



Pós-tratamento de lagoas de estabilização por tratamento físico-químico convencional e flotação

**Camila D' Bastiani¹, Janaina Iltchenko², Letícia Molin³, Raphael Bertotto⁴,
Lademir Luiz Beal⁵**

¹Universidade de Caxias do Sul (camiladbastiani@gmail.com)

²Universidade de Caxias do Sul (jiltchen@hotmail.com)

³Universidade de Caxias do Sul (letemolin@gmail.com)

⁴Universidade de Caxias do Sul (rapha.bertotto@gmail.com)

⁵Universidade de Caxias do Sul (llbeal@ucs.br)

Resumo

As lagoas de estabilização, embora apresentem uma série de vantagens para o tratamento biológico de efluentes, como por exemplo, baixo consumo energético e simplicidade de operação, frequentemente requerem pós-tratamento de forma a atingir os parâmetros de qualidade necessários para que os efluentes possam ser lançados em corpos hídricos. Este trabalho apresenta um estudo no qual foram empregados dois processos de tratamento físico-químico como forma de pós-tratamento destes efluentes: a coagulação, flocação e sedimentação convencionais e a flotação. No decorrer do estudo foi avaliada a dosagem ideal de coagulante através de ensaios de *jar test*, obtendo-se o resultado de $0,032 \text{ mg Al}^{+3}/\text{L}$. Em seguida foram realizados testes de flotação em equipamento do tipo flotateste utilizando-se a dosagem de coagulante previamente estabelecida e diferentes relações A/S. Os melhores resultados foram obtidos para uma relação igual a 0,361.

Palavras-chave: Coagulação, Flotação, Pós-Tratamento, Efluentes.

Área Temática: Tema 2 – Águas Residuárias.

Post-treatment of stabilization ponds by physical chemical treatment and flotation

Abstract

Although there are several advantages in the use of stabilization ponds for the biological treatment of wastewater, such as low power consumption and easy to manage it, this treatment technology requires a post-treatment for the effluent to achieve the quality parameters necessary for the wastewater be released in water bodies. This paper presents a study in which two kinds of physical chemical processes were used as a way to post-treat these effluents: the coagulation, flocculation and conventional sedimentation and the flotation. In the course of the study, the optimal dosage of coagulant was measured through jar tests experiments and it was concluded that the optimal dosage of coagulant for that effluent was $0.032 \text{ mgAl}^{+3}/\text{L}^{-1}$. After that, flotation tests were carried out in specific equipment using the previously established coagulant dosage and different A/S relation. The best results were achieved for the relation equals to 0.361.

Key words: Coagulation, Flotation, Post-Treatment. Effluents.

Theme Area: Theme 2 - Wastewater



1 Introdução

O tratamento de efluentes vem sendo estudado e otimizado devido a crescente preocupação com o meio ambiente, de forma que as melhorias obtidas venham a contribuir com a redução dos impactos ambientais negativos associados a efluentes. O esgoto sanitário é formado por diversas fontes, tais como: esgoto doméstico, esgoto comercial e esgoto industrial (OLIVEIRA & MADEIRA, 2014). O uso de lagoas de estabilização é o método mais comumente utilizado no tratamento de esgoto sanitário por demandar baixos custos de operação, sendo utilizado basicamente para remoção da matéria orgânica presente (LOPES, 2015). As lagoas de estabilização são sistemas de tratamento biológico em que a estabilização da matéria orgânica é realizada pela oxidação bacteriológica (oxidação aeróbia ou fermentação anaeróbia) e/ou redução fotossintética das algas. As lagoas de estabilização apresentam algumas vantagens, tais como: baixo consumo de energia, simplicidade na operação, boa tolerância a variação de cargas, além de o lodo formado ser utilizado como condicionador de solo. Porém, apresenta a desvantagem que para lançamento do efluente em corpos hídricos necessita um pós-tratamento (CORNELLI et al., 2014). Este trabalho tem como objetivo realizar o pós-tratamento de uma lagoa de estabilização através do processo de coagulação/flocação por adição de sulfato de alumínio e flotação por ar dissolvido para fins de remoção de turbidez. Foram estudados processos de coagulação, flocação e sedimentação utilizando ensaios de *jar test*. A melhor dosagem de coagulante obtida no *jar test* foi utilizada para realizar ensaios de flotação.

1.1 Coagulação e Flocação

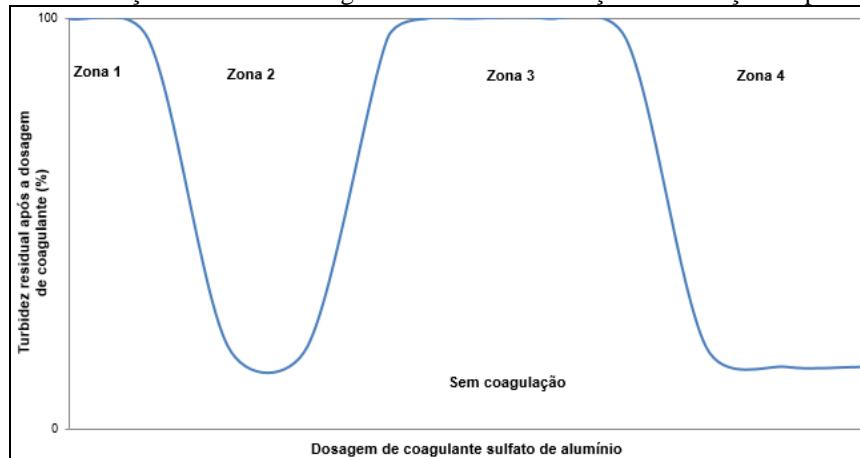
Os colóides, representados por partículas que tem uma faixa de tamanho de 1 nm a 0,1 nm, não sedimentam e não podem ser removidos por processos de tratamento físicos convencionais. Tais partículas apresentam carga superficial negativa, impedindo que se aproximem entre si, permanecendo no meio líquido se suas características não forem alteradas. A adição de coagulantes objetiva alterar o equilíbrio químico da solução, desestabilizando os colóides suspensos e promovendo a flocação. A coagulação resulta em dois fenômenos, portanto: o primeiro, químico, consiste na reação do coagulante com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva; o segundo, fenômeno físico, consiste no transporte das espécies hidrolisadas havendo contato com as impurezas presentes na água (DI BERNARDO & DANTAS, 2005). O mecanismo de coagulação/flocação é sensível a diversos fatores, a citar: tipo e dosagem de coagulantes, pH do efluente, natureza das substâncias produtoras de cor e turbidez, entre outros. O tipo e a dosagem ideal da quantidade de coagulantes são definidos em função principalmente da viabilidade econômica e das características do efluente. A remoção da turbidez está ligada diretamente com a dosagem de coagulante. Conforme observado no trabalho de Wei et al. (2015) a condição onde se dá a melhor remoção de turbidez é chamada de dosagem ótima de coagulante, acima dessa dosagem a remoção de turbidez diminui. Haja vista o exposto, testes de coagulação, como o *jar test*, são extensivamente usados para determinar as dosagens químicas ótimas no tratamento e a eficiência na remoção de sólidos. A Figura 1 ilustra o efeito da adição contínua de coagulante na turbidez remanescente após a coagulação.



5º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 5 a 7 de Abril de 2016

Figura 1 – Efeitos da adição contínua de coagulante na desestabilização e floculação de partículas coloidais



Fonte: Adaptado de Metcalf and Eddy (2003).

O coagulante sulfato de alumínio, quando adicionado a efluentes com pH baixo, sofre a hidrólise do íon alumínio e leva à formação, em especial, do íon Al^{3+} , entre outros. Quando adicionado a efluentes alcalinos, os íons Al(OH)_4^- podem ser considerados predominantes. No entanto a adição do coagulante sulfato de alumínio em condições de neutralidade leva à formação do precipitado $\text{Al(OH)}_{3(s)}$ e de CO_2 o qual é responsável pela redução do pH do efluente conforme a dosagem de coagulante aumenta, conforme Equações (1) a (6), descritas por Di Bernardo e Dantas (2005). A concentração total de alumínio é dada pela Equação (6).

$$\text{Al}^{3+} \rightarrow \log[\text{Al}^{3+}] = 9,66 - 3\text{pH} \quad (1)$$

$$\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+} \rightarrow \log [\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}] = 10,96 - 3\text{pH} \quad (2)$$

$$\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+} \rightarrow \log[\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}] = 8,58 - 4\text{pH} \quad (3)$$

$$\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+} \rightarrow \log[\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}] = 13,05 - 4\text{pH} \quad (4)$$

$$\text{Al}(\text{OH})_4^- \rightarrow \log[\text{Al}(\text{OH})_4^-] = \text{pH} - 13,91 \quad (5)$$

$$C_{T, \text{Al}} = [\text{Al}(\text{OH})^{2+}] + [\text{Al}^{3+}] + 6[\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}] + 8[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}] + 2[\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}] + [\text{Al}(\text{OH})_4^-] \quad (6)$$

Depois das operações de coagulação e floculação, a matéria em suspensão será separada do solvente por um processo físico, citando-se a sedimentação convencional, que é largamente empregada e a flotação, a ser discutida a seguir.

1.2 Flotação

A flotação é uma operação unitária utilizada no tratamento de águas residuárias como no tratamento de águas de abastecimento, sendo seu uso geralmente atrelado a clarificação. Consiste basicamente na separação da fase sólido-líquido, através do movimento ascendente de partículas, flocos, ou outros agregados presentes na fase líquida, onde as forças de empuxo predominam sobre as gravitacionais, seja por diferença de densidades ou pela introdução de microbolhas de ar que se aderem às partículas, através da diminuição do empuxo, arrastando-as ascensional em direção a superfície (DI BERNARDO & DANTAS, 2005). Consideram-se três mecanismos responsáveis pela aderência das bolhas de gás no material a ser flotado: (1) aderência das bolhas ascendentes de gás com a partícula suspensa ou precipitação direta delas sobre a partícula suspensa; (2) aprisionamento de bolhas de gás na estrutura dos flocos; (3) absorção e adsorção de bolhas de gás nos flocos durante a formação dos mesmos. Para que a flotação tenha um bom desempenho, a relação ar-sólidos (A/S), definida pela Equação (7), tem sido considerada um parâmetro significativo (DI BERNARDO et al, 1964).



5º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 5 a 7 de Abril de 2016

$$\frac{A}{S} = \frac{1,3 \cdot S_a (f \cdot P - 1)}{S_s} \quad (7)$$

Sendo:

A/S: Massa de ar liberado pela despressurização por massa de sólido presente no afluente (mg/mg)

S_a: solubilidade de ar na água à pressão atmosférica (mL/L)

S_s: Concentração de sólidos suspensos presentes no afluente (mg/L)

f : eficiência da dissolução do ar na água na pressão P

A quantidade de ar a ser fornecida passa a depender do volume de água a ser clarificado, e é normalmente maior, tendo em vista a necessidade de se garantir um elevado número de choques entre as partículas e as bolhas de ar, e, consequentemente, propiciar a adesão e o arraste dos sólidos para a superfície do líquido (COUTINHO, 1997). Segundo Wang et al. (2010), se uma menor quantidade ótima de ar é empregada no sistema de flutuação de ar, a eficiência de remoção dos sólidos é reduzida. Se uma quantidade excessiva de ar for usado, a energia é desperdiçada em ar comprimido em excesso. Independentemente de como as bolhas de gás e a fase dispersa interagir, o resultado desta interação é uma redução líquida da gravidade específica da fase dispersa (ar/partícula/aglomerado) e um aumento correspondente na velocidade de subida.

2 Metodologia

Foi realizada uma coleta do efluente proveniente de lagoas de estabilização tratando efluente sanitário localizadas no campus da Universidade de Caxias do Sul. Em seguida, foi realizada a caracterização do efluente segundo turbidez (NTU) e pH, os quais foram medidos, utilizando pHmetro Oakton Waterproof e turbidímetro Digimed DM-TV, respectivamente.

2.1 Ensaios de *jar test* (teste de jarros)

Buscando determinar a dosagem ideal de coagulante, foi realizado ensaio de *jar test*. O equipamento utilizado neste ensaio é composto por seis jarros, dotados de pás agitadoras em seu interior, que tem o intuito de promover a mistura dentro de cada jarro. A velocidade de rotação em cada jarro pode ser ajustada através de um regulador em rpm (rotações por minuto), conforme pode ser visto na Figura 2. Para os ensaios de coagulação/flocação foram preparados 5 jarros com 1,5 L de efluente de lagoas de estabilização previamente coletado. O coagulante utilizado foi o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) em uma concentração de 8% (m/v).

Figura 2 - Equipamento de *jar test* utilizado



Fonte: O Autor

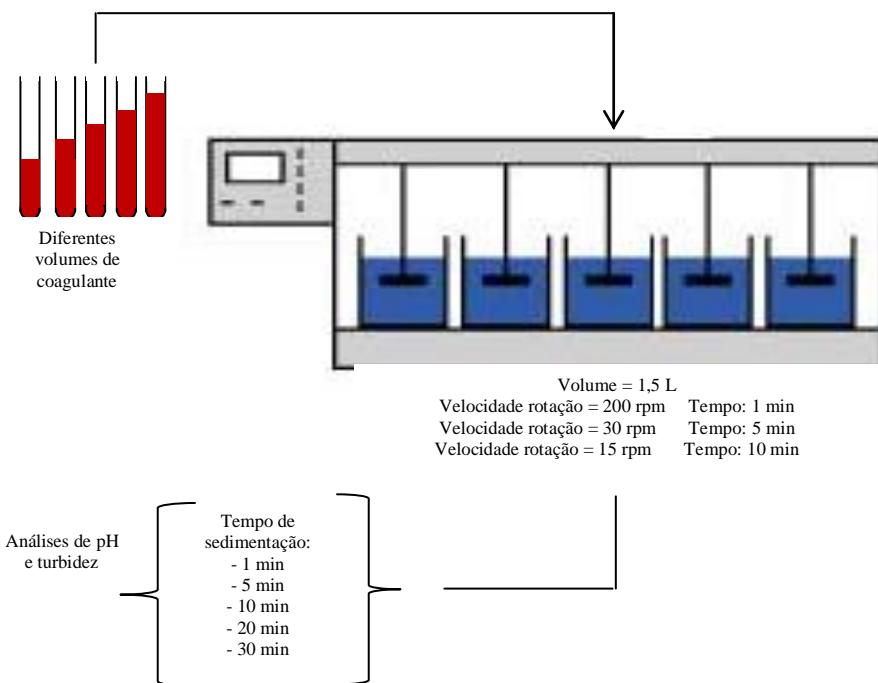


5º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 5 a 7 de Abril de 2016

Foram utilizadas dosagens crescentes de coagulante de modo a cobrir a faixa de floculação da água. Foram realizadas duas bateladas de *jar test*. Na primeira, as dosagens de coagulante utilizadas foram de 0,0126; 0,0316; 0,0632; 0,0947 e 0,1263 mg Al³⁺/L. De acordo com os resultados obtidos, a segunda batelada consistiu em um refinamento para a faixa de valores para a qual os melhores resultados foram obtidos, sendo realizada com as concentrações de 0,0189; 0,0253; 0,0379 e 0,0505 mg Al³⁺/L. O ensaio de *jar test* foi realizado de acordo com as seguintes etapas: 1) a uma velocidade de 200 rpm no aparelho de *jar test* foram adicionadas as diferentes dosagens de coagulante; 2) após um minuto a rotação foi reduzida para 30 rpm por durante 5 min; 3) em seguida a rotação foi reduzida para 15 rpm por 10 minutos e 4) a agitação foi cessada iniciando a etapa de sedimentação. Foram coletadas amostras do efluente nos tempos 1, 5, 10, 20 e 30 minutos e realizadas análises de turbidez e de pH. Foi ainda verificada a altura de lodo sedimentado após o final do tempo de sedimentação. A Figura 3 sumariza a sistemática utilizada nos ensaios de *jar test*.

Figura 3 - Esquema dos ensaios experimentais de jar test



Fonte: Adaptado de Vaz et al., 2010

2.2 Flotação por ar dissolvido

Uma vez determinada a concentração ótima de coagulante através do jartest, os ensaios de coagulação/flocação e flotação por ar dissolvido foram realizados em equipamento tipo flotatest (Aquaflot) constituído por tanque reservatório pressurizado em aço inox, com capacidade de 4,0 L (Figura4).



5º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 5 a 7 de Abril de 2016

Figura 4 - Aparato experimental para teste de Flotação por Ar Dissolvido (FAD).



Fonte: O autor.

3 Resultados e discussão

3.1 Processo Físico-Químico Convencional

Os experimentos de *jar test* resultaram nos dados compilados constantes na Tabela 1 a seguir. Cada reator é representado pelo número seguido da letra R e pela fase do experimento (J1 ou J2), uma vez que foram realizadas duas sequências de *jar test*. A condição em cada reator é diferenciada pelo volume de solução de coagulante $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 8% adicionada, dada em mililitros de solução coagulante por litro de efluente. Os dados experimentais podem ser visualizados de forma gráfica na Figura 5, na qual se evidencia a melhor condição de turbidez residual para o universo ensaiado, avaliada em conjunto com a coluna de lodo gerada.

Tabela 1: Resultados obtidos para os experimentos de jartest referentes a turbidez, pH e altura de lodo.

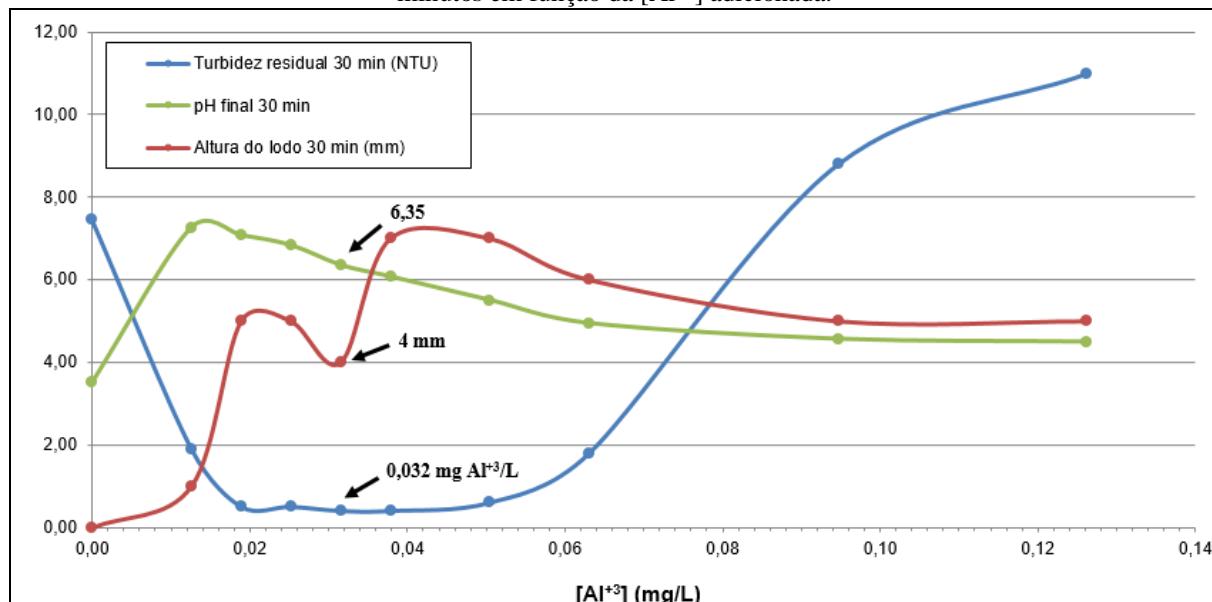
Reator-Jartest	R1-J1	R1-J2	R2-J2	R2-J1	R3-J2	R5-J2	R3-J1	R4-J1	R5-J1
Solução $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (mL/L)	0,667	1,000	1,333	1,667	2,000	2,667	3,333	5,000	6,667
$[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$ (mg/L)	0,080	0,120	0,160	0,200	0,240	0,320	0,400	0,600	0,800
$[\text{Al}^{+3}]$ (mg/L)	0,0126	0,0189	0,0253	0,0316	0,0379	0,0505	0,0632	0,0947	0,1263
Altura do lodo (mm)	1	5	5	4	7	7	6	5	5
Tempo (min)	Turbidez (NTU)								
01	5,1	8,6	12,4	12,6	15,3	17,0	26,1	37,0	43,9
05	2,4	1,4	1,9	1,7	2,4	3,7	5,2	17,5	19,3
10	2,1	1,0	0,9	0,7	1,1	1,6	2,3	9,9	12,1
20	2,8	0,7	0,5	0,5	0,9	0,9	2,0	9,5	10,9
30	1,9	0,5	0,5	0,4	0,4	0,6	1,8	8,8	11,0
Tempo (min)	pH								
01	7,01	6,93	6,67	5,85	6,01	5,52	4,76	4,54	4,44
05	7,07	7,01	6,79	6,00	6,00	5,51	4,89	4,54	4,30
10	7,16	6,85	6,76	6,30	6,03	5,46	4,58	4,56	4,51
20	7,22	6,93	6,71	6,33	6,11	5,58	4,90	4,55	4,48
30	7,26	7,07	6,83	6,35	6,07	5,50	4,94	4,56	4,49

A Figura 5, obtida a partir dos resultados, ilustra de forma satisfatória a relação entre a dosagem de coagulante e a turbidez residual do efluente, relacionando-se a Figura 1. A menor dosagem de coagulante não é suficiente para desestabilizar a maioria das partículas, sendo que a coagulação ocorre de forma parcial. Com o aumento da concentração de Al^{+3} adicionado, na faixa de 0,02 a 0,05, tem-se boa coagulação, com rápida aglutinação dos coloides. A partir desta faixa, com o aumento da dosagem de coagulante, os coloides se estabilizam na solução,



e não ocorre boa coagulação. É previsto que, continuando-se a aumentar a dosagem de coagulante, atinja-se novamente um estado em que os coloides serão desestabilizados, na qual se observará boa coagulação. No entanto, nesta condição, é prevista formação significativa de lodo, decorrente da quantidade superior de coagulante adicionado. Sendo assim, entende-se que a menor quantidade de coagulante possível deve ser adicionada, pois para tal também se produzirá menos lodo. Essa quantidade também está identificada na Figura 5, para a qual obteve-se turbidez residual de 0,4 NTU.

Figura 5 - Turbidez remanescente, pH e altura de lodo sedimentado ao final do experimento de *jar test* de 30 minutos em função da $[Al^{+3}]$ adicionada.



3.2 Flotação

A análise dos sólidos suspensos totais (SST) foi realizada em triplicata e o valor médio obtido foi de 212,67 mg/L para uma amostra de efluente bruto de 50 mL. Os valores obtidos na análise de sólidos foram utilizados na obtenção do parâmetro relação A/S, constante na Tabela 2, conforme a Equação 7. Nesta mesma tabela, encontram-se os dados de turbidez residual das amostras submetidas ao experimento de flotação.

Tabela 2: Resultados obtidos para os experimentos de flotação referentes a turbidez e relação A/S.

		BRUTO	P1	P2	P3	P4
Pressão (atm)		0	0,987	1,974	2,961	3,948
Razão de reciclo		Turbidez residual (NTU)				
		BRUTO	P1	P2	P3	P4
350/1000	0,35	7,46	20,9	5,9	2,6	1,8
700/1000	0,7	7,46	7,46	3,2	2,4	1,5
1000/1000	1	7,46	5	2,6	2,3	1,3
f		Relação A/S				
		BRUTO	P1	P2	P3	P4
0,8	0	0,0903	0,1805	0,2708	0,3610	

f: fração de ar dissolvido na pressão P.

Os resultados obtidos confirmam que, conforme esperado, quanto maior a relação A/S, menor a turbidez residual. Essa relação está representada graficamente na Figura 6, na qual cada linha representa uma razão de reciclo. O melhor resultado de turbidez residual refere-se à

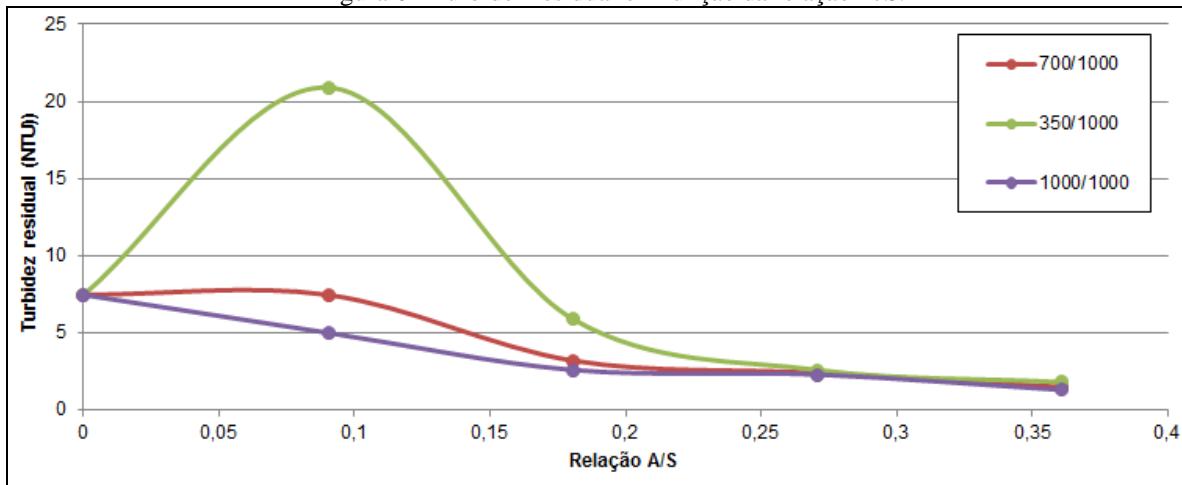


5º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 5 a 7 de Abril de 2016

relação A/S equivalente à 0,361, obtida na razão de reciclo 1000/1000 e uma pressão de 3,9 atm, igual a 1,3 NTU.

Figura 6 - Turbidez residual em função da relação A/S.



4 Conclusão

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que não apenas a turbidez residual, mas também a altura de lodo são funções da dosagem de coagulante. Por esse motivo, a realização do teste de jarros é uma premissa básica para a realização do tratamento de efluentes de forma a obter resultados de qualidade previsíveis a custos isentos de desperdícios. Os resultados para o teste de flotação evidenciaram que, para uma mesma dosagem de coagulante, quanto maior a relação A/S, menores os valores de turbidez residual. Neste caso, a relação A/S foi afetada diretamente pela razão de reciclo e pela pressão. Os resultados evidenciaram que, para a dosagem escolhida de coagulante, o *jar test*, o qual emprega a sedimentação convencional como operação de separação física, teve resultados de turbidez residual (0,4 NTU) melhores do que a operação de flotação (1,3 NTU).

Referências

- CORNELLI, R. et al. **Métodos de tratamento de esgotos domésticos: uma revisão sistemática**. Revista de estudos ambientais. v.16, n. 2, p.20-36, 2014.
- COUTINHO, Weber. **Emprego da flotação a ar dissolvido no tratamento de cursos d'água**: avaliação de desempenho da estação de tratamento dos córregos Ressaca e Sarandi afluentes à Represa da Pampulha. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia da UFMG . Belo Horizonte. 2007.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. São Carlos, SP: RiMa, 2005. 2 v.
- DI BERNARDO, L.; RAZABONI, J. D.; DE REZENDE, R. J. Emprego da flotação por ar dissolvido para tratamento de despejos líquidos industriais provenientes de laticínios. **Revista DAE**, v. 42, n. 130, p. 44-53, 1982.



5º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 5 a 7 de Abril de 2016

FABRETI, A. A. **Pós-tratamento de efluente de lagoa de estabilização através de processo físico-químico.** 2006. 159f. Dissertação (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo), São Paulo, 2006.

LOPES, T. R. **Caracterização do esgoto sanitário e lodo proveniente de reator anaeróbio e de lagoas de estabilização para avaliação da eficiência na remoção de contaminantes.** 2015. 122f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015.

METCALF AND EDDY; TCHOBANOGLOUS, George; BURTON, Franklin L.; STENSEL, H. David. **Wastewater engineering: treatment and reuse.** 4. ed. Boston, US: McGraw-Hill, 2003. xxviii, 1819p. (The McGraw-Hill series in civil and environmental engineering) ISBN 0070418780.

NUNES, Daniel Guedes; COUTO, Hudson Jean Bianquini; FRANÇA, Silvia Cristina Alves. Aplicação do processo de flotação por ar dissolvido no tratamento de efluentes e na recuperação de finos da industria mineral. **Anais da XVI Jornada de Iniciação Científica, CETEM/MCT:** Rio de Janeiro, 2008.

OLIVEIRA, L. A. MADEIRA, V. S. **Tratamento terciário de esgoto sanitário visando o reúso da água.** Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014.

VAZ, L. G. L. et al. Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de galvanoplastia. **Eclética Química.** São Paulo, v.35, n. 4, p. 45-54, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eq/v35n4/06.pdf>>. Acesso em: 30 ago. 2015.

WANG, L.K.; SHAMAS, N.K.; SELKE, W.A.; AULENBACH, D.B. **Flotation Technology.** Handbook of Environmental Engineering. Human Press. V.12. 680p. 2010.

WEI, N. et al. Coagulation behavior of polyaluminum chloride: Effects of pH and coagulant dosage. **Chinese Journal of Chemical Engineering.** China, v.23, n.6 p. 1041-1046, 2015. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1004954115000804>>. Acesso em: 04 nov. 2015.