



SIMULAÇÃO E MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO VIA SOFTWARES EMSO E EXCEL

P. G. AGUIAR¹, R. L. O. ROCHESTER², J. C. GONÇALVES¹

¹ Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, Faculdade de Engenharia Química

² Universidade Estadual de Montes Claros, Faculdade de Engenharia Civil

E-mail para contato: polyana.eq@gmail.com

RESUMO – No presente trabalho, foi analisada a diminuição de concentração de sólidos em um processo de flotação por ar dissolvido utilizando os coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico. Os dados experimentais foram modelados conforme equações tradicionais da literatura, levando em consideração os resultados de simulação obtidos via software EMSO, tendo como critério de ponto ótimo, a minimização do erro quadrático. O equacionamento se adequou mais aos resultados do tratamento com cloreto de ferro.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a flotação por ar dissolvido (FAD) é um dos processos tipicamente empregados como etapa do tratamento de águas superficiais. Ele consiste na injeção de microbolhas geradas a partir de um saturador e da redução da pressão da corrente de água saturada com ar. O ar precipita como bolhas, promovendo o arraste de materiais em suspensão que são menos densos que a água, como sólidos de baixa granulometria (FONSECA, 2017).

A principal função do processo FAD é a diminuição de turbidez na água a ser tratada. Este parâmetro de qualidade é originado de partículas em suspensão que, segundo alguns estudos, podem alojar alguns microrganismos patogênicos, ocasionando problemas do ponto de vista sanitário (FONSECA, 2017).

O estudo das variáveis e componentes químicos do processo faz-se necessário na otimização e projeção de trabalho para demais configurações. A partir disso, alguns modelos de flotação são largamente tratados em Shawwa e Smith (2011) e Edzwald (1995) e descrevem quantitativamente a influência de variáveis micro e macroscópicas no comportamento do processo, dispensando investigações experimentais posteriores. Em outros autores como, Gonçalves et al (2007) e Fonseca (2017), são apresentados uso de softwares de simulação no objetivo de facilitar o manejo das diversas variáveis. A utilização de simuladores dinâmicos, ou seja, que podem analisar um processo ao longo do tempo, torna-se, então, indispensável para análise.

Este trabalho teve como objetivo simular em software EMSO o processo de flotação por ar dissolvido e adequar os modelos propostos por Shawwa e Smith (2011) e Edzwald (1995) aos dados experimentais nas condições de processo da unidade piloto utilizada. Como objetivos secundários, foram realizadas conversões entre turbidez e concentração mássica de sólidos e modeladas as constantes de velocidade de remoção de sólidos entre os valores da simulação e experimentais, a partir da ferramenta de teste de hipótese *Solver* do software comercial *Excel*[®], tendo como critério de ponto ótimo o mínimo valor do erro quadrático.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 Equacionamento e variáveis de processo

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa exploratória a fim de obter as equações que modelassem o processo FAD. Estudos de Shawwa e Smith (2011) propuseram a analogia de comportamento de remoção de partículas no processo FAD ao consumo de reagente em uma reação de primeira ordem. Assim, foi adotada a equação 1 como taxa de diminuição de concentração de sólidos em suspensão.

$$\frac{dC_s}{dt} = -k_p C_s \quad (1)$$

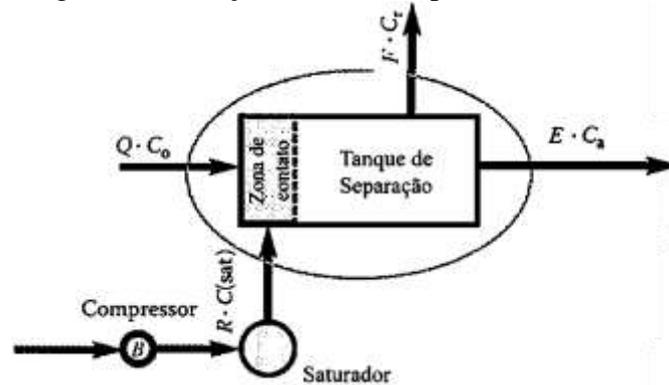
Em que k_p é a constante de velocidade em função das variáveis de processo do sistema (equação (2)).

$$k_p = \frac{9}{4} \alpha_{pb} U_b \frac{d_p^2}{d_b^3} \Phi_b \quad (2)$$

Onde, α_{pb} é o fator de eficiência de fixação entre partículas e bolhas, dado a partir da relação entre a dosagem de coagulante, o valor do potencial zeta e tamanho de partículas; U_b é a velocidade de ascensão de bolhas em condições de fluxo laminar e calculada pela lei de Stokes; d_p é o diâmetro de partículas; d_b é o diâmetro de bolhas; Φ_b é a concentração de volume de bolhas e pode ser dada pela relação entre a concentração mássica de bolhas no saturador (C_r) e a densidade do ar (ρ_{ar}).

É importante mencionar que a concentração mássica de bolhas no saturador segue o balanço material de ar no sistema (Figura 1) e foi proposto por Edzwald (1995), dado pela equação (3).

Figura 1. Balanço de materiais para sistema FAD.



Fonte: HENDRICKS, 2011 (Adaptado).

$$C_r = \frac{r[C_{(saturador)} - C_a] - (C_a - C_o)}{1+r} \quad (3)$$

Onde $C_{(saturador)}$ e C_o são concentrações mássicas de ar que entram no tanque de flotação, sendo a primeira obtida pelo tanque de saturação e a segunda, pela corrente de água a ser tratada (kg gás/ m³); C_r e C_a são concentrações mássicas de ar que saem do tanque de flotação, sendo a primeira liberada na corrente de espuma e a segunda, liberada na corrente de água clarificada (kg gás/ m³); r é a razão Q/R (vazão de água a ser tratada em relação à vazão de corrente que sai do saturador).

No Quadro 1 abaixo são descritos os valores das variáveis de processo adotados neste trabalho.

Quadro 1: Valores adotados nos experimentos.

Variável (Unidade)	Valor	Variável (Unidade)	Valor
α_{pb} (adimensional)	0,15	U_b (m/s)	1,47
d_p (m)	$5,20 \cdot 10^{-4}$	$C_{(saturador)}$ (kg gás/ m ³)	$6,13 \cdot 10^{-2}$
d_b (m)	$3,50 \cdot 10^{-6}$	C_o (kg gás/ m ³)	$2,19 \cdot 10^{-2}$
ρ_{ar} (kg/m ³)	1,28	C_a (kg gás/ m ³)	$2,22 \cdot 10^{-2}$
Q (m ³ /s)	$4,95 \cdot 10^{-6}$	C_r (kg gás/ m ³)	$4,23 \cdot 10^{-2}$
F (m ³ /s)	$1,28 \cdot 10^{-6}$	Φ_b (m ³ gás/ m ³ água)	$3,30 \cdot 10^{-2}$
E (m ³ /s)	$1,12 \cdot 10^{-6}$		
R (m ³ /s)	$3,83 \cdot 10^{-6}$		

2.2 Experimentos na unidade e nos softwares

Os experimentos foram realizados em unidade piloto tendo a água para tratamento composta por CaCO₃ e apresentando turbidez de 60 UNT. Utilizou-se os coagulantes sulfato de alumínio (Al₂(SO₄)₃) e cloreto férrico (FeCl₃) para floculação das partículas. Cada experimento com os coagulantes foi realizado em duplicata, com tempo de concretização de 20 minutos e coletas de amostras a cada 1 minuto. O saturador operou sob pressão de 405,3 kPa.



Devido a impossibilidade de medida de quantidade de sólidos no sistema no decorrer do processo e uma maior facilidade de obtenção de dados de turbidez, fez-se a calibração para conversão entre esta variável e aquela. Foram preparadas amostras em concentrações de 75, 200, 150, 200 e 300 ppm de $CaCO_3$, as quais tiveram as turbidezes medidas. Da mesma forma, amostras de 50, 75, 100 e 150 ppm de $CaCO_3$ foram preparadas, agora com adição de $Al_2(SO_4)_3$ e $FeCl_3$ nas concentrações de 30 ppm cada. Novamente, os valores de turbidez foram relacionados. As leis de função entre as variáveis foram determinadas a partir de medidas em duplicata das amostras.

A simulação do processo foi realizada na entidade FLOWSHEET do software EMSO tendo as variáveis e equações de descrição do processo escritas conforme sintaxe da plataforma. A modelagem para adequação da constante k_p aos dados experimentais seguiu metodologia de discretização da equação (1) tornando-se a equação (4) e otimização via minimização do erro quadrático entre valores experimentais e simulados.

$$C_{si} = (-k_p C_s) \cdot (t_i - t_0) + C_{s0} \quad (4)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Conversão de turbidez para concentração mássica de sólidos

A relação entre os dados de turbidez e concentração de $CaCO_3$ geraram as equações (5) e (6) para as suspensões compostas por $Al_2(SO_4)_3$ e $FeCl_3$, respectivamente, e possuindo coeficiente de correlação de $R^2=0,972$ e $R^2=0,983$. As Desta forma, os dados experimentais obtidos na unidade piloto de flotação puderam ser convertidos e o comportamento gráfico dos resultados pode ser observado na Figura 2.

$$C_{sA} = 0,96 \cdot T_A + 53,55 \quad (5)$$

$$C_{sF} = 1,02 \cdot T_F + 44,62 \quad (6)$$

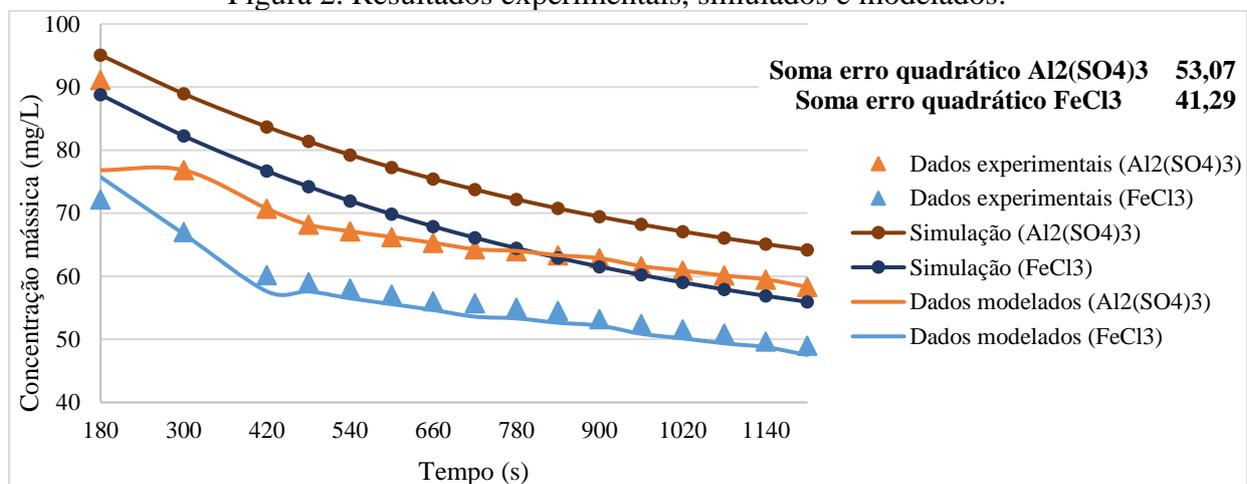
Os valores modelados foram obtidos pela minimização do erro quadrático e teve como alteração a variável k_p . Alcançou-se $k_p = 1,034 \cdot 10^{-3} s^{-1}$ e $k_p = 6,82 \cdot 10^{-3} s^{-1}$ para os coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico, respectivamente. É notável a maior aproximação do modelo para os experimentos com ambos coagulantes a partir de 480 segundos de processo. O motivo pode ser a estabilização do processo após esse tempo.

A partir da soma do erro quadrático (Figura 2), percebe-se que a modelagem do tratamento da água via coagulação com $FeCl_3$ foi mais adequada do que com sulfato de alumínio, indicando a possibilidade do uso do equacionamento proposto com esse coagulante.

Em contrapartida, os dados de simulação, aqueles gerados a partir da implementação no EMSO dos modelos e valores demonstrados no Quadro 1, se mostraram distantes dos dados experimentais e modelados no Excel[®], com constantes de velocidade menores do que as primeiras ($k_p = 5,29 \cdot 10^{-4} s^{-1}$ e $k_p = 6,18 \cdot 10^{-4} s^{-1}$ para as simulações com coagulante

sulfato de alumínio e cloreto férrico, respectivamente). Estes dados indicam que o processo deveria ocorrer de forma mais lenta e obtendo valores de concentração de sólidos acima dos experimentais. Um dos motivos a ser destacado neste caso foi a observação do comportamento de sedimentação por parte das partículas no sistema, ou seja, além do fator empuxo proporcionado pela água e bolhas, houve a presença de arraste gravitacional no processo que proporcionou uma melhor “remoção” de sólidos. Estes resultados não corroboram para uma efetiva flotação de particulados e uma possível solução seria o aumento da carga de bolhas na zona de contato.

Figura 2. Resultados experimentais, simulados e modelados.



4. CONCLUSÃO

Os equacionamentos utilizados neste trabalho se adequaram aos dados experimentais, sendo que, para o coagulante cloreto férrico, a modelagem apresentou um erro quadrático menor. Entretanto, os dados simulados mostraram valores acima dos empíricos, caso não comum no processo e pode ser justificado pela sedimentação de sólidos no sistema, além da flotação. Foi dado possível solução, sendo a maior concentração de bolhas no contato com as partículas a serem removidas.

5. REFERÊNCIAS

EDZWALD, J.K. Principles and applications of dissolved air flotation. **Water Science and Technology**. v.31, nº3-4 p. 1-23, 1995.

FONSECA, R. R. **Monitoramento e controle avançado aplicados à flotação por ar dissolvido**. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

GONÇALVES, K.L.C; SAVASSI, O. Simulação e otimização do circuito de flotação da usina do sossego através da aplicação do *fleet*. **XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Mineração**. Ouro Preto, 2007.



HENDRICKS, D. **Fundamental of Water Treatment Unit Processes**. IWA Publishing, 2011.

SHAWWA, A.R.; SMITH, D.W. Dissolved air flotation model for drinking water treatment. **Canadian Journal of Civil Engineering**. v.27, nº2 p. 373-382, 2011.