polpa de rejeito de minério de ferro proveniente de uma usina de beneficiamento localizada no estado de Minas Gerais – Brasil. A polpa do rejeito de minério de ferro foi submetida a ensaios de agregação, floculação e sedimentação, utilizando como floculante o polímero Magnafloc 5250, fabricado pela Basf™, devido à eficiência na agregação das partículas finas do rejeito de minério de ferro observada em estudos anteriores [8].

O rejeito estudado foi caracterizado em termos de concentração inicial de sólidos ( $C_0$ ), pH, distribuição granulométrica e densidade de carga superficial. A análise granulométrica do rejeito foi realizada por peneiramento a úmido em série de peneiras Tyler, e por espalhamento de luz no equipamento Mastersize 2000 – Malvern. As densidades de carga superficial do rejeito e do polímero foram determinadas no equipamento Zetasizer nano series – Malvern.

#### 2.1.2 Sedimentação descontínua

As polpas foram floculadas em equipamento *jartest* (modelo Nova Ética 218-6), de acordo com o planejamento de experimentos apresentado na Tabela 1, com triplicata no ponto central para a determinação do erro experimental. A solução polimérica foi adicionada à polpa em suspensão, sob agitação de 300 rpm (número de Camp=33.000) por 1 min, seguida por agitação lenta, a 150 rpm (número de Camp = 21.600), por 2 min, para promover a mistura adequada e crescimento dos flocos, respectivamente.

**Tabela 1.** Plano experimental fatorial completo a cinco níveis e uma variável

	- 2	- 1	0	+ 1	+ 2
<b>Dosagem de polímero (g/t)</b>	0	30	60	90	120

O estudo da velocidade de sedimentação ( $V_{sed}$ ) foi realizado em um espessador de pastas, altura 8 vezes o diâmetro conforme apresentado na Figura 1. Para tanto, após a etapa de floculação no *jartest*, 4 L de polpa floculada foram vertidos para o espessador, permitindo medições de altura da interface sólido-líquido em relação ao tempo. O espessador é formado por dois tubo 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°, para facilitar a remoção do material espessado, Figura 1.

O ensaio foi realizado durante 5h, e nos tempos de 1h e 3h, alíquotas do sobrenadante foram coletadas em triplicata e analisadas em termos de pH, turbidez e condutividade, em phmetro Digimed DM-22, turbidímetro Hach modelo 2100P e condutivímetro MS Tecnonon mCA-150, respectivamente.

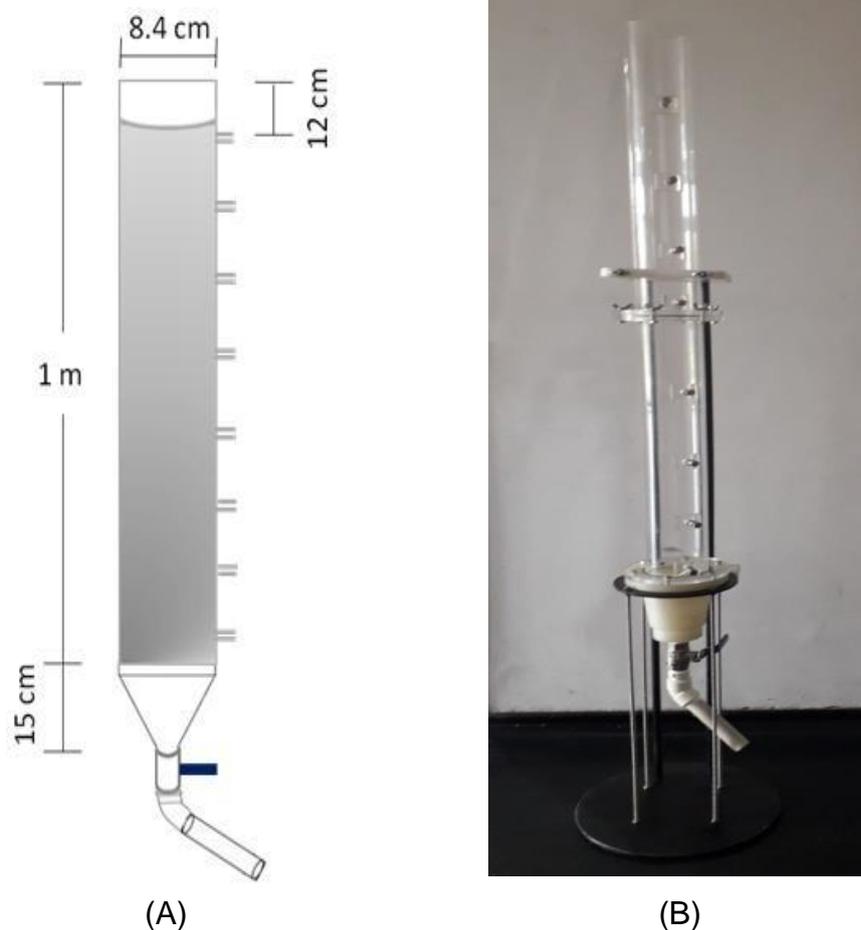


Figura 1. Espessador de pasta. (A) Esquema; (B) Fotografia.

### 2.1.3 Caracterização dos rejeitos espessados

Ao término da etapa de sedimentação, o *underflow* foi coletado para análise de consistência segundo ensaios de abatimento (*slump test*) e reológicos. O teste de abatimento é utilizado para determinar a consistência de polpas minerais [9, 10, 11]. O procedimento experimental adotado para determinação do percentual de abatimento (%ABT) é o mesmo relatado em estudos anteriores [11], utilizando-se um cilindro de PVC, com  $H = D_{in} = 2$  in.

A  $\tau_0$  (tensão mínima de escoamento) foi determinada utilizando-se o reômetro RheoStress 1 da Haake, e o rotor Vane. A metodologia experimental foi baseada em estudos anteriores [1, 2, 9], nos quais foi observado que a utilização do rotor Vane para determinação da  $\tau_0$  é aplicável às polpas minerais, pois minimiza os efeitos de sedimentação e deslizamento das partículas. Nesse estudo, a  $\tau_0$  foi obtida

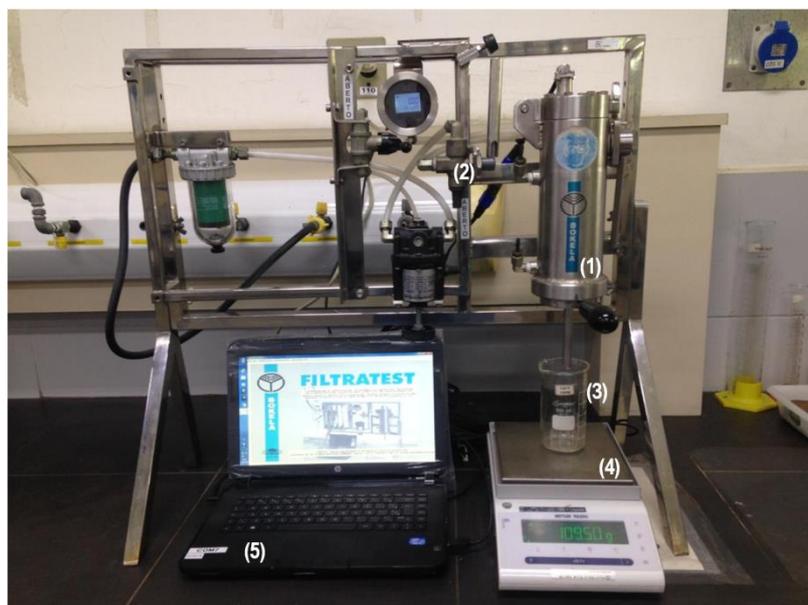
por duas técnicas: método direto, impondo-se uma baixa rotação constante, e por regressão, com base nos dados da curva de fluxo. No método direto, a tensão é avaliada em função do tempo, atingindo um valor de máximo, que é quando o material escoar, correspondendo a  $\tau_0$ . O ajuste dos dados da curva de fluxo foi realizado pelo modelo de Herschel-Bulkley (Equação 1).

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

No procedimento experimental, primeiramente, a  $\tau_0$  do sedimento foi analisada aplicando uma deformação constante de 1 rpm por 300 s, sendo referida como  $\tau_0$  estática. Após isso, o sedimento foi submetido a uma taxa de cisalhamento constante de  $100 \text{ s}^{-1}$ , por um período de 300 s, a fim de destruir a estrutura dos flocos e liberar a água contida. Esse sedimento tem seu ponto de fluidez referido como  $\tau_0$  dinâmica, e foi analisado por duas formas distintas: a primeira igual à anterior, e posteriormente, realizou-se uma curva de fluxo variando a taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) de 100 a  $0,01 \text{ s}^{-1}$ , com 10 pontos por década, e um intervalo máximo de 5 min por ponto. A concentração de sólidos dos sedimentos ( $C_{\text{sed}}$ ) foi determinada com a balança de umidade Ohaus MB23.

#### 2.1.4 Ensaios de Filtragem

O rejeito espessado, obtido para cada dosagem de floculante estudada, foi submetido à operação de filtragem em equipamento Filtratest® (Figura 2), fabricado pela Bokela, com área de filtragem fixa de  $19,63 \text{ cm}^2$  ( $19,63 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ). Como parâmetros operacionais foram utilizados um valor de queda de pressão ( $\Delta p$ ) de 1 bar e o meio filtrante 4520-T, multifilamentado, termofixado e de polipropileno (Remae).



**Figura 2.** Montagem do equipamento Filtratest® com o compartimento de filtragem (1), alimentação de ar comprimido (2), recipiente de coleta de filtrado (3), balança (4) e computador com software para aquisição de dados (5).

Para os ensaios de filtração, mesmo com o plano experimental fatorial completo a cinco níveis e uma variável, apresentado na Tabela 1, os experimentos foram realizados em triplicata, para cada sedimento avaliado.

Assumindo como hipóteses uma pressão positiva constante na polpa e a incompressibilidade da torta, é possível utilizar um modelo matemático para caracterizar a influência da pressão aplicada, da resistência do meio filtrante e da resistividade da torta na vazão de filtrado, conforme Equação 2:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu\alpha C_s}{A^2(-\Delta p)} V + \frac{\mu}{A(-\Delta p)} R_m \quad (2)$$

onde,  $dt/dV$  é o inverso da variação de volume de filtrado ao longo do tempo ( $s/m^3$ ),  $A$  é a área do filtro ( $m^2$ ),  $\Delta P$  é a queda de pressão (Pa),  $\mu$  é a viscosidade do filtrado (Pa.s),  $\alpha$  é a resistência específica da torta (m/kg),  $C_s$  é a concentração de sólidos ( $kg/m^3$ ) e  $R_m$  é a resistência ao meio filtrante ( $kg/m^2$ ).

A integração e a divisão pelo volume, possibilitam obter uma equação em função volume de filtrado ( $m^3$ ) e o tempo (s), conforme representado na Equação 3. Assim, é possível elaborar um gráfico de  $t/V$  versus  $V$  obtendo-se uma reta, com coeficiente angular  $\frac{K_p}{2}$  (Equação 4) e com coeficiente linear  $B$  (Equação 5).

$$\frac{t}{V} = \frac{K_p}{2} V + B \quad (3)$$

Sendo:

$$\frac{K_p}{2} = \frac{\mu\alpha C_s}{A^2(-\Delta p)} \quad (4) \text{ e } B = \frac{\mu}{A(-\Delta p)} R_m \quad (5)$$

Para medir a produtividade da operação da filtração foi utilizado a Taxa Unitária de Filtração, ou TUF ( $\frac{m^2}{h}$ ) (Equação 6), consistindo na massa produzida (massa seca) em relação à área filtrante.

$$TUF = \frac{M_s}{(A \times F_e) \times \frac{3600}{t}} \times 10^{-3} \quad (6)$$

#### 2.1 4. Resultados e discussão

A polpa do rejeito de minério de ferro utilizada apresentou concentração inicial média de sólidos de  $36,3 \pm 0,13\%$  (p/p), pH 6,5-7 e  $d(0,9) = 0,027$  mm, sendo composto majoritariamente por partículas ultrafinas. O gráfico apresentado na Figura 3-A exibe os resultados de carga superficial resultante para o rejeito e o floculante estudados. Com relação ao rejeito, observa-se que em pH natural (pH 6,5-7) apresenta elevada densidade de carga aniônica, causando forte repulsão eletrostática entre as partículas sólidas, que em associação ao pequeno diâmetro, dificulta o processo de sedimentação natural e a separação sólido-líquido para produção dos rejeitos espessados [3]. A base do polímero Magnafloc 5250 é poliácridamida aniônica com elevado peso molecular, e conforme pode ser observado na Figura 3-A, na faixa de pH natural, a densidade de cargas aniônicas do polímero é superior a do rejeito. Assim, o mecanismo de agregação prioritário das partículas com o floculante

estudado é por formação de pontes, o qual ocorre com polímeros de alto peso molecular e mesma carga elétrica das partículas [3, 5].

Na Figura 3-B observa-se que após a etapa de sedimentação, a utilização do floculante resultou em até 92% de redução da turbidez do sobrenadante, em comparação a polpa natural, sem floculante. Observa-se, ainda, que apesar da utilização do floculante proporcionar acentuada redução da turbidez do sobrenadante, destaca-se que em todos os casos a turbidez ficou acima de 100 NTU (unidade nefelométrica de turbidez) e condutividade na faixa de 720 a 780  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Sendo assim, em termos de condutividade turbidez, o sobrenadante não atende ao padrão de qualidade estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005[12] para reuso/descarte da água, fazendo necessário o tratamento desse efluente. Conforme destacado em estudos anteriores [8], o  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  apresentou elevada eficiência na coagulação das partículas finas do rejeito de minério de ferro, podendo ser utilizado como etapa adicional a fim de alcançar a qualidade do sobrenadante para reuso/descarte.

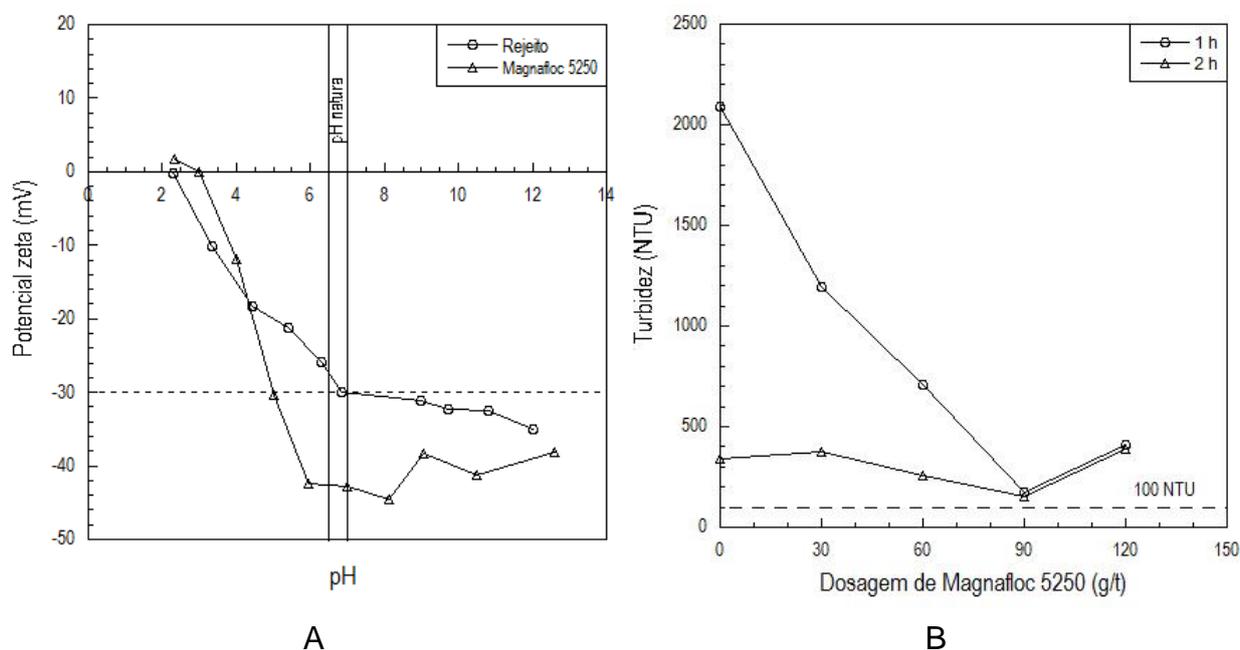


Figura 3.(A) potencial zeta dos materiais; (B) Turbidez após 1 e 3h de sedimentação.

Os valores da  $V_{\text{sed}}$  para a polpa do rejeito natural (sem floculante) e após floculação são apresentados na Tabela 2. Observa-se que, em comparação à polpa sem floculante, mesmo com a menor dosagem de polímero (30 g/t) estudada já foi observado aumento significativo da  $V_{\text{sed}}$ (400%).

Tabela 2. Dados de velocidade de sedimentação

Dosagem do floculante (g/t)	0	30	60	90	120
$V_{\text{sed}}$ (m/s)	$1,1 \times 10^{-5}$	$5,4 \times 10^{-5}$	$8,4 \times 10^{-5}$	$49,4 \times 10^{-5}$	$758,2 \times 10^{-5}$

Os resultados de  $V_{\text{sed}}$  e turbidez se reforçam, uma vez que quanto maior a  $V_{\text{sed}}$ , menor a turbidez do sobrenadante, indicando que quanto maior a dosagem do polímero, melhora a agregação das partículas e a separação sólido-líquido, por consequência. Contudo, destaca-se que para a dosagem de 120 g/t de polímero ocorreu o aumento da turbidez do sobrenadante, em comparação com a dosagem

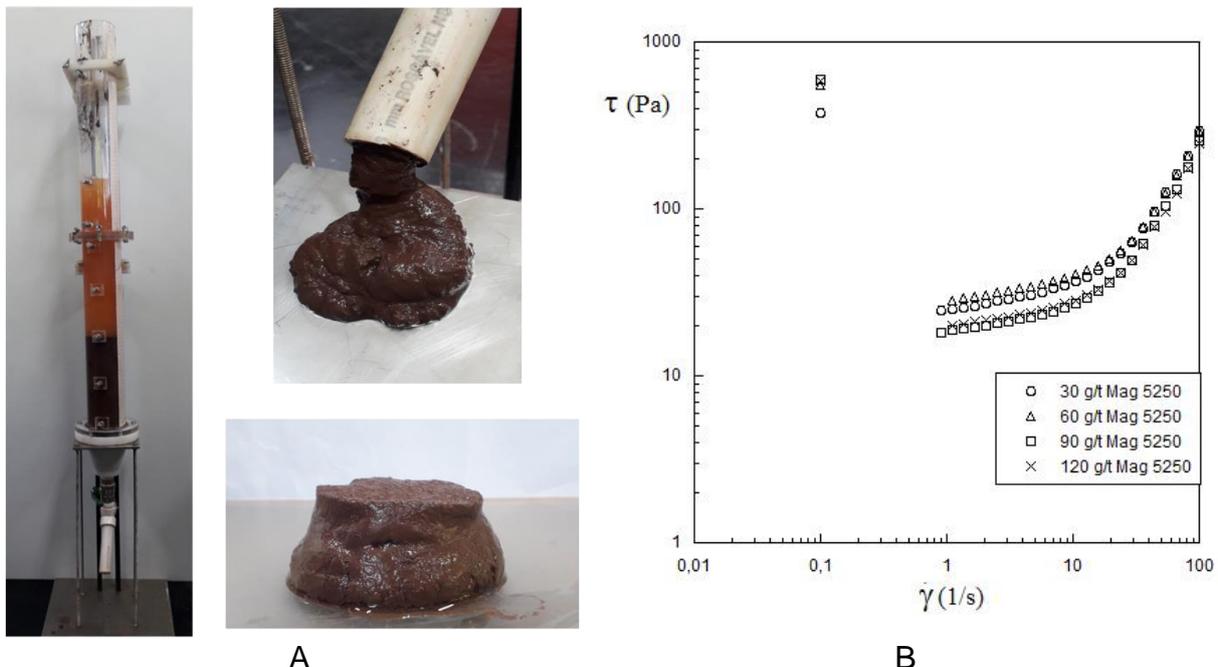
anterior, ou seja, a elevada densidade de carga aniônica promove o aumento da repulsão eletrostática entre as partículas finas, prejudicando a clarificação do sobrenadante [3], apesar de proporcionar elevado aumento da  $V_{sed}$ . Analisando os resultados em termos de  $V_{sed}$  e turbidez do sobrenadante, a dosagem de 90 g/t é considerada a ideal, pois alcança elevados valores de  $V_{sed}$ , e os menores valores de turbidez do sobrenadante mesmo após apenas 1h de sedimentação.

A Tabela 3 apresenta os dados da caracterização do rejeito espessado, exibindo a influência da adição do flocculante no espessamento/consistência do sedimento, ou seja, o aumento da dosagem do flocculante proporciona a formação de sedimentos mais consistentes, i. e., menor %ABT e maior  $\tau_0$  estática. Contudo, destaca-se que a consistência dos sedimentos obtidos com 60, 90 e 120 g/t do flocculante foi similar.

**Tabela 3.** Dados obtidos após 5h de sedimentação/compactação.

Dosagem do flocculante (g/t)	$H_{sed}$ (cm)	$C_{sed}$ (% p/p)	%ABT	$\tau_0$ estática (Pa)
0	40	-	-	-
30	20,5	64,3	43,7	373
60	22,9	63	37,6	550
90	23,1	59	38,2	600
120	23,8	60	38,0	580

A Figura 4-A exibe o teste de sedimentação para o rejeito flocculado com 120 g/t de polímero, realçando a consistência do sedimento no underflow, e, além disso, expõe a ilustração do teste de abatimento nesse ponto experimental. Com relação aos ensaios reológicos, a Figura 4-B exibe os valores de  $\tau_0$  estática, pontos únicos relatados na Tabela 3, e  $\tau_0$  dinâmica, curva fluxo, para os sedimentos flocculados e espessados, evidenciando a dependência da tensão limite de escoamento, estática e dinâmica, com a dosagem do flocculante [8,11].

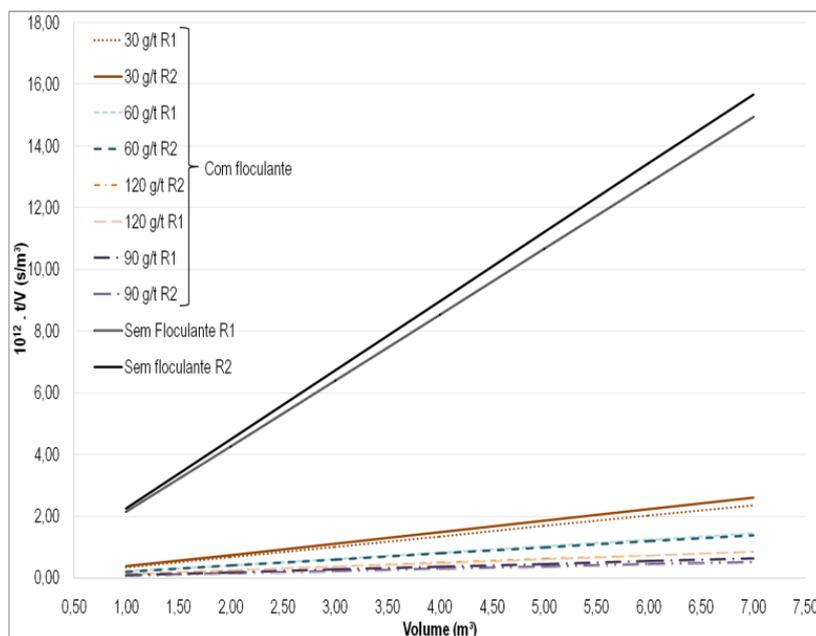


**Figura 4.** Ensaios com o rejeito de minério de ferro. (A) Espessamento e teste de abatimento (120 g/t Mag 5250); (B)  $\tau_0$  estática, pontos isolados, e  $\tau_0$  dinâmica, curvas de escoamento, variando a dosagem de polímero.

É possível observar que a adição de floculante à polpa gera elevação da  $\tau_0$  estática, porém os valores são similares para as dosagens de 60, 90 e 120 g/t. Destaca-se, ainda, que essas maiores dosagens proporcionaram maior altura do sedimento no espessador, em comparação com 30 g/t, ou seja, apesar de inicialmente serem rejeitos mais consistentes, os flocos formados são maiores e com maior acúmulo de água intraflocular, gerando menores concentrações e  $\tau_0$  dinâmica, tensões de escoamento após a quebra dos flocos formados, (Figura 4-B).

O processo de floculação estudado mostrou-se eficiente na agregação das partículas do rejeito, formando sedimentos consistentes, porém ainda com grande quantidade de água, cerca de 40 % conforme destacado na Tabela 3. A água presente no sedimento, intraflocular e extraflocular, pode ainda ser removida antes da disposição por meio da filtragem.

Os resultados da filtragem são apresentados nas curvas exibidas na Figura 5. A adição de Magnafloc 5250 à polpa mineral aumenta a filtrabilidade do rejeito, mostrando que para um mesmo volume de rejeito espessado, aquele sem floculante, necessita de um tempo 4 vezes maior para filtrar, em comparação ao rejeito com a menor dosagem de floculante. A eficiência da filtragem acompanha diretamente o aumento da dosagem de floculante. Contudo, o rejeito floculado com 120 g/t de polímero apresenta uma inversão de tendência na curva de filtragem, possivelmente, devido ao floco formado apresentar um maior volume, logo uma maior quantidade de moléculas de água aprisionadas na sua estrutura, o que diminui a eficiência de separação sólido-líquido.



**Figura 5.** Curvas de filtragem para rejeitos espessados de minério de ferro com e sem floculante.

Por meio destas curvas foi possível obter os coeficientes das retas e determinar a resistência específica da torta e do meio filtrante ( $R_m$ ) para cada condição avaliada. A média dos parâmetros obtidos para a operação de filtragem, umidade da torta e turbidez do filtrado são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Parâmetros obtidos nos ensaios de filtragem com polímero floculante.

Dosagem do floculante (g/t)	$C_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha \times 10^{11}$ (m/kg)	$R_m \times 10^{11}$ (kg/m <sup>2</sup> )	Umidade da torta (p/p, %)	Turbidez filtrado (NTU)
	765	24,41 ± 0,56	11,53 ± 1,26	12	6770
30	629	4,81 ± 0,35	3,56 ± 2,94	18	311
60	632	2,73 ± 0,11	4,71 ± 1,00	18	74
90	628	1,11 ± 0,18	7,01 ± 0,39	18	291
120	611	1,70 ± 0,04	6,41 ± 0,28	20	63

Utilizando as variáveis de umidade da torta e turbidez do filtrado, apresentados na Tabela 4, podemos notar que a torta do rejeito de minério de ferro obtida sem floculante apresenta a menor umidade, porém o filtrado possui uma turbidez de 6770 NTU; para as dosagens de 30 e 120 g/t, os valores de turbidez do filtrado foram de 311 e 63 NTU, respectivamente, evidenciando a influência positiva do polímero nesta variável operacional.

Os ensaios com 30, 60 e 90 g/t apresentaram valores iguais de umidade na torta, porém distinguem-se ao comparar a turbidez do filtrado obtido. Esta apresenta uma tendência de diminuição, conforme a dosagem do floculante aumenta, indicando uma melhor agregação. Para a torta formada com adição de 120 g/t de polímero, obtiveram-se maiores valores de umidade quando comparada às outras dosagens, o que pode estar relacionado à maior quantidade de moléculas de água aprisionadas no floco e maior viscosidade do filtrado, devido à maior quantidade de polímero adicionado. Já o baixo valor de turbidez demonstra que a agregação das partículas foi mais eficiente.

A taxa unitária de filtragem (TUF) foi calculada utilizando as variáveis descritas na Equação 6 e seu resultado foi apresentado na Tabela 5. Observa-se que a utilização do polímero floculante acarreta no aumento da TUF, quando comparado ao sem floculante, porém a TUF diminuí conforme a dosagem de floculante aumenta. Isto ocorre em função do aumento da viscosidade do filtrado devido à presença de maior concentração do floculante; além disso, tem influência no aumento da resistência do meio filtrante ( $R_m$ ), evidenciado na Tabela 4.

**Tabela 5.** Taxa unitária de filtragem e tempo de desaguamento para estudo da influência da concentração do polímero Magnafloc 5250 na filtragem.

Dosagem do Floculante (g/t)	Taxa Unitária de Filtragem (t/m <sup>2</sup> /h)	Desaguamento para etapa de filtragem (%)
0	0,35 ± 0,06	46
30	1,38 ± 0,52	51
60	1,00 ± 0,14	51
90	0,73 ± 0,18	52
120	0,85 ± 0,35	49

### 3 CONCLUSÃO

O polímero floculante utilizado apresentou elevada eficiência na agregação das partículas do rejeito de minério de ferro, promovendo aumento expressivo da  $V_{sed}$  e até 92% de redução da turbidez do sobrenadante, em comparação com a sedimentação da polpa natural. Este processo se mostrou eficiente para desaguar o rejeito, formando sedimentos com elevada tensão limite de escoamento e reduzidos % ABT. Observou-se também que o aumento da dosagem de floculante para valores acima de 60 g/t não alterou as características do sedimento espessado. O sedimento apresenta elevada consistência, contudo ainda possui certa de 40 % de água, intra e extraflocular, sendo, portanto, encaminhado para filtração, visando maior remoção de água. A eficiência da etapa de filtração está intimamente ligada à presença de partículas finas, influenciando no tempo de filtração e na turbidez do filtrado. A adição do polímero floculante causa redução expressiva no tempo de filtração e aumento na qualidade do filtrado obtido. A etapa de filtração foi responsável pelo desaguamento médio de cerca de 50% da água contida no rejeito espessado. A torta obtida no ensaio sem floculante apresentou menor umidade (12%), porém o tempo necessário para filtração chega a ser 4 vezes maior que o tempo de filtração do rejeito floculado com a menor dosagem de polímero estudada, 30 g/t. Em termos de TUF, com o uso da menor dosagem de polímero obteve-se um aumento de 0,35 para 1,38 t/m<sup>2</sup>.h, ou seja, 300%. Assim, avaliando todos os parâmetros da filtração, tempo de filtração, taxa unitária de filtração (TUF), umidade da torta e turbidez do filtrado, o melhor equilíbrio nos resultados foi alcançado com a dosagem de 60 g/t do polímero Magnafloc 5250 na floculação. Este equilíbrio possibilita a aplicação de uma dosagem média de floculante que removerá cerca de 50% da água contida no rejeito espessado na etapa de filtração, num tempo 3 vezes menor do que para o desaguamento da polpa sem floculante. Assim, os dados de filtração e caracterização do rejeito espessado corroboram para a dosagem ótima de 60 g/t de polímero, a fim de alcançar uma alternativa para o descarte do rejeito de minério de ferro, considerando o desenvolvimento sustentável das atividades de mineração, seja como sedimento espessado/pasta, ou torta de filtração.

Além disso, em testes futuros, é importante avaliar a estabilidade geotécnica do material filtrado, a fim de avaliar a estabilidade e manuseio das pilhas, corroborando com os resultados discutidos e apresentados nesse trabalho para a definição da melhor dosagem de floculante.

### Agradecimentos

Ao CETEM e coordenadores de laboratórios (Laboratório de Superfícies Nanoestruturadas; Laboratório de Separação Sólido-Líquido) pela infraestrutura, à supervisora Sílvia França, aos companheiros de laboratório e à empresa BASF disponibilização da amostra de floculante.

### REFERÊNCIAS

- 1 BOGER, D.V. Rheology of Slurries and Environmental Impacts in the Mining Industry. The Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, 2013;v.(4):239-257.

- 2 SOFRÁ, F., BOGER, D.V., Rheology for thickened tailings and paste – history, state-of-the-art and future directions. Proceedings of Paste 2011. Perth, Australia.2011: 121-133.
- 3 BALTAR, CAM. Agregação na Separação Sólido-Líquido.Tratamento de Minérios. 6 ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Centro de Tecnologia Mineral, 2018, p. 513-545.
- 4 CHEN, H.T.; RAVISHANKAR, S.A.; FARINATO, R.S. Rational polymer design for solid-liquid separations in mineral processing applications. International Journal of Mineral Processing.2003;v.(72):75-86.
- 5 GREGORY, J; BARANY, S. Adsorption and flocculation by polymers and polymer mixtures. Advances in Colloid and Interface Science. 2011;v.(169):1–12.
- 6 QI, Y., THAPA, K. B., HOADLEY, A.F.A. Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties –A review. In: Chemical Engineering Journal. 2011; v.(58):373 – 384.
- 7 GONÇALVES, A.A.G., GADELHA, T.S. e FRANÇA, S.C.A. Avaliação operacional da filtração de rejeitos floculados. XXIV Jornada de Iniciação Científica do CETEM, CETEM/MCTIC, Rio de Janeiro, 2016.
- 8 TRAMPUS, B.C., MOURA, C.P.C., FRANÇA, S.C.A. Estudo da agregação de partículas de rejeitos de minério de ferro visando a melhoria do desaguamento. XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; Belo Horizonte - MG, 2019.
- 9 BOGER, D.V. Rheology and the resource industries. Chemical Engineering Science. 2009; v.(64):4525–4536.
- 10 CLAYTON, S., GRICE, T.G., BOGER, D.V. Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions. International Journal of Mineral Processing. 2003;v.(70):3-21.
- 11 TRAMPUS, B.C., FRANÇA, S.C.A. Rheology applied to the environmental management of mineral tailings: focus on safer disposal and water reuse. REM, Int. Eng. J.,2019;v.72(2):301-306.
- 12 CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357/05. Estabelece a classificação das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional. Brasília, SEMA, 2005. |