

# Aplicação de polímeros aniônico e catiônico na flotação por ar dissolvido como forma de pós-tratamento de efluente de indústria de papel e celulose

Application of cationic and anionic polymers in dissolved air flotation as a means of post-treatment of pulp and paper industry wastewater

Larissa Quartaroli<sup>1</sup>, Joice Cristini Kuritza<sup>2</sup>, Grasielle Soares Cavallini<sup>3</sup>,  
Carlos Magno de Souza Vidal<sup>4</sup> e Jeanette Beber de Souza<sup>4</sup>

## Resumo

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o desempenho da flotação por ar dissolvido no pós-tratamento de efluente de lodos ativados de uma indústria de papel e celulose. Os testes variando dosagens de coagulante e polímeros aniônico e catiônico foram realizados em escala de laboratório com o uso do equipamento flotateste. Em todos os ensaios foram fixados os valores de mistura rápida ( $500 \text{ s}^{-1}$ ), o tempo de mistura rápida (60 s), a pressão de saturação (5 bar) e o tempo de saturação de ar na câmara de saturação (15 min), os demais parâmetros foram investigados e variados durante a pesquisa. Os testes foram divididos em três etapas, onde na primeira etapa foram realizados os ensaios preliminares, apenas com o uso do coagulante, na segunda etapa ensaios com combinações do coagulante e do polímero aniônico e na terceira com o polímero catiônico. Os resultados indicaram que a flotação com polímero catiônico melhorou as características do efluente, com redução de 90% de turbidez, 85% da cor aparente, 89% de cor verdadeira e 69% de DQO, utilizando dosagem de PAC de  $175 \text{ mg.L}^{-1}$  e de polímero catiônico de  $50 \text{ mg.L}^{-1}$ , com velocidade de flotação de  $9,0 \text{ cm/mim}$  e tempo de floculação de 7 minutos, afirmando a potencialidade da aplicação da flotação por ar dissolvido no pós-tratamento de efluentes da indústria de papel e celulose.

**Palavras-chave:** Tratamento de efluente industrial, papel e celulose, flotação por ar dissolvido, polímero.

## Abstract

The main objective of this study was to evaluate the performance of the dissolved air flotation in post-treatment of effluent from activated sludge of a pulp and paper industry. Tests varying the dosage of coagulant and of cationic and anionic polymers were performed on a laboratory scale, using the equipment flotatest. In all essays, values of rapid mixing ( $500 \text{ s}^{-1}$ ), the rapid mixing time (60 s), the saturation pressure (5 bar) and air saturation time in the saturation chamber (15 min) were set. The other parameters were investigated and varied during the search. Tests were divided into three stages. In the first stage, preliminary tests were performed only with the use of the coagulant. In the second stage, the coagulant was put together with anionic polymer. In the third stage, the coagulant was mixed with cationic polymer. The results indicated that flotation with cationic polymer improved the characteristics of the effluent, with 90% reduction of turbidity, 85% of the apparent color, 89% of the true color and 69% of COD, using a dosage of  $175 \text{ mg.L}^{-1}$  of PAC and  $50 \text{ mg.L}^{-1}$  of cationic polymer with flotation speed of  $9 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$  and flocculation time of 7 minutes. This confirms the potential of the dissolved air flotation in the post-treatment of wastewater from pulp and paper.

**Keywords:** Treatment of industrial wastewater, pulp and paper, dissolved air flotation, polymer.

## INTRODUÇÃO

O Brasil conta atualmente com uma área aproximada de 509,8 milhões de hectares de florestas nativas ricas em biodiversidade (59,9

% da área total do Brasil), 6,8 milhões de hectares de florestas plantadas (0,8 % da área total do Brasil), sendo que 4.515.730 ha correspondem a povoamentos de espécies de *Eucalyptus* spp., 1.794.720 ha de *Pinus* spp. e 472,05 ha plan-

<sup>1</sup>Engenharia Ambiental, Doutoranda em Engenharia Civil. UFV – Universidade Federal de Viçosa. Av. PH Rolfs s/n – Campus Universitário – CEP: 36570-000 – Viçosa-MG – E-mail: [larissaquartaroli@yahoo.com.br](mailto:larissaquartaroli@yahoo.com.br).

<sup>2</sup>Engenharia Ambiental, Doutoranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500 – CEP: 91501-970 – Porto Alegre-RS – E-mail: [joicekuritza@yahoo.com.br](mailto:joicekuritza@yahoo.com.br).

<sup>3</sup>Doutoranda em Química. Técnica do Laboratório de Saneamento Ambiental e Qualidade da Água. UNICENTRO – Universidade Estadual do Centro Oeste. PR 153 – Km 07 – Riozinho – CEP: 84500-000 – Irati-PR – E-mail: [grasielle@irati.unicentro.br](mailto:grasielle@irati.unicentro.br).

<sup>4</sup>Professor(a) Doutor(a). UNICENTRO – Universidade Estadual do Centro Oeste, Departamento de Engenharia Ambiental. PR 153 – Km 07 – Riozinho – CEP: 84500-000 – Irati-PR – E-mail: [cacavidal@yahoo.com.br](mailto:cacavidal@yahoo.com.br) [jeanette@yahoo.com.br](mailto:jeanette@yahoo.com.br)

tados com outras espécies (MMA, 2010). Tais dados reforçam a importância das florestas para o Brasil, que afetam diretamente a economia, a sociedade e o meio ambiente como um todo.

No âmbito econômico, o setor florestal responde por uma parcela significativa na soma das riquezas geradas pelo país, responsável por empregos e por movimentar a economia em suas várias etapas. As estatísticas econômicas mostram que o setor florestal brasileiro participa com aproximadamente 8% das exportações, sendo responsável por 5% do PIB nacional.

A indústria madeireira abrange todo o processamento da madeira, produção de sementes e mudas, implantação dos povoamentos, tratamentos silviculturais, colheita, transporte florestal e beneficiamento da madeira. Diversos são os produtos finais advindos da madeira, podendo ser madeiros (painéis de madeira, móveis, papel e celulose, lenha, carvão etc) ou não-madeiros (frutos, resinas, gomas, cipós etc).

Grande parte do mercado de produtos florestais é composto pelo comércio de papel e polpas celulósicas, o Brasil é líder mundial na produção de celulose de fibra curta (*Eucalyptus*), no ano de 2011 fechou em 4º lugar na produção de celulose e 9º na de papel. No ano de 2012, as indústrias brasileiras produziram 13,977 milhões de toneladas de celulose e 10,260 milhões de toneladas de papel.

A produção brasileira de celulose e papel, nos últimos 42 anos, apresentou um crescimento médio de 7,1% a.a. de celulose e 5,5% a.a. de papel. (BRACELPA, 2013)

No ano de 2012, a indústria de papel e celulose foi responsável por US\$ 6,7 bilhões em exportações, gerando mais de 128 mil empregos diretos e 640 mil indiretos (BRACELPA, 2013).

O Brasil produz celulose e papel exclusivamente de florestas plantadas de eucalipto e pinus, sendo que 81,6% da produção são provenientes dos povoamentos de eucalipto, 17,2% dos povoamentos de pinus e 1,2% de outras espécies (BRACELPA, 2011). A madeira de pinus é denominada conífera ou *softwood* (madeira macia) e possui fibras longas, já a madeira de eucalipto é conhecida por folhosa ou *hardwood* (madeira dura) e possui fibras curtas.

Apesar de sua indiscutível importância no âmbito econômico, as atividades da indústria de papel e celulose tem grande potencial poluidor. Utilizam grandes volumes de água em seus processos, cerca de 80m<sup>3</sup>/ton de polpa, e como consequência há geração de efluentes com alta carga orgânica, sólidos em suspensão e cor.

A água na indústria de papel e celulose é utilizada em várias etapas, como na lavagem de toras e cavacos, meio de transporte de fibras, polpação, branqueamento, sistemas de resfriamento, limpeza, dentre outros. Após passar por essas etapas a água adquire elevadas concentrações de matéria orgânica e de substâncias muitas vezes tóxicas, compostos orgânicos e inorgânicos de cloro, tornando-se uma importante fonte de poluição (POKHREL; VIRARAGHAVAN, 2004). Essas águas, ao serem despejadas sem tratamento adequado nos corpos d'água, alteram sua qualidade, causando danos à saúde humana, ao meio ambiente e a biota aquática.

A maioria das indústrias de papel e celulose geralmente possui um sistema básico de tratamento de seus efluentes, com tratamento primário seguido de tratamento secundário, usualmente biológico. Esses tratamentos são eficientes na remoção de sólidos suspensos e compostos orgânicos biodegradáveis, todavia, quando empregados como única alternativa de tratamento, muitas vezes não atendem os padrões de emissão estabelecidos pela legislação ambiental brasileira para manutenção da qualidade dos corpos d'água receptores, bem como necessitam de adequações para reúso, sendo necessária então a implantação de algum tipo de pós-tratamento ou tratamento terciário (MEDEIROS, 2008).

Os processos físico-químicos como coagulação, floculação, sedimentação, flotação, filtração e oxidação surgem como alternativas atraentes ao pós-tratamento de efluentes, tanto para o atendimento aos padrões de lançamento em corpos receptores como para reutilização/ reuso desse efluente, minimizando assim o consumo de água na própria indústria.

A flotação por ar dissolvido (FAD) apresenta grandes potencialidades no tratamento de águas e águas residuárias, com aplicação, por exemplo, como alternativa de pós-tratamento na clarificação do efluente final, o que é bastante apreciável em uma indústria de papel e celulose, uma vez que a tecnologia FAD apresenta excelente capacidade de remoção de sólidos suspensos, parcela da matéria orgânica dissolvida, bem como a redução de teores de gases odoríferos. Segundo Reali (1991) uma das primeiras aplicações da flotação por ar dissolvido foi na indústria de papel, na recuperação de fibras.

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho da FAD como alternativa de pós-tratamento de efluente de uma indústria de papel e celulose.

## MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado em três etapas: na etapa 1 foram realizados os ensaios preliminares com o uso apenas de coagulante, nas etapas 2 e 3 os tratamentos com combinações de coagulante e polímeros aniônico e catiônico, respectivamente.

O desempenho dos tratamentos por FAD foi avaliado com base na remoção dos parâmetros: turbidez, cor aparente, cor verdadeira e Demanda Química de Oxigênio (DQO).

Os ensaios foram realizados em um flotateste, empregando-se amostras de efluente provenientes de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de uma indústria de papel e celulose que possui capacidade de tratamento de 3600 m<sup>3</sup>/h.

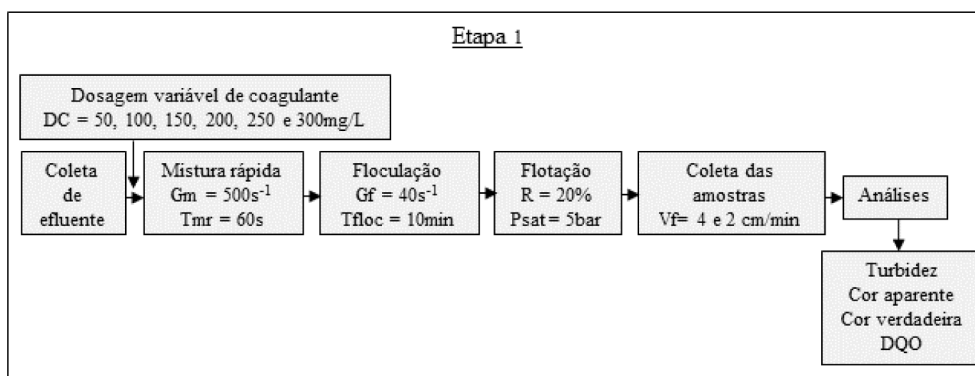
A referida ETE possui em sequência as unidades: calha parshall, grade, caixa de areia, decantador primário, reator biológico aerado de crescimento aderido (sistema patenteado de-

nominado *Floobed*), tanque de aeração e decantador secundário. Os ensaios foram realizados com amostras de efluente coletadas na saída do decantador secundário.

Inicialmente foi realizada a caracterização físico-química do efluente de acordo com os procedimentos indicados no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1998), em que foram analisados os parâmetros: turbidez, cor aparente, pH, sólidos totais, sólidos suspensos totais, DQO, fósforo, nitrogênio amoniacal e alcalinidade.

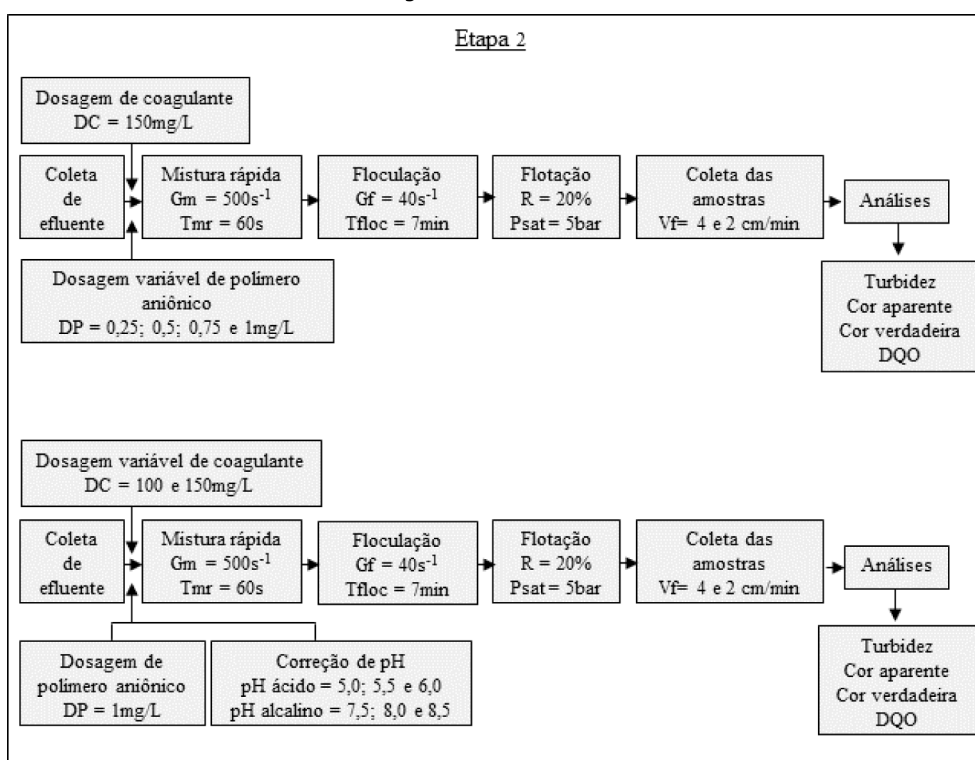
Os ensaios de tratabilidade do efluente foram realizados em um *flotateste* de bancada da Nova Ética de acordo com metodologia proposta por Di Bernardo e Centurione Filho (2003).

Os protocolos de ensaios das três etapas, com as diferentes condições operacionais estudadas, bem como as análises realizadas encontram-se apresentados nas Figuras 1, 2 e 3.



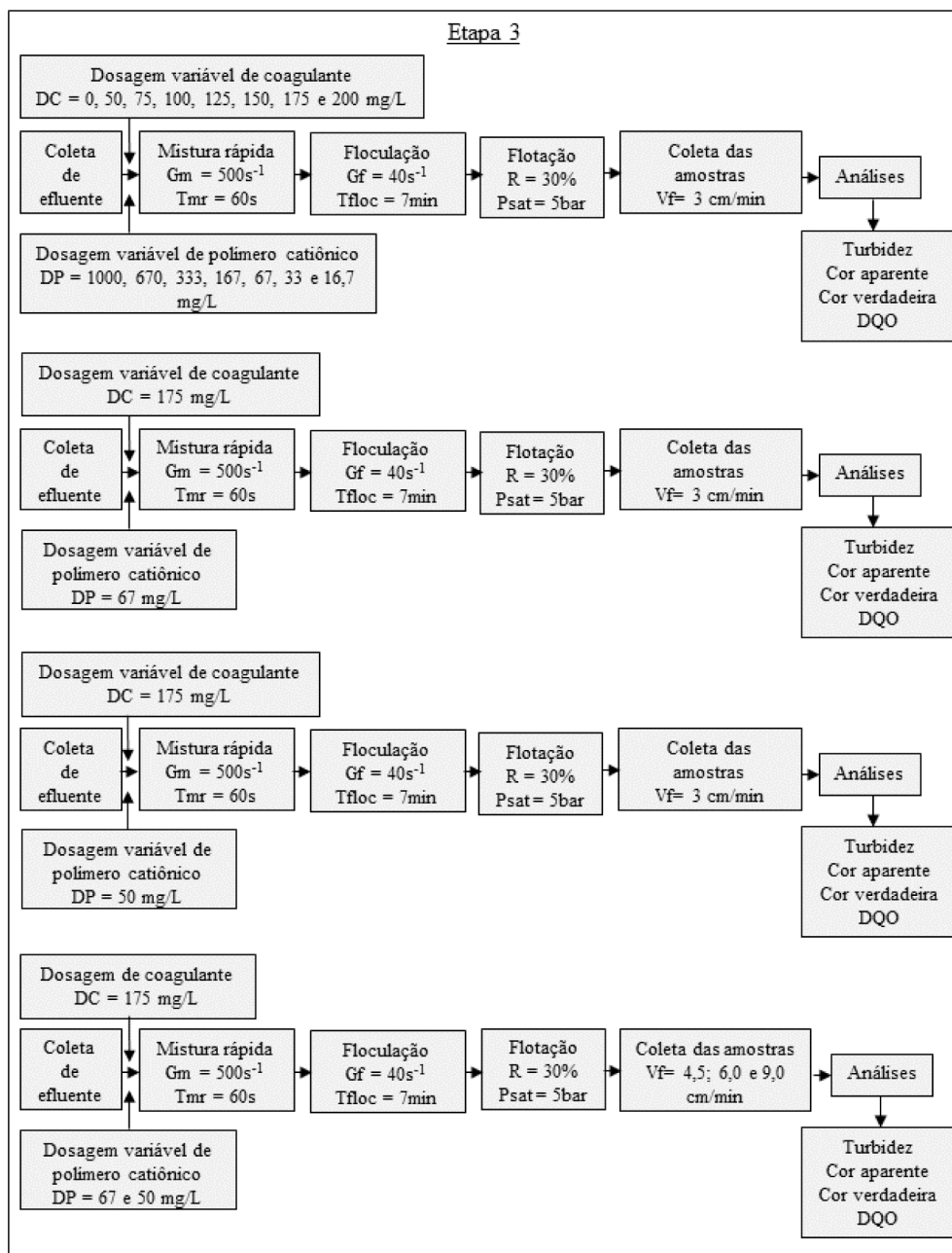
**Figura 1.** Procedimentos dos ensaios com o flotateste realizados na Etapa 1.

**Figure 1.** Procedures tested with flotatest in stage 1.



**Figura 2.** Procedimentos dos ensaios com o flotateste realizados na Etapa 2.

**Figure 2.** Procedures tested with flotatest in stage 2.



**Figura 3.** Procedimentos dos ensaios com o flotateste realizados na Etapa 3.  
**Figure 3.** Procedures tested with flotatest in stage 3.

Para a realização dos ensaios de Flotação alguns parâmetros foram fixados segundo valores da literatura (PENETRA, 1998; SANTOS, 2006): pressão de saturação = 5 bar, tempo de saturação do ar na câmara de saturação = 15 min, gradiente de mistura rápida =  $500\text{ s}^{-1}$  (270 rpm), tempo de mistura rápida = 60 s e gradiente médio de mistura lenta de  $40\text{ s}^{-1}$  (55 rpm). Utilizou-se como coagulante o Cloreto de Polialumínio (PAC) e como auxiliares de floculação o polímero levemente aniônico de alto peso molecular (Praestol 2515) e o polímero catiônico, em emulsão, de alto peso molecular (Retex EC 340).

Na Etapa 1 testou-se a faixa de dosagem de coagulante de 50 a 300  $\text{mg.L}^{-1}$  visando verificar qual a melhor para ser utilizada no tratamento por flotação.

A partir dos resultados obtidos na Etapa 1 seguiu-se para a Etapa 2, em que testou-se a melhor dosagem de coagulante associada com polímero aniônico e em diferentes faixas de pH, a fim de tentar reduzir o consumo de ambos. Na Etapa 2 reduziu-se o tempo de floculação para 7 minutos, uma vez que foi constatado, na etapa anterior, uma rápida formação de flocos.

Na Etapa 3 variaram-se as dosagens de coagulante conciliado com polímero catiônico. Iniciou-se a partir da dosagem de polímero de 100 mL por litro ( $1\text{g.L}^{-1}$ ), dose recomendada pelo fabricante. Observada a excessiva quantidade de polímero, reduziram-se as doses até alcançar eficiências de remoção em baixas dosagens. Elevou-se a velocidade de flotação de 3 cm/min, adotada nos primeiros ensaios, para 4,5; 6,0 e 9,0 cm/

min, intencionando-se a otimização do sistema com taxas de aplicação hidráulicas maiores.

## RESULTADOS

Na Tabela 1 encontram-se as características das amostras de efluente que foram coletadas para a realização dos ensaios das Etapas 1, 2 e 3.

De acordo com a Tabela 1, é possível observar que os efluentes apresentam disparidade entre suas qualidades. Tais oscilações qualitativas são consideradas normais em efluentes industriais, por dependerem de características de processo e produção da indústria.

Na Tabela 2 são apresentados os valores das eficiências de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO, para a Etapa 1, na unidade de flotação, para diferentes dosagens de coagulante e duas velocidades de flotação.

Nota-se, ao observar a Tabela 2, que as eficiências de remoção foram baixas em geral, fato que pode ser explicado devido à qualidade do efluente, com baixas concentrações de partículas. Efluentes contendo baixo teor de turbidez (6,18 uT) e baixa concentração de sólidos suspensos totais (8 mg.L<sup>-1</sup>) dão origem a flocos de

baixa densidade que resultam em problemas relacionados a redução de eficiência do processo de flotação.

Costanzi e Daniel (2002) obtiveram eficiências de remoção de 89,76% de DQO, 98,68% de turbidez e 98,03% de SST para um efluente de máquina de papel, após tratamento por FAD com velocidade de 150 m/d (10,41 cm/min), 60 mg.L<sup>-1</sup> de cloreto férrico e porcentagem de recirculação de 18%. O efluente tratado possuía parâmetros com valores elevados, a saber: 979 uT, 713 mg.L<sup>-1</sup> de DQO e 815 mg.L<sup>-1</sup> de SST. Os autores obtiveram elevadas eficiências de remoção, o que está relacionado à maior facilidade de coagular um efluente com maior concentração de partículas.

No entanto, efluentes com baixa turbidez e cor elevada, como o do presente estudo, são de difícil coagulação.

Observa-se um aumento dos valores remanescentes de turbidez e cor aparente a partir da dosagem de 200 mg.L<sup>-1</sup> de coagulante, possivelmente ocorrido pela própria adição elevada de coagulante, em que houve precipitação química do material suspenso, que resultou na formação de flocos que não foram removidos pela flota-

**Tabela 1.** Caracterização físico-química das amostras de efluente submetidas aos ensaios de flotação.

**Table 1.** Physicochemical characterization of effluent samples subjected to flotation tests.

Parâmetro	Etapa 1 e 2	Etapa 3	
		Ensaio 1 e 2	Ensaio 3 e 4
ST (mg.L <sup>-1</sup> )	1165	1732	-
SST (mg.L <sup>-1</sup> )	8	84	-
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	150	558	583
DBO (mg.L <sup>-1</sup> )	2,15	18,25	23
Temperatura (°C)	23,8	25,7	18,5
pH	7,8	7,5	7,5
Turbidez (uT)	6,18	56	61,5
Cor aparente (uC)	364	2495	1884
Cor verdadeira (uC)	294	2195	1784
Fósforo (mg.L <sup>-1</sup> )	<0,1	0,42	0,2
Nitrogênio Amoniacal (mg.L <sup>-1</sup> )	<0,1	<0,1	-
Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> )	74	39,56	-

**Tabela 2.** Eficiências de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO obtidas nos diferentes experimentos realizados na Etapa 1.

**Table 2.** Efficiencies of removing turbidity, apparent color, true color and COD obtained in different experiments in stage 1.

DC (mg.L <sup>-1</sup> )	pH Coag.	Turbidez (%)		Cor A (%)		Cor V (%)		DQO (%)	
		Vf1	Vf2	Vf1	Vf1	Vf1	Vf1	Vf1	Vf2
50	7,4	17	7	8	8	63	64	13	17
100	7,2	11	0	15	15	67	68	13	15
150	7,0	9	18	16	17	71	71	22	25
200	6,8	-	-	-	-	63	65	16	16
250	6,7	-	-	-	-	66	67	16	17
300	6,6	-	-	-	-	65	65	11	17

Onde: Vf1 = 4cm/min; Vf2 = 2cm/min. Os espaços em branco (-) indicam aumento do valor remanescente.

ção. Costanzi; Reali e Daniel (2000) em estudo da tratabilidade do efluente da máquina de papel por processos físico-químicos, também observaram o aumento da turbidez remanescente em ensaios com flotação, principalmente nas dosagens de cloreto férrico de 60 mg/L e velocidade de flotação de 300 m/d (20,83 cm/min).

As maiores eficiências de remoção foram obtidas para a dosagem de coagulante de 150 mg.L<sup>-1</sup> e velocidade de flotação de 2 cm/min em que os valores residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO foram respectivamente de 5,04 uT, 302 uC, 85 uC e 112 mg.L<sup>-1</sup>.

A fim de melhorar o desempenho da flotação fez-se uso de polímero aniônico juntamente com o coagulante. Foram testadas quatro dosagens de polímero (0,25; 0,50; 0,75 e 1,0 mg.L<sup>-1</sup>). Os resultados dos valores das eficiências de remoção dos parâmetros avaliados estão expostos na Tabela 3.

A partir da Tabela 3 pode-se observar que a melhor configuração obtida nessa fase foi para a dosagem de 1mg/L de polímero aniônico e velocidade de flotação de 2 cm/min. As menores dosagens de polímero aplicadas não foram eficientes, pois elevaram a concentração de sólidos em suspensão, aumentando os valores de turbidez e cor aparente na maioria dos ensaios.

Os valores residuais obtidos na melhor configuração dessa fase foram: 6,73 e 4,43 uT de turbidez, 131 e 123 uC de cor aparente, 54 e 51 uC de cor verdadeira e 61 e 60 mg.L<sup>-1</sup> de DQO, para as velocidades de flotação 4 e 2 cm/min, respectivamente.

Schoenals (2006) testou diferentes tipos e dosagens de coagulantes combinados com o polímero aniônico FLONEX 9073, no tratamento primário de efluentes de abatedouros de aves, e teve como ótima dosagem a combinação de PAC e polímero aniônico nas concentrações de 80 mg.L<sup>-1</sup> e 1,5 mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente. A dosagem de PAC foi a maior em comparação com os coagulantes férricos, porém, o consumo de polímero foi menor. Nesse ensaio obteve-se remoção de 70,25% de cor, 83,26% de turbidez, 87,5% de SST e 59,8% de DQO.

Dias e Pereira (2007) alcançaram valores residuais de 19,56 uT de turbidez e 312 uH de cor aparente empregando a flotação como pós tratamento de efluentes sanitário de reator UASB, com dosagens de 90 mg.L<sup>-1</sup> de cloreto férrico e 1mg.L<sup>-1</sup> de polímero aniônico, tendo na saída do reator 455 uH de cor aparente e 42,9 uT de turbidez.

Com o intuito de otimizar o tratamento por FAD fez-se ajuste do pH inicial do efluente com hidróxido de sódio (NaOH) e ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). As eficiências de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO obtidas no segundo ensaio da Etapa 2, nos diferentes valores de pH, estão exibidos na Tabela 4.

Observando a Tabela 4 nota-se que os melhores percentuais de remoção, no que se refere a turbidez, cor aparente e DQO, encontram-se entre o pH 7,5 e 8,0, que era o pH natural do efluente, fato este que dispensaria a correção do pH. Os resultados para essas dosagens de coagulante foram

**Tabela 3.** Eficiências de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO obtidas nos diferentes experimentos realizados na Etapa 1.

**Table 3.** Efficiencies of removing turbidity, apparent color, true color and COD obtained in different experiments performed in stage 1.

DC (mg.L <sup>-1</sup> )	DP (mg.L <sup>-1</sup> )	pH Coag.	Turbidez (%)		Cor A (%)		Cor V (%)		DQO (%)	
			Vf1	Vf2	Vf1	Vf2	Vf1	Vf2	Vf1	Vf2
150	0,25	6,8	-	-	-	-	68	68	22	22
	0,50	6,9	-	-	-	4	66	74	24	38
	0,75	6,9	-	-	9	45	67	67	43	29
	1,00	6,9	-	28	64	66	82	83	59	60

Onde: Vf1 = 4cm/min; Vf2 = 2cm/min. Os espaços em branco (-) indicam aumento do valor remanescente.

**Tabela 4.** Eficiências de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO obtidas nos diferentes experimentos realizados no segundo ensaio da Etapa 2.

**Table 4.** Efficiencies of removing turbidity, apparent color, true color and COD obtained in different experiments performed in the second test of stage 2.

DC (mg.L <sup>-1</sup> )	pH	pH Coag.	Turbidez (%)		Cor A (%)		Cor V (%)		DQO (%)	
			Vf1	Vf2	Vf1	Vf2	Vf1	Vf2	Vf1	Vf2
150	5,0	4,8	-	-	35	52	94	91	45	60
	5,5	5,1	-	-	-	-	93	92	29	30
	6,0	5,7	-	-	53	59	89	89	60	61
	7,5	6,9	7	20	66	68	71	72	56	61
	8,0	7,5	-	21	63	68	70	72	58	60
	8,5	7,9	-	15	65	56	70	71	58	54

Onde: Vf1 = 4cm/min; Vf2 = 2cm/min. Os espaços em branco (-) indicam aumento do valor remanescente.

satisfatórios, apresentando valores residuais para pH 7,5 de 5,73 e 4,92 uT de turbidez, 123 e 115 uC de cor aparente, 84 e 82 uC de cor verdadeira e 66 e 58 mg.L<sup>-1</sup> de DQO, para as velocidades de flotação de 4 e 2 cm/min, respectivamente, residuais bem inferiores às amostras brutas.

No parâmetro cor verdadeira, os resultados mais eficientes se encontraram nos pH ácidos, onde a amostra foi acidificada. Nesse processo de acidificação os sólidos dissolvidos, indicadores de cor verdadeira, precipitam e aparecem na forma de turbidez e cor aparente. O elevado aumento de turbidez nos pH ácidos podem ser justificados por esse processo. Experimentalmente, Amitharajah (1989) comprovou, utilizando sulfato de alumínio como coagulante, que faixas de pH menores (5,0 e 6,0) são ideais para a remoção de cor, quando se trabalha com efluentes de baixa turbidez e cor elevada.

Quanto às velocidades de flotação, os resultados observados demonstraram que, nesse sistema de flotação, é possível trabalhar com as velocidades mais elevadas, visto que essas não tiveram diferenças significativas.

Na Etapa 3 foram realizados ensaios testando combinações de doses de coagulante com polímero catiônico, em emulsão; variando-se também a velocidade de flotação.

Segundo Kriebel (2002) os polímeros estão disponíveis em várias formas e concentrações diferentes, e, supõe-se que os polímeros em emulsão possuem um teor médio ativo de 40%, enquanto os em pó de 100%. Portanto, explica-se as altas dosagens de polímero empregadas na Etapa 3.

Tem-se como exemplo da diferença entre as dosagens de polímero em pó e em emulsão o estudo de Miki (1998) que investigou a utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ETE para desidratação em filtro prensa, e na verificação do tempo de filtração utilizou aplicação com dosagens de 1000mg/L de polímero em pó e de 5000mg/L para polímero em emulsão.

Na Tabela 5 são expostos os resultados das eficiências de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO para as diferentes combinações de coagulante e polímero, visando a redução da dosagem de polímero, uma vez que o custo do polímero é mais elevado que o de coagulante.

**Tabela 5.** Eficiências de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO obtidas nos diferentes experimentos realizados no primeiro ensaio da Etapa 3.

**Table 5.** Efficiencies of removing turbidity, apparent color, true color and COD obtained in different experiments performed in the first test of stage 3.

DC (mg/L <sup>-1</sup> )	DP (mg/L <sup>-1</sup> )	pH Coag.	Turbidez (%)	Cor A (%)	Cor V (%)	DQO (%)
0	167	7,45	0	40	51	13
	333	7,46	-	34	73	39
	670	7,46	-	54	76	64
	1000	7,46	-	9	83	27
50	167	7,4	-	35	51	28
	333	7,2	-	42	79	40
	670	7,3	59	76	85	58
	1000	7,3	-	13	90	0
75	167	7,3	-	39	57	33
	333	7,15	49	58	81	55
	670	7,15	-	60	75	33
	1000	7,2	-	11	85	3
100	167	7,05	-	37	54	30
	333	7	82	84	87	66
	670	7,1	-	59	90	39
	1000	7,1	-	-	-	-
125	167	7,2	-	44	46	35
	333	7	39	73	73	58
	670	7,1	-	51	62	22
	1000	7	-	-	58	-
150	67	6,5	14	56	84	13
	167	7	83	89	90	66
	333	6,9	45	72	73	58
	670	7	-	43	69	25
175	1000	6,9	-	30	48	-
	16,7	6,95	-	26	84	12
	33	6,85	75	86	90	49
	67	6,95	84	90	89	67
200	167	6,8	78	87	86	52
	33	6,8	-	28	82	30

Os espaços em branco (-) indicam aumento do valor remanescente.

Observou-se (Tabela 5) que a variação da dose de coagulante e polímero não interferiu no valor do pH. Fato apreciável quando comparado aos demais coagulantes, que, ao alterarem o pH demandam consumos elevados de cal e, conseqüentemente, produzem maior quantidade de lodo.

Metade dos valores residuais dos ensaios com dosagem de 1000mg/L de polímero aumentaram, assim como a maioria dos valores de turbidez, provando que o excesso de polímero contribuiu com o aumento de sólidos, principalmente o material coloidal e particulado, representado pela turbidez e cor aparente. O excesso de polímero reestabiliza a carga das partículas por saturar sua superfície, prejudicando a formação de flocos no processo de floculação e aumentando a concentração de material particulado do efluente.

Os melhores resultados foram obtidos para as maiores doses de coagulantes e menores de polímero. O melhor desempenho da flotação foi para 175 mg.L<sup>-1</sup> de coagulante e 67 mg.L<sup>-1</sup> de polímero, onde os valores residuais foram: 8,7 uT de turbidez, 255 uC de cor aparente, 246 uC de cor verdadeira e 185 mg.L<sup>-1</sup> de DQO. Dosagens de polímero mais baixas representaram menores remoções desses mesmos parâmetros.

No uso da flotação como pós-tratamento de efluente de reatores UASB, Dias e Pereira (2007) obtiveram remoção de 77,8% de turbidez, 57,6% de cor aparente para um efluente com 455 uH de cor aparente e 58,8 uT de turbidez na saída do reator. Nesse ensaio utilizou-se 90 mg.L<sup>-1</sup> de cloreto férrico como coagulante e 1 mg.L<sup>-1</sup> de polímero catiônico em pó como auxiliar de coagulação. Neste estudo, o polímero catiônico demonstrou maior eficiência quando comparado com o polímero aniônico.

No segundo ensaio da Etapa 3 realizou-se uma triplicata com a melhor configuração alcançada no ensaio anterior, 175 mg.L<sup>-1</sup> de coagulante e 67 mg.L<sup>-1</sup> de polímero. Os percentuais de remoção dos parâmetros estudados estão exibidos na Tabela 6.

Observa-se a semelhança do comportamento dos 3 ensaios, afirmando a eficiência dessa configuração. Os valores residuais médios obtidos foram de 10,44 uT de turbidez, 269,33 uC de cor aparente, 207 uC de cor verdadeira e 183,33 mg.L<sup>-1</sup> de DQO, que equivale a 81; 89; 91 e 67% de remoções, respectivamente.

Tanase et al. (2010) ao utilizarem diferentes polímeros catiônicos junto à flotação por ar dissolvido na remoção de extrativos presentes na água da máquina de papel, alcançaram excelentes percentuais de remoções dos parâmetros estudados, tendo como melhores resultados: 67% de remoção de DQO, 95% de turbidez, 53% de lignina e 78% de extrativos. Valores próximos aos obtidos nesta pesquisa.

Procurando reduzir o consumo de polímero, no terceiro ensaio da Etapa 3 testou-se a configuração de 175 mg.L<sup>-1</sup> de coagulante e 50 mg.L<sup>-1</sup> de polímero. Realizou-se uma triplicata dessa configuração, onde os percentuais de remoção obtidos estão expostos na Tabela 7.

Nota-se a homogeneidade dos resultados dos ensaios, quando comparado com os percentuais de remoção da fase anterior, observa-se a similaridade dos resultados e eficiências.

Os valores médios residuais dos parâmetros estudados foram: 8,07 uT de turbidez, 259 uC de cor aparente, 191,33 uC de cor verdadeira e 196 mg.L<sup>-1</sup> de DQO.

Com o intuito de tornar o sistema mais compacto, no quarto ensaio da Etapa 3 as velocidades de flotação foram aumentadas para 4,5; 6,0

**Tabela 6.** Eficiências de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO obtidas nos diferentes experimentos realizados no segundo ensaio da Etapa 3.

**Table 6.** Efficiencies of removing turbidity, apparent color, true color and COD obtained in different experiments performed in the second test stage 3.

DC (mg.L <sup>-1</sup> )	DP (mg.L <sup>-1</sup> )	pH Coag.	Turbidez (%)	Cor A (%)	Cor V (%)	DQO (%)
175	67	6,8	84	90	90	67
		6,8	80	89	91	67
		6,8	80	89	91	67

**Tabela 7.** Eficiências de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO obtidas nos diferentes experimentos realizados no terceiro ensaio da Etapa 3.

**Table 7.** Efficiencies of removing turbidity, apparent color, true color and COD obtained in different experiments performed in the third test of stage 3.

DC (mg.L <sup>-1</sup> )	DP (mg.L <sup>-1</sup> )	pH Coag.	Turbidez (%)	Cor A (%)	Cor V (%)	DQO (%)
175	50	6,9	87	85	89	66
		6,9	86	87	89	66
		6,9	88	87	90	67



**Tabela 8.** Eficiências de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO obtidas nos diferentes experimentos realizados no quarto ensaio da Etapa 3.

**Table 8.** Efficiencies of removing turbidity, apparent color, true color and COD obtained in different experiments performed in the fourth test of stage 3.

DC (mg.L <sup>-1</sup> )	DP (mg.L <sup>-1</sup> )	Vf (cm/min)	pH Coag.	Turbidez (%)	Cor A (%)	Cor V (%)	DQO (%)
175	50	4,5	6,9	92	87	89	68
		6,0	6,9	90	88	90	70
		9,0	6,9	90	85	89	69
	67	4,5	6,9	61	84	86	68
		6,0	6,9	78	84	86	69
		9,0	6,9	81	85	87	69

e 9,0 cm/min, para as duas últimas configurações estudadas. Na Tabela 8, são apresentados os percentuais de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO.

De acordo com a Tabela 8 é possível observar que os percentuais de remoção para as dosagens de polímero de 50 e 67 mg.L<sup>-1</sup> são próximos, porém para o parâmetro turbidez a dosagem de 50 mg.L<sup>-1</sup> foi mais eficaz.

O comportamento do sistema FAD para as velocidades estudadas foi semelhante (exceto para remoção de turbidez na dosagem de polímero de 67 mg.L<sup>-1</sup>). Sendo assim, podemos adotar a maior velocidade de flotação, que implica em reatores menores em escala plena, tornando o sistema mais compacto.

A velocidade de flotação (ascensional) de 9 cm/min equivale a uma taxa de escoamento superficial de 5,4 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h. Os valores usuais de taxa de escoamento superficial variam de 0,48 a 9,76 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h, recomendado por Dick (1972); Metcalf e Eddy (1991) apud Aisse (2001). Costanzi e Daniel (2002) estudaram taxas de 2,91; 6,25 e 12,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h na aplicação da flotação por ar dissolvido como tratamento do efluente total da máquina de papel e Lima (1996) usou taxas de aplicação superficial de 60 a 120 m/dia (2,5 a 5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h), na recuperação de fibras do efluente de uma indústria de papel e celulose por flotação por ar dissolvido.

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na pesquisa indicam que o pós-tratamento empregado é uma alternativa adequada ao tratamento de efluentes da indústria de papel e celulose. Os percentuais de remoção obtidos são consideráveis e dificilmente seriam alcançados por processos biológicos convencionais.

Os maiores percentuais de remoção obtidos com a aplicação do polímero aniônico foram

para a seguinte configuração: 150 mg.L<sup>-1</sup> de PAC, 1 mg.L<sup>-1</sup> de polímero, tempo de floculação de 7 minutos, velocidade de flotação de 2cm/min e taxa de recirculação de 20%; obtendo-se eficiências de 28; 66; 83 e 60% para turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO, respectivamente.

A utilização de polímero catiônico nos ensaios de flotatestes conduziu a altas eficiências de remoção dos parâmetros físico-químicos analisados: 90% de turbidez, 85% de cor aparente, 89% de cor verdadeira e 69% de DQO. Resultados alcançados com 175 mg.L<sup>-1</sup> de PAC e 50 mg.L<sup>-1</sup> de polímero, tempo de floculação de 7 minutos, velocidade de flotação de 9cm/min (TAS = 5,4m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h) e taxa de recirculação de 30%.

## AGRADECIMENTOS

À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo aporte de recursos financeiros (aquisição de equipamentos) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de mestrado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AISSE, M. M.; JÜRGENSEN, D.; REALI, M. A. P.; PENETRA, R. G.; FLORENCIO, L.; ALEM SOBRINHO, P. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistema de flotação. In: CHERNICHARO, C. A. L. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: PROSAB, v. 2, 2001.
- AMITHARAJAH, A. The mechanisms of coagulation. In: **Tecnologias para tratamento de águas de abastecimento**, São Carlos: EDUFSCar, 1989. p. 1-20.
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standart methods for the examination of water and wastewater**. 19.ed. Washington: American Public Health Association, 1998.

- BRACELPA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Dados do Setor 2013**. São Paulo, 2013, 28 p. Disponível em: < <http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/booklet.pdf> >. Acesso em: 23 out. 2013.
- BRACELPA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Relatório estatístico anual 2009/2010**. 2011. 60 p. Disponível em: < <http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/rel2009.pdf> >. Acesso em: 01 set, 2011.
- COSTANZI, R. N.; DANIEL, L. A. Estudo do tratamento de efluentes de uma fábrica de papel para imprimir visando o reuso por flotação e sedimentação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 3/4, p. 156-160, 2002.
- COSTANZI, R. N.; REALI, M. A. P.; DANIEL, L. A. Tratamento de efluentes de fábrica de papel por processos físico-químicos empregando flotação por ar dissolvido e ozônio. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL. 27, 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: AIDIS, 2000.
- DIAS, M. S. O.; PEREIRA, J. A. R. Determinação da dosagem ótima de polímeros em sistema de flotação, em escala de laboratório, utilizado no pós-tratamento de efluente de reator UASB da ETE Sideral, Belém/PA. **Revista Científica da UFPA**, Belém, v. 6, n. 1, p. 1-17, 2007.
- DI BERNARDO, L.; CENTURIONE FILHO, P. L. Procedimento para execução de ensaios de flotação/filtração em equipamento de bancada. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1/2, p. 39-44, 2003.
- DICK, R. I. Sludge treatment. In: WEBER, W. J. **Physicochemical Processes for Water Quality Control**. New York: John Wiley. 1972. Cap. 12, p.533-596.
- KRIEBEL, G. Alimentação Química: o problema dos polímeros. **Água Latinoamérica**, Tucson, v. 2, n. 6, p. 20-23, nov/dez 002. Disponível em:< <http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/niv%20bas%2011-12-02.pdf> >. Acesso em: 18 fev. 2012.
- LIMA, M. R. A. **Emprego da flotação por ar dissolvido no tratamento das águas residuárias de uma indústria de papel visando a recuperação de fibras**. 1996. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.
- MEDEIROS, D. R. **Tratamento de efluentes do branqueamento da polpa celulósica por processos oxidativos avançados baseados em ozônio**. 2008. 223 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- MIKI, M. K. **Utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ETE para desidratação em filtro prensa de placas**. 1998. 425 p. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE: SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Florestas do Brasil em resumo - 2010: dados de 2005/2008**. Brasília: SFB, 2010. Disponível em < [http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/doc\\_florestas\\_resumo\\_22648.pdf](http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/doc_florestas_resumo_22648.pdf) >. Acesso em: 01 set. 2011.
- PENETRA, R. G. **Pós-tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbios de manta de lodo**. 1998. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- POKHREL, D.; VIRARAGHAVAN, T. Treatment of pulp and paper mill wastewater – a review. **Science of the Total Environment**. Amsterdam, v. 333, n.1-3, p. 37-58, 2004.
- REALI, M. A. P. **Concepção e avaliação de um sistema compacto para tratamento de águas de abastecimento utilizando o processo de Flotação por Ar Dissolvido e Filtração com taxa declinante**. 1991. 373 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1991.

SANTOS, H. R. **Coagulação/precipitação de efluentes de reator anaeróbio de leito expandido e de sistema de lodo ativado precedido de reator UASB, com remoção de partículas por sedimentação ou flotação.** 2006. 331 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

SCHOENALS, M. **Avaliação da eficiência do processo de flotação aplicado ao tratamento primário de efluentes de abatedouro avícola.** 2006, 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TANASE, M.; STENIUS, P.; GREGERSEN, O.; JOHANSSON, L.; HILL, J. Removal of extractives from TMP process water using dissolved air flotation. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON FUNDAMENTAL MECHANICAL PULP RESEARCH, 7., 2010, Nanjing. **Proceedings...** Najing: ICIFP, 2010.

Recebido em 11/06/2013  
Aceito para publicação em 16/12/2013

