

Área: Sustentabilidade | **Tema:** Educação e Sustentabilidade

**ADENSAMENTO DO LODO DE UMA ETA POR FLOTAÇÃO A AR DISSOLVIDO (FAD):
MECANISMOS E OPERAÇÃO**

DETAILED AIR FLOTATION (DAF) DETAIL OF SOIL: MECHANISMS AND OPERATION

Manoel Maraschin, Keila Fernanda Soares Hedlund e Elvis Carissimi

RESUMO

A necessidade do tratamento e destinação do lodo está entre os principais desafios das estações de tratamento de água (ETAs). O objetivo deste estudo foi avaliar a primeira etapa de tratamento do lodo, o adensamento, sendo empregada a flotação a ar dissolvido (FAD) como alternativa substituta aos sistemas de sedimentação. Foi realizada a caracterização do lodo e em seguida testes de floculação para seleção de polímeros. Nos testes de adensamento com o lodo floculado foram utilizadas distintas dosagens do polímero catiônico P 2900, único a produzir flotação completa, além de taxas de reciclo(Tr) de 30, 40 e 50%. Os resultados foram satisfatórios para todas as dosagens, e a maior concentração de sólidos (5,83%) foi atingida com a dosagem de 5,0 mg pol/g SST e Tr de 50%. A maior remoção de turbidez da água clarificada (96%) foi obtida com Tr de 40%, com menor dosagem de polímero.

Palavras-Chave: tratamento e destinação do lodo; floculação; polímeros.

ABSTRACT

The need for treatment and sludge disposal is among the main challenges of water treatment plants (WTPs). The objective of this study was to evaluate the first stage of sludge treatment, the thickening, using dissolved air flotation (DAF) as a substitute alternative to sedimentation systems. The characterization of the sludge was carried out, followed by flocculation tests for polymer selection. In the thickening tests with flocculated sludge, different dosages of the cationic polymer, unique to produce complete flotation, in addition to recycle rates (Rr) of 30, 40 and 50% were used. The results were satisfactory at all dosages, and the higher solids concentration (5.83%) was reached with the 5.0 mg pol /g TSS and Rr of 50%. The higher turbidity removal of clarified water (96%) was obtained with Rr of 40% with lower dosage of polymer.

Keywords: treatment and disposition of sludge; flocculation; polymers.

ADENSAMENTO DO LODO DE UMA ETA POR FLOTAÇÃO A AR DISSOLVIDO (FAD): MECANISMOS E OPERAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

A geração de grande quantidade de lodos constitui um dos principais problemas em ETAs devido o alto custo e dificuldade de tratamento aliado a limitações de disposição do material. O principal componente do lodo é a água, sendo que os valores percentuais podem ultrapassar 97% da sua constituição. Esta característica torna evidente a necessidade de um pré-tratamento diretamente na estação, o que elimina custos de transporte a partir de um material com maior concentração de sólidos, e conduza um produto mais estável e com maior possibilidade de escolha para correta disposição.

O adensamento do lodo é a etapa inicial do tratamento visando à remoção de parte da água. Para atingir a concentração mínima de 2% de sólidos, requerida nesta etapa, pode ser empregada a sedimentação natural, flotação ou por meio de adensadores mecânicos.

A flotação é um processo que tem sido usado desde cedo no beneficiamento de minérios. Na área sanitária esta técnica é utilizada principalmente na remoção de sólidos em suspensão (SS), micro-organismos, óleos e graxas, entre outros poluentes existentes em águas residuais (CARISSIMI E RÚBIO, 2005; WANG, 2006).

Os sistemas de flotação são classificados de acordo com o método de formação das bolhas, em geral o tamanho médio das bolhas encontra-se entre 0,1 a 4 mm (NESSET *et al.*, 2006). Independente do sistema, a ocorrência da flotação depende, além da geração de bolhas, do contato entre as bolhas do gás com as partículas a serem removidas, seguido da ligação ou adesão do conjunto bolha-partícula e finaliza com a remoção do conjunto flotado, que ascende à superfície, uma vez que o aglomerado de gás e partícula apresenta densidade menor em relação à solução a qual está imerso.

A flotação é um processo físico-químico que possibilita a separação seletiva de agregados ou partículas presentes em um sistema em solução pela adesão de bolhas de gás. A separação ocorre devido à densidade aparente do conjunto agregado/bolha ser menor que a do meio aquoso, levando-o a flotar até a superfície do reator.

A ocorrência da flotação de partículas é composta por microfenômenos interfaciais controlados por reagentes, como coletores, surfactantes, coagulantes, floculantes e modificadores de carga. O modelo probabilístico da ocorrência da flotação pode ser expresso pela equação 1.

$$P_f = P_c \cdot P_a \cdot P_p \cdot P_r \quad (1)$$

em que: P_f , P_c , P_a , P_p , P_r são as respectivas probabilidade de flotação, colisão, adesão, permanência e remoção.

A probabilidade de adesão entre bolha e partícula é dependente de várias características do sistema de flotação, incluindo o tamanho da bolha e da partícula e propriedades físico-químicas do sistema. Para que ocorra adesão satisfatória entre bolha/partícula é necessário ângulo de contato (θ) com mínimo 50° a 75°, e ângulo de 90° ou superior para boa adesão. (MASSI *et al.*, 2008).

A probabilidade de permanência relaciona-se a estabilidade do produto flotado permanecer na superfície do reator. Os principais fatores relacionados a esta etapa incluem a resistência ao cisalhamento na ascensão entre as partículas e o colapso das bolhas do gás.

A probabilidade de remoção do produto flotado é controlada principalmente pelo arraste produzido na coleta pelos raspadores, e por parâmetros físicos como o teor de sólidos (CARISSIMI, 2007).

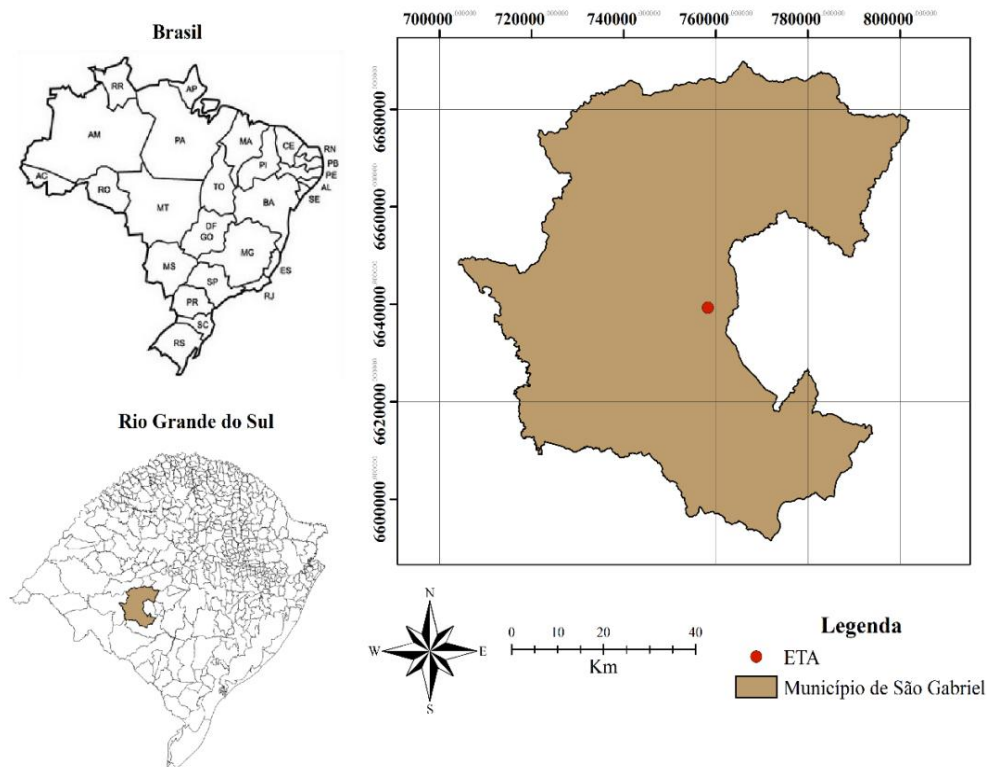
A Flotação por Ar Dissolvido (FAD) configura um dos sistemas de flotação utilizado no adensamento de lodos. Neste sistema ocorre à geração de microbolhas de ar, quando a água supersaturada com ar a elevada pressão, geralmente entre 3 a 6 atmosferas, flui através de uma válvula redutora de pressão, o diâmetro das bolhas geradas na FAD geralmente encontra-se entre 0,01 a 0,1 mm, com diâmetro médio de Sauter de 0,04 mm (EDZWALD, 1995).

2METODOLOGIA

A ETA de São Gabriel - RS trata, em média, uma vazão de 137 L.s^{-1} captada do Rio Vacacaí para abastecimento de aproximadamente 60 mil habitantes. Para o tratamento da água a estação utiliza na etapa de coagulação o Cloreto de Polialumínio – PAC. A localização da ETA é apresentada na Figura 1.

A coleta do lodo ocorreu no decantador durante o período higienização do mesmo. Na caracterização qualitativa do lodo foram determinados os principais parâmetros físico-químicos e microbiológicos, a saber: potencial hidrogeniônico (pH); condutividade; sólidos totais (ST); sólidos totais fixos (STF); sólidos totais voláteis (STV); sólidos em suspensão (SST); sólidos em suspensão fixos (SSF); sólidos em suspensão voláteis (SSV); demanda bioquímica de oxigênio (DBO); demanda química de oxigênio (DQO); coliformes totais e *Escherichia coli*. A metodologia empregada para caracterização qualitativa seguiu os procedimentos descritos por *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA *et al.*, 2012).

Figura 1 – Localização da ETA de São Gabriel.



Fonte: autores.

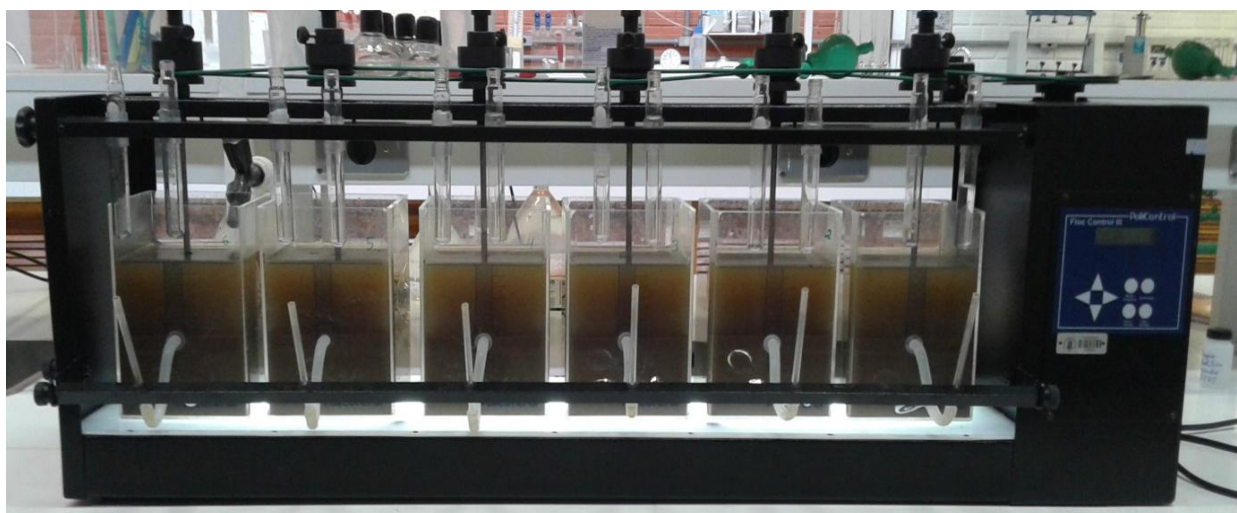
A coleta do lodo ocorreu no decantador durante o período higienização do mesmo. Na caracterização qualitativa do lodo foram determinados os principais parâmetros físico-químicos e microbiológicos, a saber: potencial hidrogeniônico (pH); condutividade; sólidos totais (ST); sólidos totais fixos (STF); sólidos totais voláteis (STV); sólidos em suspensão (SST); sólidos em suspensão fixos (SSF); sólidos em suspensão voláteis (SSV); demanda bioquímica de oxigênio (DBO); demanda química de oxigênio (DQO); coliformes totais e *Escherichia coli*. A metodologia empregada para caracterização qualitativa seguiu os procedimentos descritos por *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al., 2012).

2.1 Seleção do polímero flocculante

Os testes de floculação foram realizados com diferentes polímeros em concentrações variando de 0 a 5,5 mg pol.(gSST)⁻¹. A primeira etapa consistiu na programação do equipamento de Teste de Jarros. Inicialmente executou-se a agitação rápida das amostras puras durante 10 segundos a 436 rpm (rotações por minuto), decorrido o tempo da mistura rápida foi introduzido a quantidade de polímero dosada para cada teste, mantendo a mesma velocidade de agitação das amostras durante mais 10 segundos. Ao final dos 20 segundos da mistura rápida iniciou-se a mistura lenta, estendendo-se durante 1 minuto a velocidade de 51 rpm, finalizando a floculação e dando início a sedimentação por 10 minutos do lodo floculado.

A escolha dos polímeros e dosagens que apresentaram melhores resultados foi dada pela coleta da água clarificada, transcorrida a sedimentação, e análise da turbidez. A Figura 2 ilustra a operação de floculação desenvolvida no teste de jarros.

Figura 2 – Operação de floculação em testes de jarros.

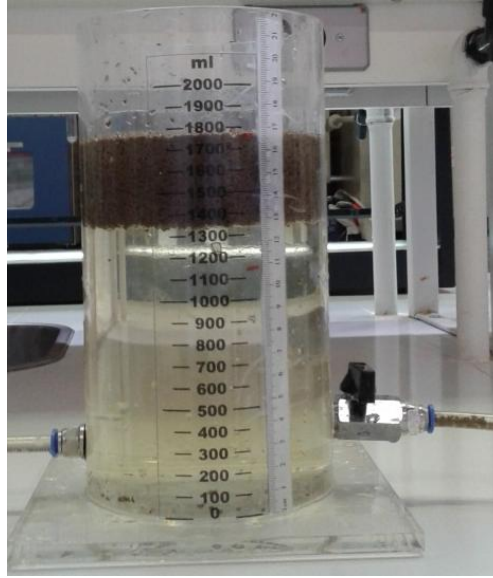


Fonte: autores.

2.2 Adensamento do lodo por FAD

O adensamento por a FAD foi realizado em um flotatestes durante 30 minutos, ao final foi realizada a coleta do lodo adensado e da água clarificada para avaliar, respectivamente, a concentração de sólidos e medição da turbidez. A Figura 3 ilustra a operação de flotação de uma amostra de lodo floculado.

Figura 3 – Testes de adensamento por FAD.



Fonte: autores.

O lodo foi condicionado com polímero catiônico com muito baixa densidade da carga, sendo o único a apresentar flotação completa, em concentrações entre 4,0 a 5,5 mg pol.(gSST)⁻¹. A pressão de saturação (Psat) foi mantida em 6,0 atm, e a taxa de recirculação (Tr) variada em 30, 40 e 50%.

Foi adotado o método de pressurização total da recirculação, visto que formas de compressão total ou parcial do afluente podem prejudicar a eficiência da operação de adensamento pela interferência devido à intensa agitação provocada durante a pressurização do lodo floculado, assim como dificultar a dissolução do ar na água.

Também foi investigada a relação Ar/Sólidos, parâmetro que regula a taxa de crescimento dos flocos formados por bolhas de ar e partículas sólidas, e definido pela massa de ar que precipita por unidade de massa de sólidos. Esta relação configura um dos principais parâmetros dos sistemas de flotação, visto que a quantidade de ar correta no sistema define a eficiência da remoção de sólidos, e que o excesso de ar configura em maior gasto com pressurização. A relação Ar/Sólidos foi calculada mediante emprego da Equação 1.

$$\frac{A}{S} = \frac{1,3 \times S_a \times (f \times P - 1)}{S_s} \times \frac{Q_r}{Q_a} \text{Eq (1)}.$$

Onde:

$\frac{A}{S}$ = massa de ar liberado por massa de sólidos do afluente (mg.mg⁻¹);

S_a = solubilidade do ar na água a pressão atmosférica (mg/l);

S_s = concentração de sólidos suspensos presentes no afluente (mg.L⁻¹);

Q_r = vazão de recirculação (L.s⁻¹), f = eficiência da dissolução do ar na água na pressão P; Q_a = vazão do afluente (L.s⁻¹).

A solubilidade do ar na água depende principalmente da temperatura e pressão parcial do ar, sendo determinada pela lei de Henry. Neste estudo foi utilizada a metodologia, com adaptações, de Krofta e Wang (2000). Para o fator f , o valor levou em consideração o sistema de pressurização, sendo que as características físicas e químicas da água, assim como a pressão que o sistema é mantido, influem significativamente na eficiência da saturação. A quantidade teórica de ar que pode ser dissolvido na água é determinada pela Lei de Henry,

que estabelece que a solubilização de um gás em um líquido é diretamente proporcional a pressão parcial do gás e inversamente proporcional a temperatura (Figura 4). Desta forma a quantidade de ar disponível para flotação, quando injetada junto a água ao tanque de flotação, pode ser determinada pela equação 2:

$$V = K \cdot P_{sat} (2)$$

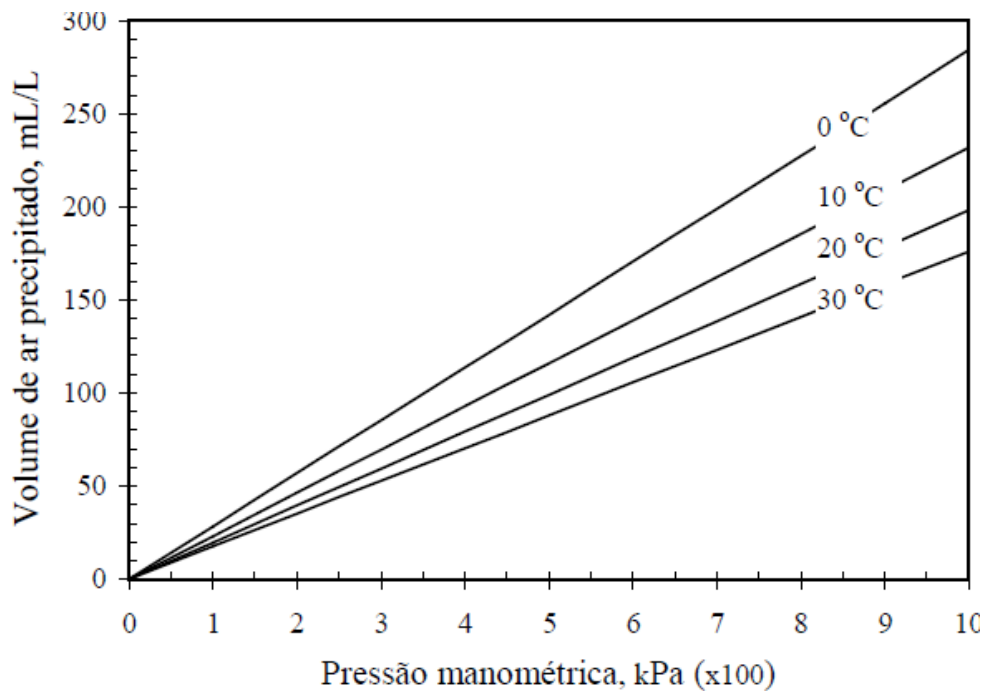
Onde:

V = volume teórico de ar disponível para flotação por litro de água saturada;

K = constante de Henry, expressa a solubilidade do gás por litro de água à pressão atmosférica em função da temperatura;

P_{sat} = pressão de saturação.

Figura 4 - Volume de ar precipitado por litro de água em função da temperatura e pressão.



Fonte: autores.

Como os saturadores não apresentam total eficiência na saturação é incluído à equação 2 um fator de correção para a quantidade de ar injetado ao tanque de flotação, geralmente a eficiência de saturação atinge valores entre 80 a 95% (EDZWALD, 2010)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do lodo

O principal resultado da caracterização do lodo da ETA é sua alta concentração de material não biodegradável, evidenciado pela série de sólidos onde 74% dos sólidos totais são compostos por sólidos fixos. O baixo valor da relação DBO/DQO (0,036) também revela a característica de baixa concentração de material orgânico no lodo da ETA.

Outra propriedade do lodo foi apresentar maior concentração de partículas sólidas em suspensão, característica confirmada quando comparadas as concentrações de ST em relação com a série de SST, já que a fração de sólidos suspensa corresponde a 92% do total de sólidos presentes.

Em relação aos parâmetros microbiológicos, o lodo apresentou elevada contagem para Coliformes totais ($4.48E+05$ NMO/100 mL) e *E.Coli* ($1,85E+05$ NMO/100 mL), estes resultados podem ser explicados pela inexistência de pré-cloração da água bruta tratada na ETA assim como características do manancial de captação.

3.2 Avaliação dos polímeros em teste de jarros

A menor turbidez da água clarificada foi atingida com emprego do polímero catiônico com muita baixa densidade de carga, tendo sido 11,6 NTU para dosagem de 4,5 mg pol.(g SST)⁻¹. Em relação à avaliação de custo-benefício, o polímero não iônico com muito elevada densidade de carga apresentou melhor resultado na comparação com os demais polímeros, tendo sido atingido 34,6 NTU para a turbidez remanescente da água clarificada com emprego de 1,5 mg pol.(g SST)⁻¹. Desta forma, foram selecionados os polímeros: catiônico com muita baixa densidade de carga e não iônico com muito elevada densidade de carga para os ensaios de adensamento por FAD.

3.3 Adensamento do lodo por FAD

Em relação aos parâmetros operacionais do sistema de FAD os resultados encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros operacionais resultantes do sistema de FAD.

Parâmetro	Resultado
Pressão parcial do ar a altitude de 95 m	0,0092 atm
Constante de Henry a 25 °C	$7,17 \times 10^4$ atm/mol
Fração Molar do Ar	$1,3 \times 10^{-7}$ mol
Concentração de Ar no saturador a 1atm	0,21 mg/L
Concentração de Ar no saturador a 6atm	1,26 mg/L
Solubilidade do Ar na Água a 1atm	17,3 ml/L
Solubilidade do Ar na Água a 6atm	103,8 ml/L
A/S para Tr de 50%	0,001 mg/mg
A/S para Tr de 40%	0,0009 mg/mg
A/S para Tr de 30%	0,0006 mg/mg

Fonte: autores.

A pressão parcial do ar exerce influência sobre sua solubilidade na água. Assim, com o aumento da pressão parcial do ar, ligada a altitude local, há elevação da concentração de ar dissolvido na água.

O valor da constante de Henry expressa à solubilidade do gás por litro de água a pressão atmosférica e temperatura da água utilizada para dissolução do ar. A partir da relação entre a pressão parcial e a constante de Henry é possível encontrar a fração molar do ar na água, seguida da concentração do ar no saturador.

O aumento na concentração e solubilidade do ar no saturador é influenciado de forma proporcional a elevação da pressão de saturação, conforme Tabela 3. Assim, com aumento da

solubilidade e concentração de ar no sistema é admitido maior cinética na colisão entre bolhas e agregados, facilitando a flotação desde que ocorra a adesão entre o conjunto bolha/agregado.

Em relação à taxa de A/S, mantida as características do lodo em ambos os testes, o aumento na concentração de ar em relação aos sólidos ocorreu com a elevação da Tr. Contudo, o aumento da concentração de ar disponível para o adensamento pode não significar em aumento na eficiência do processo. O excesso de ar pode facilitar a coalescência entre as bolhas, levando a diminuição da sua área superficial total, pois são formadas bolhas maiores e com maior velocidade de ascensão, podendo levar a uma ruptura por cisalhamento entre o conjunto bolha/agregado, e assim não conduzir a melhoria no sistema.

Nos testes de adensamento, apenas o emprego de polímero catiônico P - 2900 resultou em flotação completa do lodo, sem material sedimentado na célula de flotação. Logo, os resultados apresentados na Tabela 2, em relação aos parâmetros obtidos com o adensamento do lodo, contemplam apenas os testes com o polímero P - 2900. Além disso, são apresentados os resultados da turbidez das amostras sem condicionamento com polímero floculante.

Tabela 2 – Teor de sólidos e turbidez do lodo adensado.

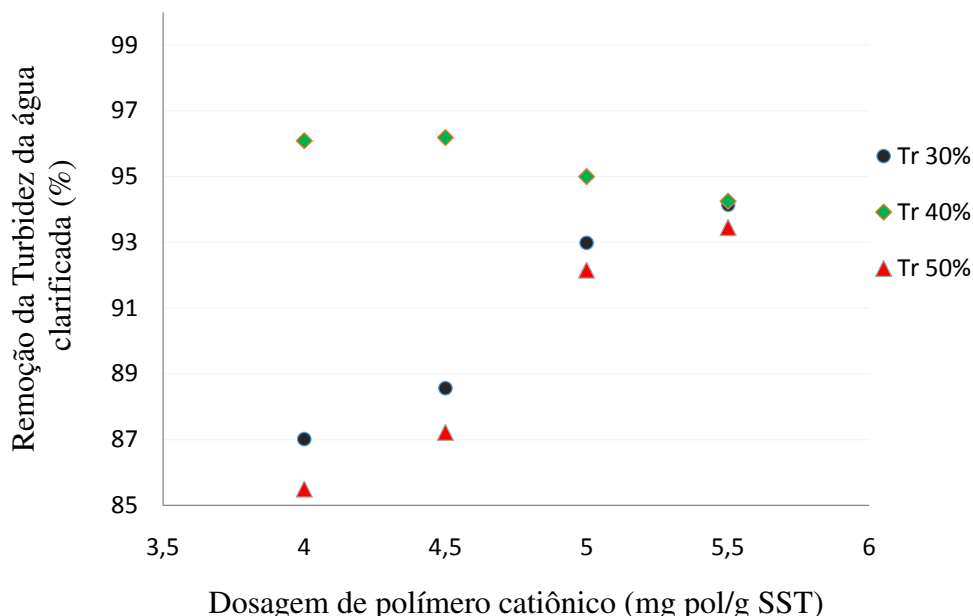
Dosagem (mgpol/g SST)	Psat (atm)	Tr (%)	ST%	Turbidez (NTU)
0,0	6,0	30	-	181,00
4,0	6,0	30	3,69	23,50
4,5	6,0	30	3,89	20,70
5,0	6,0	30	5,07	12,70
5,5	6,0	30	4,27	10,60
0,0	6,0	40	-	173,00
4,0	6,0	40	4,31	6,76
4,5	6,0	40	4,63	6,60
5,0	6,0	40	5,11	7,55
5,5	6,0	40	4,86	9,95
0,0	6,0	50	-	162,00
4,0	6,0	50	4,39	20,50
4,5	6,0	50	4,89	18,90
5,0	6,0	50	5,83	13,40
5,5	6,0	50	5,77	9,89

Fonte: autores.

A maior concentração de sólidos (5,83%) foi atingida com a dosagem 5,0 mgpol/g SST do polímero catiônico a uma Tr de 50%, os demais teores também foram satisfatórios pois em todos os testes foram obtidas concentrações superiores a mínima de 2%, requerida na etapa de adensamento do lodo, conforme relatado por Mattos e Girard, 2013.

Contudo, um dos grandes benefícios do sistema de adensamento de lodo por flotação é a alta remoção de turbidez na água clarificada, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Eficiência na remoção de turbidez da água clarificada.



Fonte: autores.

Em todos os testes foram obtidas remoções de turbidez na água clarificada superiores a 80%, tendo-se os valores máximos de remoção quando a Tr utilizada foi de 40%.

A ocorrência da menor remoção de turbidez quando a Tr passou a 50% deve-se a perturbação causada pela precipitação de uma maior quantidade de bolhas de ar ao lodo floculado, que passou a prejudicar a remoção de turbidez da água clarificada.

Ainda, é possível a partir da Figura 3 avaliar o efeito da dosagem associada a Tr. A remoção da turbidez aumentou com acréscimo na dosagem do polímero catiônico para as taxas de recirculação de 30 e 40%, contudo, em relação a Tr de 40% foi mantido mesmo percentual de remoção (96%) para as duas primeiras dosagens (4,0 e 4,5 mg pol/g SST), passando a diminuir a eficiência de remoção da turbidez com aumento da dosagem do polímero.

Pelo fato da flotação ser altamente influenciados pela viscosidade do meio, apenas o emprego de polímero catiônico com muito baixa densidade de carga resultou em flotação completa do lodo, sem material sedimentado na célula de flotação.

A maior concentração de sólidos (5,83%) foi atingida com a dosagem 5,0 mg pol.(g SST)⁻¹ do polímero catiônico a uma Tr de 50%, os demais teores foram satisfatórios pois em todos os testes obteve-se concentrações superiores a mínima de 2%, requerida na etapa de adensamento do lodo. Para a turbidez na água clarificada a dosagem de 4,5 mg pol.(g SST)⁻¹ resultou no menor valor (6,6 NTU), e a utilização de polímeros para coagulação/floculação do lodo resultou em significativa remoção de turbidez em todos os testes na comparação com operações sem uso de polímeros.

4CONCLUSÃO

A caracterização do lodo da ETA demonstrou predomínio de partículas sólidas em suspensão (SST), sendo estas correspondentes a 92% dos ST. A reduzida biodegradabilidade, comprovada pela baixa relação DBO/DQO (0,036) e alta concentração de STF em relação aos ST, também é apresentada como uma das principais características dos lodos de ETAs.

Em relação aos parâmetros operacionais do sistema FAD, a alta concentração de SST (41.408 mg.L^{-1}) resultou em baixa relação A/S, que aliada a viscosidade superior da maior parte dos polímeros testados limitou apenas ao uso do polímero catiônico com muito baixa densidade de carga o adensamento do lodo testado.

Nos testes de adensamento do lodo por FAD obteve-se maior teor de sólidos no lodo adensado (5,83%) com dosagem de $4,5 \text{ mgpol/g SST}$ e Tr de 50%, tendo nesta configuração a maior relação A/S ($0,0011 \text{ mg.mg}^{-1}$), possibilitando maior coleta de flocos devido ao volume superior de ar em relação as demais Tr testadas. Em relação à turbidez remanescente da água clarificada, conclui-se que as operações do sistema de FAD com utilização de polímeros resultaram em elevada remoção de turbidez, atingindo o menor valor (6,6 NTU) quando utilizado $4,5 \text{ mg pol.(g SST)}^{-1}$ e uma Tr de 40%.

Devido aos vários parâmetros envolvidos no adensamento do lodo por FAD, fazem-se necessárias avaliações do lodo produzido na ETA: e, a partir disso selecionar o polímero e a concentração ideal para o adensamento, assim como avaliações operacionais do sistema de FAD para maximizar o adensamento, objetivando material mais estável para prosseguir seu tratamento e posterior disposição.

Agradecimentos

Os autores agradecer à São Gabriel Saneamento pelas amostras de lodo da ETA e à CAPES.

REFERÊNCIAS

APHA – American Public Health Association. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22 ed., Washington: APHA-AWWA-WEF, 2012.733 p.

CARISSIMI, E., RUBIO, J. Advances in particulates aggregation-flotation separation. Centenary of Flotation Symposium. Brisbane, 2005.

CARISSIMI, E. Desenvolvimento do reator gerador de flocos (RGF): Aspectos teóricos e aplicações no tratamento de reuso de águas e efluentes. 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

EDZWALD, J. Principles and applications of dissolved air flotation. *Water Science and Technology*, v. 31, n.3, p. 1-23, 1995.

KROFTA M., WANG L.K. Flotation Engineering. Lenox Institute of Water Technology v.1, p.255, 2000.

MASSI, L.; SOUSA, S. R.; LALUCE, C.; JAFELICCI JUNIOR, M. Fundamentos e Aplicação da Flotação como Técnica de Separação de Misturas. *Revista Química nova na escola*, v. 28, p. 20-23, 2008.

MATTOS, M. R. U.; GIRARD, L. Caracterização físico-química e ensaios de adensamento em coluna do lodo produzido em uma Estação de Tratamento de Água de grande porte. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*. n. 28, p. 34-43, 2013.

NESSET, JE., HERNANDEZ, A.J., ACUNA, C.A., GOMEZ, C.O., FINCH, J.A. Some gas dispersion characteristics of mechanical flotation machines. *Minerals Engineering*.v.19, p. 807-815, 2006.

WANG LK. Adsorptive bubble separation and dispersed air flotation. Advanced physicochemical treatment processes. v 1. p 81-122, 2006.