OTIMIZAÇÃO DA PERFORMANCE DO SEDIMENTADOR NO TRATAMENTO DE REJEITO WILLEMÍTICO

Harley Lima de Almeida[1], Arlley de Brito Magalhães Sousa[1], Warlei Gonçalves Xavier Rodrigues[2], Renata Nepomuceno da Cunha[1]

[1] Centro Universitário de Patos de Minas – UNIPAM, Patos de Minas, MG, Brasil.
[2]Nexa Resources
harleylimadealmeida@hotmail.com

Resumo: Este estudo otimiza a performance de coagulantes e floculante da sedimentação de rejeito willemítico proveniente do beneficiamento de zinco silicatado. Foram avaliados os coagulantes óxido de cálcio, hidróxido de sódio e sulfato de alumínio, combinados com o floculante Flonex. As respostas foram: velocidade de sedimentação, pH, condutividade elétrica e turbidez do líquido clarificado. A adição de floculante, associada a altas concentrações de coagulantes, promoveu alterações da sedimentação.

Palavras-chave: Espessamento; coagulantes; modelagem estatística; beneficiamento de minérios

INTRODUÇÃO

A obtenção do zinco metálico ocorre a partir da extração do zinco de minerais como esfarelita (sulfeto de zinco) e calamina (carbonato de zinco), os quais são encontrados em jazidas subterrâneas ou a céu aberto. O processo envolve o beneficiamento e a flotação visando a concentração do mineral. Em seguida o concentrado é calcinado para transformar o sulfeto em óxido de zinco, que recebe a denominação de calcina. O óxido de zinco é reduzido por meio de carbono ou monóxido de carbono, resultando na formação do zinco metálico.

O processo realizado via úmida gera rejeitos constituídos por polpas com altas concentrações de materiais particulados (minerais de ganga) os quais são submetidos ao espessamento por meio da sedimentação nos espessadores. Nos espessadores ocorre os processos de coagulação, floculação e sedimentação.

O espessamento é um processo de separação sólido-líquido baseado na sedimentação gravitacional, onde as partículas sólidas em suspensão são separadas do líquido devido à diferença de densidade. O objetivo principal é aumentar a concentração de sólidos em uma polpa ou recuperar o líquido clarificado (França e Massarani, 2010). O processo ocorre com a formação das regiões: líquido clarificado (região em que a parte superior precisa estar isenta de sólidos), sedimentação livre na parte central (região em que as partículas sedimentam sem interação) e a parte inferior (região na qual ocorre a compactação e as partículas começam a interagir, formando uma camada de polpa).

A floculação é um processo utilizado para promover a agregação de partículas em suspenções, formando flocos que facilitam o espessamento e a filtração (Baltar, 2010).

Os espessadores desempenham um papel fundamental na recuperação de água para recirculação no circuito e na redução do impacto ambiental do rejeito gerado. Contudo, problemas operacionais podem acarretar perdas de sólidos no transbordo que podem comprometer a sua eficiência.

Na sedimentação de polpas de rejeito provenientes da flotação de zinco verifica-se que, a taxa de sedimentação do espessador apresenta dificuldades na aglomeração, resultando uma alta turbidez, que é a presença de sólidos na água clarificada (overflow). Esse fenômeno pode estar associado a fatores como a alta concentração de sólidos na polpa de alimentação e a instabilidade das partículas em suspensão.

Face ao exposto, pretende-se, por meio desta pesquisa, avaliar os efeitos da concentração de coagulantes distintos frente à performance do sedimentador. Faz ainda parte do escopo deste estudo verificar os efeitos da adição do floculante sobre a sedimentação das partículas. Acredita-se que, os resultados obtidos poderão fornecer subsídios para ajustes operacionais.

MATERIAL E MÉTODOS

As amostras utilizadas nos ensaios experimentais compostas por rejeito willemítico em estado líquido, foram coletadas na empresa, por amostradores automáticos, em tubulações instaladas antes do sedimentador, para que não haja influência de reagentes manuseados no processo.

Preparo das Amostras

O rejeito foi armazenado em baldes plásticos limpos e rotulados e transportados para o laboratório. Para garantir a representatividade da amostra, a polpa foi quarteada em quarteador marca Brastorno modelo DIVISAMPLER para garantir homogeneidade, a partir de conagem e abertura em aranha. A amostra foi desidratada em estufa a aproximadamente 200°C até obtenção de massa constante, permitindo posterior controle da porcentagem de sólidos durante os ensaios. Em seguida a amostra foi desagregada com o auxílio de peneiramento em malhas mais grossas, para garantir a quebra de material grosseiro, assegurando-se a homogeneização.

Ensaios de sedimentação

A polpa aquosa de rejeito foi simulada na mesma concentração, 30% m/v, por meio da adição do rejeito seco em água. Em seguida foi agitada em agitador marca Alfakit modelo AT-403 até a completa homogeneização, garantindo a dispersão uniforme das partículas sólidas em suspensão antes da realização dos ensaios experimentais de sedimentação.

Com o objetivo de otimizar o processo foram adicionadas concentrações distintas de coagulantes e volume fixo de floculante de 5,2 mL. Foram avaliadas as eficiências de 3 coagulantes, a citar: óxido de cálcio (CaO), sulfato de alumínio (Al_2SO_4) e hidróxido de sódio (NaOH). Em seguida realizou-se, por 5 min a agitação em jarr test. Os ensaios foram feitos em duplicadas a fim de se obter um valor mais preciso para os experimentos realizados. As condições experimentais fixadas em todos os experimentos são explicitadas na Tabela 1.

Tabela 01- Condições experimentais fixas adotadas no processo de coagulação/floculação

Condições operacionais	Valores fixos
Concentração de sólidos na polpa	30 %
Concentração da solução mãe dos coagulantes	1 g/L
Concentração da solução mãe do floculante	1,5 g/L
Volume de floculante adicionado	5,2 mL
Temperatura da sedimentação	27±1ºC
Rotação de agitação no jarr test	100 rpm
Tempo de agitação no jarr test	5 min

A Tabela 2 apresenta o delineamento experimental adotado no processo de coagulação/floculação seguido por sedimentação. Após adição do coagulante e do floculante e agitação em jarr test foram avaliadas as respostas: velocidade de sedimentação, turbidez do líquido clarificado, pH e condutividade elétrica.

Os resultados experimentais obtidos foram analisados com auxílio do programa Statistica, a fim de se avaliar a influência de cada fator na resposta experimental, ajustar modelos aos dados experimentais e definir as condições ótimas da sedimentação, com um nível de confiança de 95%.

Tabela 02 - Planejamento experimental adotado nos ensaios de coagulação/floculação seguido por sedimentação

Ensaio	Variáveis reais		Variáveis codificadas	
	Coagulante (g/L)	Floculante (5,2 mL)	x_1	x_2
1	0,0	não	-1,00	-1,00
2	0,0	não	-1,00	-1,00
3	0,0	sim	-1,00	1,00
4	0,0	sim	-1,00	1,00
5	0,1	não	-0,33	-1,00
6	0,1	não	-0,33	-1,00
7	0,1	sim	-0,33	1,00
8	0,1	sim	-0,33	1,00
9	0,3	não	1,00	-1,00
10	0,3	não	1,00	-1,00
11	0,3	sim	1,00	1,00
12	0,3	sim	1,00	1,00

Caracterização do processo de coagulação/floculação seguido por sedimentação

A) Velocidade de sedimentação

Realizado por meio do ensaio em proveta, cujo propósito é monitorar o deslocamento da interface superior de uma suspensão ao longo do tempo. Utilizou-se, para tanto, proveta de 2 L como recipiente do ensaio. Ao longo da execução, foram registrados os deslocamentos da interface da polpa em função do tempo, sendo os dados empregados no cálculo da velocidade de sedimentação das partículas, expressos em cm/min. Estabeleceu-se um tempo máximo de observação de 15 minutos para o experimento.

B) Turbidez do líquido clarificado

Utilizou-se o turbidímetro marca MS Tecnopon modelo mPA210, instrumento que mede a quantidade de partículas suspensas em um líquido utilizando um feixe de luz para avaliar a opacidade do líquido. A medição foi feita em unidades nefelométricas (NTU).

C) pH

Para determinação do pH utilizou-se o pHmetro marca MS Tecnopon modelo TB-1000, o qual foi previamente calibrado com soluções padrões.

D) Condutividade elétrica

Para medir a condutividade elétrica, utilizou-se um condutivímetro marca MS Tecnopon modelo mCA150p, dispositivo que mede a capacidade de um material em conduzir eletricidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios laboratoriais de sedimentação permitiram avaliar as influências da concentração de coagulantes e da adição de floculante sobre a eficiência da separação sólido-líquido do rejeito willemítico.

As Tabela 3 e 4 explicitam os resultados experimentais obtidos na coagulação/floculação, ou seja, após a sedimentação das partículas presentes no rejeito de minério de zinco silicatado. Pelos desvios padrões obtidos nota-se que obteve-se, para a maioria dos ensaios, uma boa reprodutibilidade experimental dos resultados, exceto para a condutividade elétrica.

Os modelos estatísticos foram ajustados, considerando-se os fatores lineares, as interações e os termos quadráticos, conforme o desempenho indicado pelo coeficiente de determinação (R^2). Para a grande maioria dos dados, os modelos ajustados apresentaram valores satisfatórios, indicando forte correlação entre as varáveis independentes e a resposta.

Tabela 3- Resultados obtidos para as respostas velocidade de sedimentação e pH provenientes da coagulação/floculação do rejeito de minério de zinco silicatado

Variáveis codificadas		Velocidade de sedimentação (cm/min)			pH (u.a.)		
x_1	x_2	CaO	NaOH	Al_2SO_4	CaO	NaOH	Al_2SO_4
-1	-1	1,31±0,12	1,31±0,12	1,31±0,12	8,9±0,0	8,9±0,0	8,9±0,0
-1	1	1,43±0,15	1,43±0,15	1,43±0,15	8,8±0,1	8,8±0,0	8,8±0,0
-0,33	-1	1,35±0,02	1,15±0,06	1,23±0,02	10,4±0,3	9,8±1,2	9,0±1,3
-0,33	1	1,53±0,02	1,48±0,03	1,49±0,00	10,7±0,3	9,8±1,0	9,0±1,1
1	-1	1,84±0,02	1,71±0,13	1,54±0,15	11,8±0,0	11,5±0,3	8,4±0,9
1	1	2,10±0,01	2,10±0,00	2,07±0,00	11,9±0,0	11,4±0,4	8,5±0,7

Tabela 4- Resultados obtidos para as respostas condutividade elétrica e turbidez provenientes da coagulação/floculação do rejeito de minério de zinco silicatado

Variáveis codificadas		Condutividade elétrica (uS/cm)			Turbidez (NTU)		
x_2	x_2	CaO	NaOH	Al_2SO_4	CaO	NaOH	Al_2SO_4
-1	-1	207,45±16,05	207,45±16,05	207,45±16,05	170,00±29,70	170,00±29,70	170,00±29,70
-1	1	228,80±4,67	228,80±4,67	228,80±4,67	75,50±2,12	75,50±2,12	75,50±2,12
-0,33	-1	398,85±345,99	409,30±147,08	382,65±43,77	190,00±4,24	370,00±2,83	349,50±4,95
-0,33	1	418,20±374,91	402,30±156,27	470,45±145,17	87,00±19,80	157,00±14,14	133,00±38,18
1	-1	572,20±275,21	465,50±156,55	377,90±23,05	105,50±0,71	111,00±9,90	136,00±41,01
1	1	513,85±307,38	452,55±163,98	394,30±31,68	95,00±4,24	99,50±3,54	95,50±3,54

A) Modelos de predição para a velocidade de sedimentação

A partir do planejamento experimental, a velocidade de sedimentação, expressa em cm/min, foi modelada em função das concentrações de coagulantes (x_1, em g/L) e da adição ou não de floculante (x_2, em mg/L). Sendo assim, foram ajustados os modelos de predição da velocidade de sedimentação para cada tipo de coagulante avaliado. Para esses modelos foi definido um grau de confiabilidade de 95% (equações 1 a 3).

$$v_{CaO}(R^2 = 0{,}954; p - valor = 0{,}05) = 1{,}53 + 0{,}30x_1 + 0{,}14{x_1}^2 + 0{,}09x_2 \quad (1)$$

$$v_{NaOH}(R^2 = 0{,}919; p - valor = 0{,}05) = 1{,}37 + 0{,}27x_1 + 0{,}27{x_1}^2 + 0{,}14x_2 \quad (2)$$

$$v_{Al_2SO_4}(R^2 = 0{,}939; p - valor = 0{,}05) = 1{,}41 + 0{,}21x_1 + 0{,}18{x_1}^2 + 0{,}16x_2 + 0{,}10x_1x_2 \quad (3)$$

Nos modelos quadráticos ajustados para os coagulantes, observa-se que as equações obtidas para o CaO e NaOH são compostas por quatro termos, enquanto o modelo para o para Al_2SO_4 possui cinco termos, devido à inclusão do fator de interação. Ressalta-se que, valores positivos dos coeficientes indicam indicam correlação direta de proporcionalidade com a velocidade de sedimentação. Os efeitos linerares de concentração de coagulante (x_1) foi positivo em todos os modelos, o que sugere que o

aumento dessa variável acarreta em um incremento na velocidade de sedimentação. Vale ainda salientar que todos os coagulantes apresentaram comportamentos similares, quanto à velocidade de sedimentação das partículas, ou seja, a adição de floculante acelera a decantação das partículas. Tal fato ocorreu independente do tipo de coagulante.

O modelo obtido para o óxido de cálcio apresentou um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,954, o que indica que o modelo explica 95,4% da variabilidade dos dados em torno da média, restando 4,6% atribuídos aos resíduos. O modelos obtidos para o hidróxico de sódio e para o sulfato de alumínio apresetaram coeficientes de determinação de 0,919 e 0,939, respetivamente, ou seja, elevada capacidade preditiva.

Os resultados obtidos confirmam a relevância do controle da dosagem do coagulante e da adição de floculantes na eficiência da sedimentação de rejeitos. Estudos com esses coagulantes foram realizados por Ferriols e Aguilar (2012) que evidenciaram alta eficiência de floculação (>96%) utilizando sulfato de alumínio (Al_2SO_4) e hidróxido de sódio (NaOH), com rápida formação de flocos estáveis.

B) pH do líquido clarificado

A seguir são apresentados os modelos de predição (equações 4 e 5) obtidos para o pH do líquido clarificado para cada coagulante utilizado. Ressalta-se que não foi possível obter o modelo de predição de pH para o coagulante Al_2SO_4, pois o mesmo possuía um coeficiente de determinação muito baixo.

$$pH_{CaO}(R^2 = 0{,}985; p - valor = 0{,}05) = 10{,}81 + 1{,}47x_1 - 0{,}50{x_1}^2 \quad (4)$$

$$pH_{NaOH}(R^2 = 0{,}835\ ; p - valor = 0{,}05) = 10{,}16 + 1{,}29x_1 \quad (5)$$

O coeficiente de determinação para CaO obtido para esse modelo foi R^2 = 0,985, já para NaOH o coeficiente de determinação do modelo foi R^2 = 0,835, o que caracteriza um ajuste estatisticamente satisfatório para ambos os modelos.

No modelo obtido para o óxido de cálcio a equação é composta por três termos sendo: a média, um termo linear x_1 (concentração de coagulante) e um termo quadrático negativo. Esse comportamento indica que aumentos adicionais da concentração do coagulante promovem acréscimos do pH, até atingir o ponto de máximo. Após esse ponto, aumentos de x_1 promovem o decréscimo do pH. Por sua vez o modelo ajustado para o hidróxido de sódio é representado apenas pela média e pelo fator linear x_1 (concentração de coagulante), ou seja, o pH é diretamente proporcional à concentração de coagulante.

Nota-se que, em ambos os modelos, a variável x_2 (dosagem de floculante) não exerceu efeito estatístico frente a essa resposta para ambos os coagulantes. Tal comportamento se justifica pelo fato de que floculantes poliméricos atuam predominantemente por mecanismos de adsorção e formação de pontes interpartículas, promovendo a aglomeração física das partículas suspensas sem provocar reações químicas relevantes com o meio. Dessa forma, não há liberação ou consumo significativo de íons hidrogênio ou hidroxila, o que mantém inalterado o equilíbrio ácido-base da solução (Baltar, 2010; França e Massarani, 2018).

Ressalta-se que valores elevados de pH são favoráveis à desestabilização eletrostática das partículas em suspensão, facilitando a formação de flocos. A estabilidade do pH frente à adição de floculantes foi confirmada por Barbacena (2024), que ao avaliar os reagentes Tanfloc SG e CWT 17, constatou variação insignificante do pH, mesmo em altas dosagens, evidenciando que o controle da alcalinidade do meio está diretamente associado à natureza e concentração do coagulante. Estudos realizados por Amorim (2021) corroboram se assemelham a esse comportamento ao demonstrar que, na combinação de cal e policrilamida para sedimentação de partículas finas de quartzo, a elevação do pH decorreu exclusivamente para a cal, sendo o floculante responsável apenas pela formação de flocos e aceleração da sedimentação, sem impacto significativo na acidez ou basicidade do sistema.

Embora os coagulantes avaliados tenham apresentado desempenho semelhante na eficiência de sedimentação, o óxido de cálcio se destacou por elevar significativamente o pH da solução clarificada (Tabela 4). Essa característica favorece a recirculação da água na etapa de cominuição, reduzindo o consumo do agente modificador responsável por ajustar o pH, insumo que possui custo elevado para a etapa de flotação para minério silicatado. O baixo custo do CaO reforça sua aplicabilidade em operações com necessidade de água alcalina, resultando em vantagem operacional e econômica frente aos demais coagulantes avaliados.

C) *Modelos de predição para a condutividade elétrica*

Para os sistemas contendo óxido de cálcio (CaO) e hidróxido de sódio os modelos ajustados resultaram em equações com coeficientes de determinação muito baixos, indicando que não há significância para análise. Para a sedimentação com sulfato de alumínio o coeficiente linear x_1 (concentração de coagulante) é positivo, no entanto, o termo quadrático ($-171{,}49{x_1}^2$), o que revela presença de ponto de máximo, indicando que, após certo ponto, o aumento

da dosagem do coagulante passa a promover redução da condutividade elétrica (Figura 7). Infere-se ainda que a adição de floculante não promoveu alterações estaticamente significativas sobre a condutividade elétrica do líquido clarificado.

$$condutividade\ elétrica_{Al_2SO_4}(R^2 = 0{,}742; p - valor = 0{,}05) = 473{,}60 + 83{,}99x_1 - 171{,}49{x_1}^2 \quad (6)$$

França e Massarani (2018) destacam que floculantes poliméricos não alteram o equilíbrio eletroquímico da suspensão, visto que não contribuem com íons livres à solução, ao contrário dos coagulantes, cuja dissociação afeta diretamente a condutividade elétrica. Essa interpretação é reforçada por Arroub e Elharfi (2018), que ao avaliarem diferentes polieletrólitos no tratamento de efluentes industriais, observaram que a condutividade do meio só foi afetada indiretamente pela remoção de íons complexados aos sólidos, e não pela ação do floculante propriamente dito. Baltar (2010) acrescenta que, o floculante atua por mecanismos físicos de agregação, como a formação de pontes entre partículas, sem promover dissociação iônica na solução. Assim, sua adição não contribui com íons livres ao meio, mantendo inalterada a condutividade elétrica da suspensão.

C) Modelos de predição para a turbidez do líquido clarificado

A turbidez da água refere-se à concentração de partículas em suspensão que causam turvação ou falta de transparência na água. Expressa em unidades NTU (Netphelometric Turbidity Units), representa uma variável indicativa da eficiência da separação sólido-líquido, sendo diretamente relacionada à presença de partículas finas em suspensão no overflow.

$$turbidez_{CaO}(R^2 = 0{,}867; p - valor = 0{,}1) = 141{,}88 - 30{,}38{x_1}^2 - 32{,}12x_2 + 23{,}0\ x1x2 \quad (7)$$

$$turbidez_{NaOH}(R^2 = 0{,}866; p - valor = 0{,}1) = 282{,}19 - 168{,}19{x_1}^2 - 49{,}99x_2 + 28{,}58\ x_1x_2 \quad (8)$$

$$turbidez_{Al_2SO_4}(R^2 = 0{,}798; p - valor = 0{,}05) = 256{,}50 - 137{,}25{x_1}^2 - 58{,}58x_2 \quad (9)$$

Para o óxido de cálcio (CaO) e o hidróxido de sódio (NaOH) os modelos (equações 7 e 8) apresentaram similaridade com um termo quadrático negativo para a concentração de coagulante, um fator linear negativo para a dosagem de floculante (x_2) e um fator de interação positivo entre o coagulante (x_1) e o floculante, indicando que a eficácia na redução da turbidez depende do equilíbrio entre ambos. Os coeficiente de determinação (R^2 = 0,867 e 0,866) demonstraram bons ajustes estatísticos. Para o sulfato de alumínio (Al_2SO_4), observou-se comportamento semelhante , no entanto sem o fator de interação entre as variáveis. O modelo obteve R^2 = 0,798, evidenciando um ajuste estatisticamente satisfatório

O efeito linear negativo da dosagem de floculante (x_2), obtido em todos os modelos indica sua contribuição significativa na remoção de partículas em suspensão. Tal fato está em concordância com os efeitos deste na velocidade de sedimentação. O termo de interação positivo entre coagulante e floculante evidencia que o desempenho do sistema depende do equilíbrio entre ambas as variáveis.

Trabalhos como o de Tahraoui (2024) demonstraram que o uso do sulfato de alumínio (Al_2SO_4) resultou em elevada remoção de turbidez e significativa redução da condutividade elétrica em águas altamente poluídas, o que corrobora os resultados deste trabalho.

Os resultados são coerentes Lopes (2017) que ao investigar o espessamento de rejeitos de minério de ferro, observou expressiva redução da turbidez ao empregar óxido de cálcio (CaO) associada a floculantes à base de poliacrilamida. A combinação dos reagentes promoveu a formação de flocos mais densos e sedimentáveis, resultando em clarificados com menor teor de partículas em suspensão. De modo análogo, Souza e Reis (2020) destacam que o aumento do pH da polpa, promovido pela adição de coagulantes alcalinos, induz à redução do potencial zeta e à neutralização das cargas superficiais das partículas, mecanismos que favorecem a desestabilização coloidal e a subsequente agregação particulada.

Para determinar o ponto ótimo do processo foi realizadade a técnica de desejabilidade , a qual é descrita nas Figuras 1 a 3. Segundo os gráficos, verifica-se que as condições ótimas foram obtidas para as dosagens mais alta de coagulante e floculante. Os resultados foram similares para todos os coagulantntes avaliados.

Para tanto foram parametrizadas como desejáveis: valores altos de: velocidade de sedimentação, pH e condutividade elétrica e valores baixos de turbidez.

Segundo os gráficos, verifica-se que as condições ótimas foram obtidas para as dosagens mais alta de coagulante (0,3 g/L) na presença de floculante (5,2 mL em 1,5 L de polpa com concentração de 30% de sólidos). Os resultados foram similares para todos os coagulantntes avaliados.

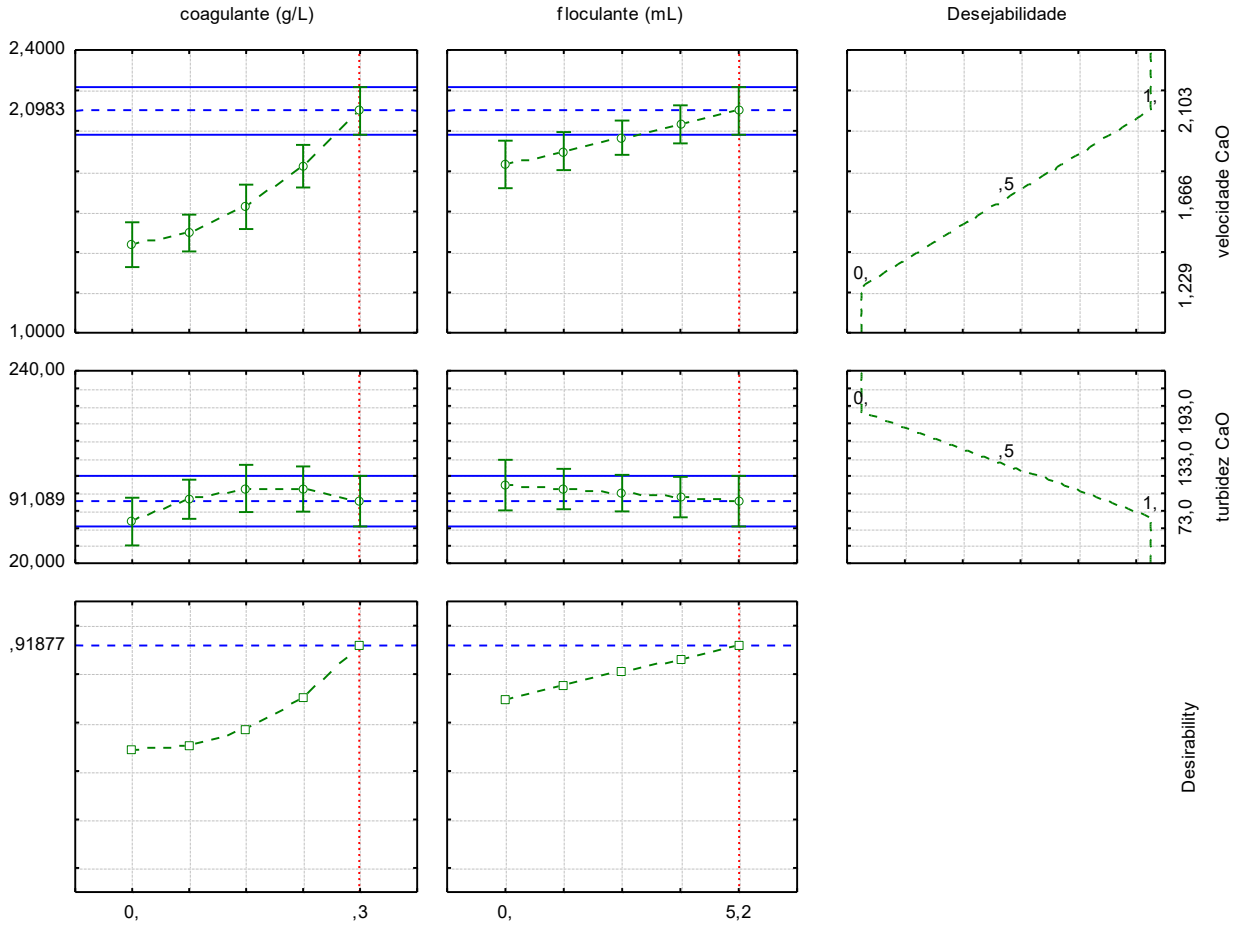


Figura 1. Determinação da desejabilidade para o coagulanete óxido de cálcio e floculante.

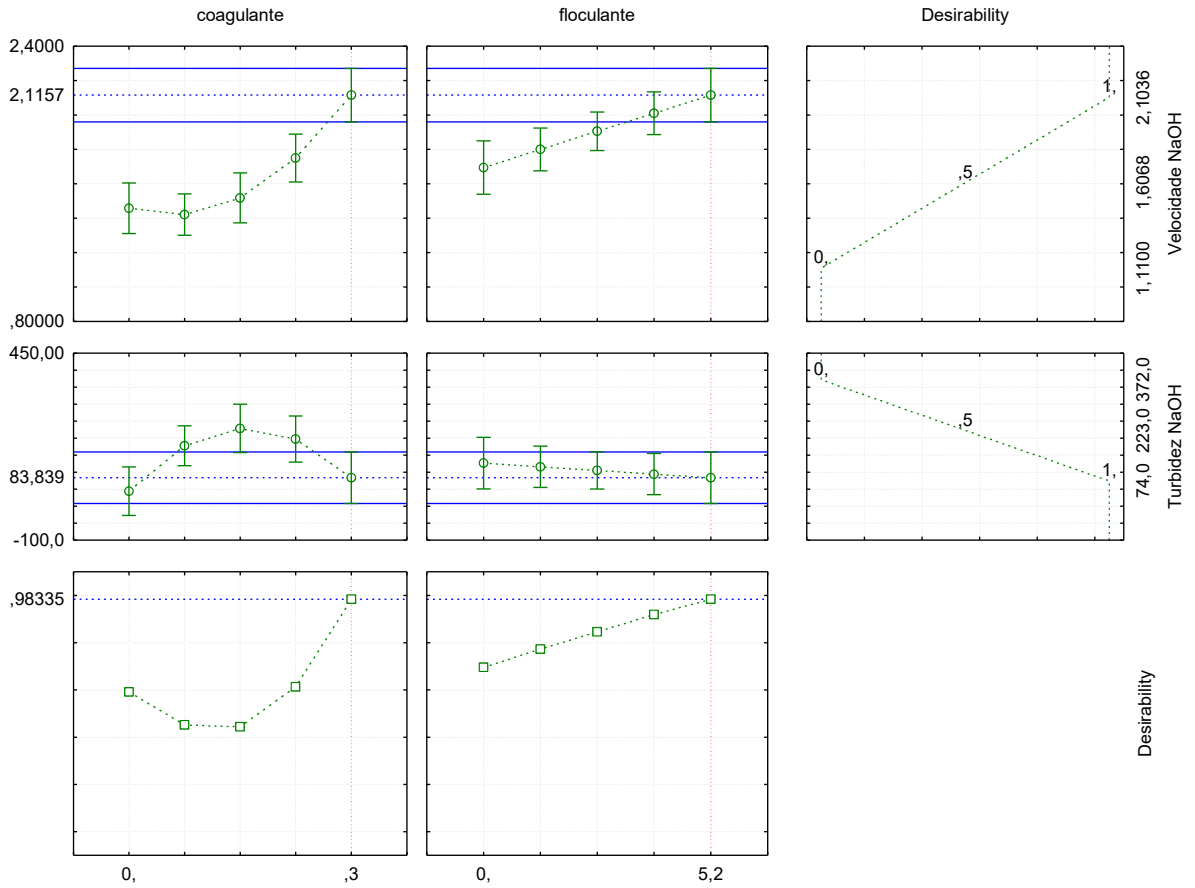


Figura 2. Desejabilidade obtida para o coagulante hidróxido de cálcio e coagulante.

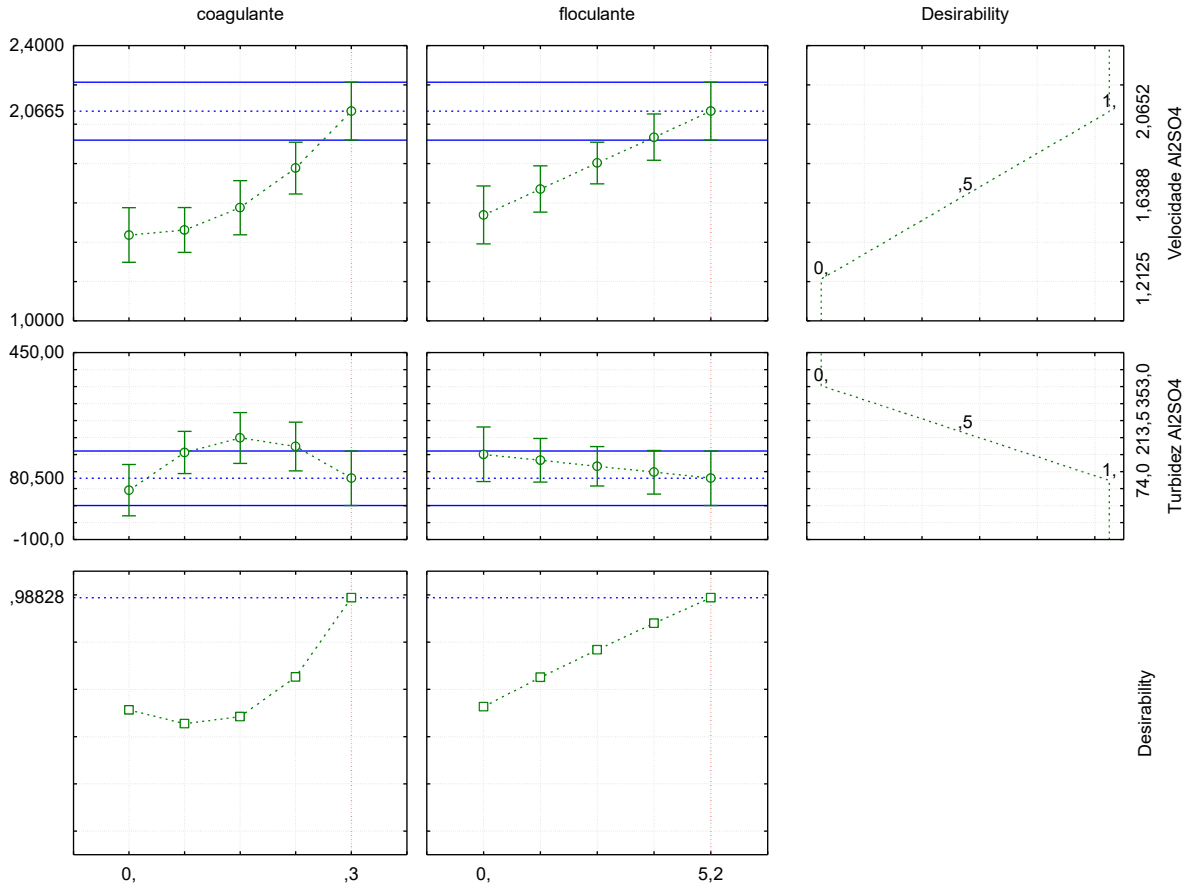


Figura 3. Desejabilidade obtida para o coagulante sulfato de alumínio e floculante.

CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar, de forma sistemática, a influência de diferentes coagulantes no desempenho do processo de sedimentação de rejeito willemítico, com vistas à otimização da operação do espessador industrial. Foram testados óxido de cálcio (CaO), hidróxido de sódio (NaOH) e sulfato de alumínio (Al_2SO_4) como coagulantes, na presença e na ausência de floculante Flonex 910SH. As análises foram conduzidas com base na metodologia de regressão não linear múltipla, considerando as variáveis de resposta: velocidade de sedimentação, pH, condutividade elétrica e turbidez do líquido clarificado.

Os resultados experimentais mostraram que os três coagulantes promoveram aumento na velocidade de sedimentação e redução da turbidez do clarificado quando associados ao floculante, apresentando coeficientes de determinação elevados nos modelos estatísticos ajustados, o que confirma a confiabilidade dos ajustes e a significância das variáveis estudadas.

Para todos os coagulantes avaliados a condição ótima opercional foi obtidas nas elevadas dosagens de coagulante associados à presença de floculante.

Embora o desempenho global de sedimentação tenha sido tecnicamente comparável entre os coagulantes avaliados, o óxido de cálcio destacou-se por induzir elevação substancial do pH da solução clarificada, com valores médios superiores a 11. Essa característica confere a este reagente uma vantagem operacional estratégica, pois viabiliza a reutilização da água clarificada no início do processo, especialmente na etapa de cominuição. Promove, portanto uma economia de reagentes alcalinos como agente modificador responsável por ajustar o pH que é um insumo de elevado custo utilizado para elevar o pH da polpa de zinco silicatado. Este efeito colateral positivo do CaO, associado ao seu baixo custo de aquisição, corrobora sua aplicabilidade preferencial em cenários industriais com demanda por recirculação de água alcalina.

A escolha do coagulante, portanto, pode ser feita com base não apenas na eficiência de sedimentação, que se mostrou satisfatória para todos os reagentes, mas também nas condições operacionais desejadas para o

sistema de recirculação de água. O uso do CaO como coagulante permite não só alcançar bons índices de separação sólido-líquido, como também otimizar o balanço químico do processo, proporcionando ganhos econômicos e ambientais.

Dessa forma, os resultados obtidos fornecem subsídios técnicos para a tomada de decisão na escolha do coagulante em sistemas de espessamento de rejeitos, destacando-se a importância da análise integrada entre desempenho físico-químico e implicações operacionais da água clarificada no circuito industrial.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação Educacional de Patos de Minas (FEPAM) durante a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ARROUB, H.; ELHARFI, A. Study of the efficiency of polyelectrolytes in the treatment of liquid effluents resulting from hot-dip galvanizing. *Journal of Materials and Environmental Science*, Kenitra, v. 9, n. 11, p. 3059–3066, 2018.

AMORIM, Polyana Andrade. DESEMPENHO DA CAL COMO COAGULANTE EM PARTÍCULAS FINAS DE QUARTZO. 2021. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

BARBACENA, Álisson Paulo. ESTUDO DO ADENSAMENTO DA POLPA DE REJEITOS DE UMA MINERAÇÃO POR MEIO DA FLOCULAÇÃO. 2024. 27 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Centro Universitário de Patos de Minas, Patos de Minas, 2024.

CARLOS ADOLPHO MAGALHÃES BALTAR (Brasil). Cetem (org.). PROCESSOS DE AGREGAÇÃO. In: ADÃO BENVINDO DA LUZ (Rio de Janeiro). Cetem (org.). Tratamento de Minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: Cetem, 2010. Cap. 13. p. 559-566.

FERRIOLS, V. M. E. N.; AGUILAR, R. O. *Efficiency of various flocculants in harvesting the green microalgae Tetraselmis tetrahele (Chlorodendrophyceae: Chlorodendraceae).* AACL Bioflux, Cluj-Napoca, 2012.

JOÃO ALVES SAMPAIO (Brasil). Cetem (org.). Química de Superfície na Flotação. In: ADÃO BENVINDO DA LUZ (Rio de Janeiro). Cetem (org.). Tratamento de Minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: Cetem, 2010. Cap. 10. p. 367-393.

LOPES, Larissa Moreira. Otimização do processo de espessamento de rejeito de minério de ferro de Itatiaiuçu-MG. 2017. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso de Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2017.

LIMA, Larissa Thayse Silva de. *Avaliação da fécula de mandioca como floculante auxiliar nas etapas de coagulação/floculação e flotação por ar dissolvido para o tratamento de água.* 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). *Perfil do Zinco*. Brasília: MME, 2021. 74 p. (Relatório Técnico, P39_RT65 – Projeto ESTAL).

SILVA, Tiago Alvarenga Vitorino da. ESTUDO DE REAGENTES NA FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE ZINCO. 2006. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Engenharia de Minas, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

SILVIA CRISTINA ALVES FRANÇA (Rio de Janeiro). Cetem. Ensaios de Sedimentação. In: SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: Cetem-McT, 2007. Cap. 23. p. 393-410.

SILVIA CRISTINA A. FRANÇA (Rio de Janeiro). Cetem (org.). Separação sólido-líquido. In: ADÃO BENVINDO DA LUZ (Rio de Janeiro). Cetem (org.). Tratamento de Minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: Cetem, 2010. Cap. 15. p. 637-680.

SILVIA CRISTINA ALVES FRANÇA (Rio de Janeiro). Cetem (org.). Separação Sólido-Líquido. In: ADÃO BENVINDO DA LUZ (Rio de Janeiro). Cetem (org.). Tratamento de Minérios. 6. ed. Rio de Janeiro: Cetem, 2018. Cap. 14. p. 597-647.

VINHAL, J. T.; HÚNGARO, R. C.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. *Caracterização de rejeito proveniente do processo de flotação do minério willemítico*. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA – ENTMME, 28., 2019, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: ABM, 2019. p. 1–10.