

## **II-204 - OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DA FAD PARA REMOÇÃO DE COR DE EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE CELULOSE E PAPEL**

**Larissa Quartaroli<sup>(1)</sup>**

Engenheira Ambiental. Mestre em Ciências Florestais pela Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO). Doutoranda em Engenharia Civil/Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

**Joice Cristini Kuritza**

Engenheira Ambiental. Mestre em Ciências Florestais pela Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO). Doutoranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

**Jeanette Beber de Souza**

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Doutora em Engenharia Civil/Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). Professora adjunto do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO).

**Carlos Magno de Sousa Vidal**

Biólogo pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Doutor em Engenharia Civil/Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). Professor adjunto do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO).

**Grasiele Soares Cavallini**

Química pela Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). Mestre em Química Aplicada pela UEPG. Doutoranda em Química Aplicada pela UEPG. Técnica do Laboratório de Saneamento Ambiental e Qualidade da Água da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. PH Rolfs, s/n - Viçosa - MG - CEP: 36570-000 - Brasil - Tel: +55 (31) 9286-45666- e-mail: [larissaquartaroli@yahoo.com.br](mailto:larissaquartaroli@yahoo.com.br).

### **RESUMO**

Os efluentes líquidos das fábricas de celulose e papel, em alguns casos, necessitam de um tratamento terciário a fim de remover DQO recalcitrante, cor, compostos tóxicos e dioxinas. O uso da flotação por ar dissolvido (FAD) vem se destacando na clarificação final do efluente, como pós-tratamento. O objetivo deste trabalho foi otimizar alguns parâmetros da FAD visando a remoção de cor do efluente de uma ETE implementada em uma indústria de celulose e papel. Os ensaios foram realizados em um equipamento de bancada, flotateste. Durante os ensaios de floculação/flotação a dosagem de polímero, a taxa de recirculação, a velocidade de flotação e o tempo de floculação foram variados. A FAD demonstrou boa eficiência na remoção de cor, mesmo operando com baixo tempo de floculação (2 minutos) e elevada velocidade de flotação (9 cm.min<sup>-1</sup>). Foram alcançados percentuais de remoção de cor aparente e verdadeira de 85 e 89%, respectivamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Flotação por ar dissolvido, Efluente industrial, celulose e papel.

### **INTRODUÇÃO**

As indústrias de celulose e papel são conhecidas devido ao elevado consumo de água na produção e, consequentemente, geração de efluente. O consumo de água para a produção de celulose pode variar de 15 a 100 m<sup>3</sup>/t<sub>sa</sub>, podendo oscilar com o tipo de polpa e papel a se produzir e de indústria (PIOTTO, 2003). As indústrias mais modernas, após evolução no sistema de lavagem e fechamento parcial de circuito, vêm consumindo níveis de água mais inferiores.

Os efluentes líquidos são gerados em diversos pontos do processo de produção e são considerados altamente tóxicos, e possuem quantidades consideráveis de compostos lesivos tanto a espécies aquáticas quanto a saúde humana.

As principais características dos efluentes líquidos para essa tipologia de indústria são os altos teores de matéria orgânica dissolvida, sólidos suspensos, cor, toxicidade e dioxinas. Alguns desses componentes são ditos como

recalcitrantes, ou seja, tendem a persistirem na natureza, conhecidos também como poluentes orgânicos persistentes (POP's) (ALI; SREEKRISHNAN, 2001).

O tratamento dos efluentes líquidos nas fábricas de celulose e papel é compreendido basicamente pelos tratamentos preliminar, primário, secundário e terciário. O tratamento biológico secundário é suficiente para atender os padrões de lançamento. Entretanto, em alguns casos, o tratamento terciário é necessário para remoção de DQO recalcitrante, cor, compostos tóxicos e dioxinas.

Os processos físico-químicos tem sido o principal método utilizado como tratamento terciário nas indústrias de todo mundo, a fim de enquadrar os efluentes nos limites de lançamento.

A flotação por ar dissolvido (FAD) surge como uma alternativa atraente no pós-tratamento de efluentes, com excelente capacidade de clarificação do efluente, remoção de sólidos suspensos e matéria orgânica dissolvida. A FAD é um sistema onde é possível separar partículas sólidas ou líquidas de uma fase líquida a partir da introdução de pequenas bolhas de gás, normalmente o ar. Essas bolhas aderem à superfície das partículas, aumentando o seu empuxo, favorecendo assim o movimento ascensional dessas partículas em direção à superfície da fase líquida, onde poderão ser coletadas em uma operação de raspagem superficial (REALI, 1991).

Nesse contexto o trabalho teve como objetivo a otimização de um sistema de flotação por ar dissolvido (FAD) em termos de redução do tempo de floculação visando a remoção de cor do efluente de uma ETE implementada em uma indústria de celulose e papel.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de coagulação/floculação/flotação foram realizados, em escala laboratorial, em um flotatestes, com operação em batelada, segundo metodologia proposta por Di Bernardo (2003). O efluente utilizado para a pesquisa foi coletado de uma estação de tratamento de efluentes de uma indústria de celulose e papel, na saída do decantador secundário.

Para os ensaios de tratabilidade empregou-se como agente coagulante o cloreto de polialumínio (PAC), na dosagem de 175 mg/L. Para auxiliar na floculação utilizou-se o polímero catiônico Retex EC 340, em emulsão, nas dosagens de 5 e 6,66 mL/L, equivalente a 50 e 67 mg/L, respectivamente.

Os parâmetros para a realização dos ensaios foram fixados de acordo com valores encontrados na literatura (Penetra, 1998; Santos, 2006): pressão de saturação de 5 bar, tempo de saturação do ar na câmara de saturação de 15 min, gradiente de mistura rápida de  $500 \text{ s}^{-1}$  (270rpm), tempo de mistura rápida de 60 s e gradiente médio de mistura lenta de  $40 \text{ s}^{-1}$ . A taxa de recirculação, velocidade de flotação e tempo de floculação foram variados conforme a Tabela 1.

**Tabela 1: Parâmetros variados nos ensaios de FAD.**

Ensaio	Dose de polímero (mg/L)	Taxa de Recirculação (%)	Velocidade de Flotação (cm/min)	Tempo de Floculação (min)
1	50	30	3,0	7,0
2	50	20	3,0	7,0
3	67	30	3,0	7,0
4	67	20	3,0	7,0
5	50	30	4,5	7,0
6	50	30	6,0	7,0
7	50	30	9,0	7,0
8	67	30	4,5	7,0
9	67	30	6,0	7,0
10	67	30	9,0	7,0
11	50	30	9,0	2,0
12	50	30	9,0	4,0
13	67	30	9,0	2,0
14	67	30	9,0	4,0

O efluente foi caracterizado antes e após os tratamentos propostos, de acordo com os procedimentos indicados no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998). O desempenho do sistema FAD foi avaliado com base na remoção de cor aparente e cor verdadeira.

## RESULTADOS

Na Tabela 2 encontra-se a caracterização do efluente utilizado para a realização dos ensaios de FAD.

**Tabela 2: Caracterização físico-química do efluente.**

Parâmetro	Unidade	Valores
DQO	mg.L <sup>-1</sup>	583
DBO	mg.L <sup>-1</sup>	23
Cor Aparente	uC <sup>(1)</sup>	1884
Cor Verdadeira	uC <sup>(1)</sup>	1784
Turbidez	uT <sup>(2)</sup>	61,5
pH	-	7,5
Temperatura	°C	18,5

(1) Unidade de Cor = Unidade-Henzen (mg Pt.Co.L<sup>-1</sup>), (2) Unidade de turbidez.

As indústrias de papel e celulose, devido suas etapas de clarificação da polpa de celulose, geram efluentes com alta concentração de cor, como observado na Tabela 2. Segundo Kreetachat et al. (2007) a coloração do efluente de celulose e papel, em sua maioria está associado à lignina residual e outros grupos cromóforos (extrativos da madeira e íons metálicos).

Na Tabela 3 estão apresentados os valores residuais de cor aparente e cor verdadeira do efluente após a FAD, para ensaios com dose de coagulante de 175 mg.L<sup>-1</sup>, velocidade de flotação de 3 cm.min<sup>-1</sup> e tempo de floculação de 7 min, as doses de polímero e a taxas de recirculação dos ensaios foram variados.

**Tabela 3: Valores residuais de cor aparente e cor verdadeira do efluente após ensaio com FAD, variando-se doses de polímero e taxas de recirculação.**

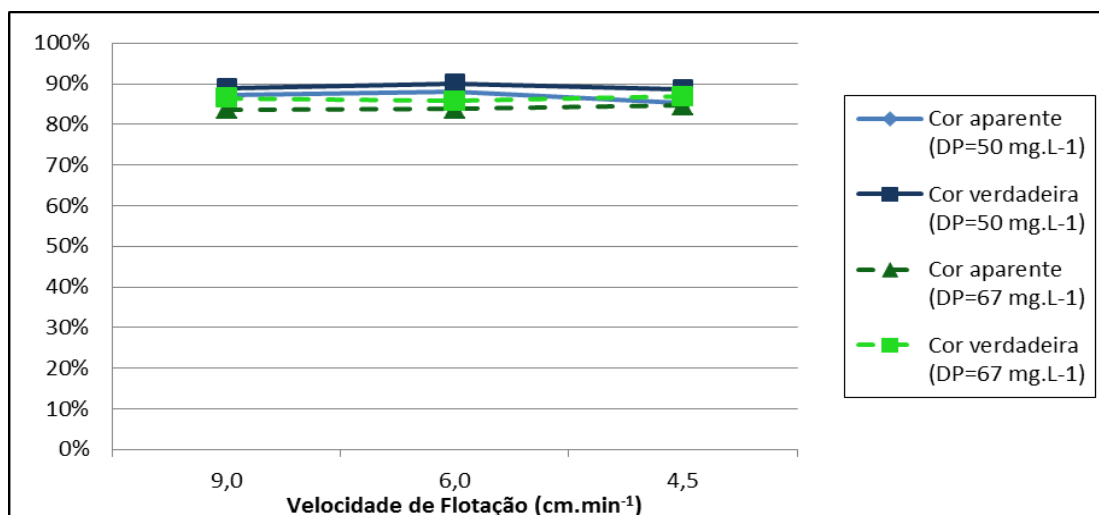
Ensaio	pH coagulação	Dose polímero (mg.L <sup>-1</sup> )	Taxa de recirculação (%)	Cor aparente (uC)	Cor verdadeira (uC)
1	6,9	50	30	244	181
2	6,9	50	20	848	276
3	6,8	67	30	228	160
4	6,9	67	20	353	215

A partir da Tabela 3 observamos que os menores valores residuais de cor foram obtidos nos ensaios utilizando taxa de recirculação de 30% e dose de polímero de 67 mg.L<sup>-1</sup>, onde o percentual de remoção foi de 88% para cor aparente e 91% para cor verdadeira. Vale ressaltar que os percentuais de remoção alcançados com taxa de recirculação de 20% são consideráveis e dificilmente seriam alcançados por processos biológicos convencionais.

Campos et al. (1996) alcançaram percentuais de remoção de 44% de DQO e 67% de turbidez, no tratamento de efluentes sanitários de reatores anaeróbios por flotação por ar dissolvido, com percentual de recirculação de 20% e Cal como agente coagulante.

Os ensaios subsequentes foram feitos apenas para taxa de recirculação de 30%.

A fim de otimizar o sistema e o tempo de floculação nos próximos ensaios aumentou-se a velocidade de flotação de 3 cm.min<sup>-1</sup> para 9,0; 6,0 e 4,5 cm.min<sup>-1</sup>, para as doses de polímero de 50 e 67 mg.L<sup>-1</sup>, observando-se na Figura 1 o comportamento do sistema em termos de remoção de cor.



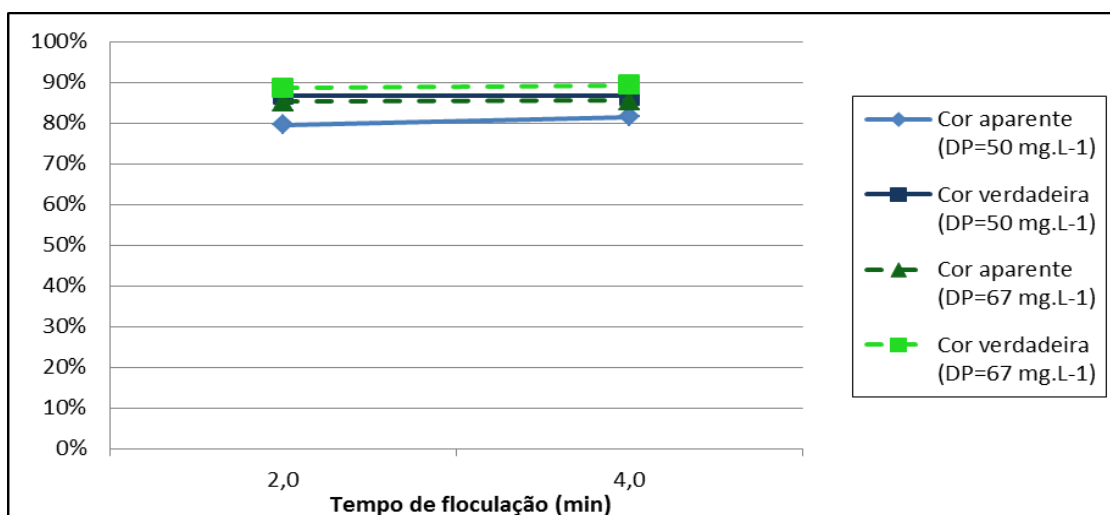
**Figura 1: Percentual de remoção de cor aparente e cor verdadeira em função da dose de polímero e velocidade de flotação.**

De acordo com a Figura 1, observa-se que os percentuais de remoção para as duas doses de polímero e velocidades de flotação são próximos, destacando-se a dose de 50 mg.L<sup>-1</sup> com 89, 90 e 89% de remoção de cor verdadeira nas três velocidades estudadas, resultando em residual de 201, 178 e 197 mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente.

Diante do exposto torna-se mais vantajoso 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 se encontram de 0,48 a 9,76 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h, recomendado por Dick (1972) e Metcalf & Eddy (1991), apud Aisse et al (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. Já 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.

Com a finalidade de deixar o sistema mais compacto, reduziu-se os tempos de floculação de 7 minutos para 2 e 4 minutos, utilizando a maior velocidade de flotação testada, 9 cm.min<sup>-1</sup>. Os percentuais de remoção para esses ensaios estão expostos na Figura 2.



**Figura 2: Percentual de remoção de cor aparente e cor verdadeira em função da dose de polímero e tempo de floculação.**

Os ensaios com dosagem de polímero de 67 mg.L<sup>-1</sup> foram ligeiramente mais eficientes que os ensaios com 50 mg.L<sup>-1</sup> e não houve diferença significativa entre os tempos de floculação de 2 e 4 minutos, podendo-se adotar o menor tempo de floculação.

Para a dose de 50 mg.L<sup>-1</sup> os percentuais de remoção foram 80 e 87%, para cor aparente e verdadeira, respectivamente, e tempo de floculação de 2 minutos. Já para a dose de 67 mg.L<sup>-1</sup> o percentual de remoção foi de 85 e 89%, para cor aparente e verdadeira.

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, tendo como melhores resultados: 67% de remoção de DQO, 95% de turbidez, 53% de lignina e 78% de extrativos.

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem afirmar que a FAD é uma alternativa adequada ao tratamento de efluente de celulose e papel.

A redução dos tempos de operação não prejudicou a eficiência do sistema, podendo operar o sistema com tempo de floculação de 2 minutos e velocidade de flotação de 9 cm.min<sup>-1</sup>.

O polímero catiônico demonstrou ser um excelente auxiliar de floculação, principalmente na remoção de cor real que está relacionada a substâncias dissolvidas, com diâmetro inferior a 10<sup>-3</sup> µm.

Os ensaios com taxa de 30% de recirculação demonstraram ser mais eficientes que os com 20%.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Araucária pelo auxílio financeiro concedido para a participação neste evento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALI, M.; SREEKRISHNAN, T.R. Aquatic toxicity from pulp and paper mill effluents: a review. *Advances in Environmental Research*, v. 5, p. 175-196, 2001.
2. ASSE, 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: Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Vol. 2. PROSAB, Belo Horizonte-MG, 2001.
3. APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19.ed. Washington: American Public Health Association, 1998.
4. CAMPOS, J. R.; REALI, M. A. P.; DOMBROSKI, S. A. G.; MARCHETTO, M.; LIMA, M. R. A. Tratamento Físico-Químico por Flotação de Efluentes de Reatores Anaeróbios. In: XXV Congresso Interamericano Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Anais...México, 1996.
5. 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. Trabalhos premiados*. v. 7, n. 3 e 4, p. 156-160, 2002.
6. DICK, R. I. Sludge treatment. In: WEBER, W. J. *Physicochemical Processes for Water Quality Control*. New York: John Wiley. Cap. 12, p.533-596, 1972.
7. KREETACHAT, T.; DAMRONGSRI, M.; PUNSUWON, V.; VAITHANOMSAT, P.; CHIEMCHASRI, C.; CHOMSURIN, C. Effects of ozonation process on lignin-derived compounds in pulp and paper mill effluents. *Journal of Hazardous Materials*, n. 142, p. 250-257. 2007.
8. METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*. 3 ed., New York, Mc Graw-Hill, 1991. 1334p
9. 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 da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

10. PIOTTO, Z. C. Eco-eficiência na indústria de Celulose e Papel – Estudo de Caso. 2003. 379 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
11. 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. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
12. 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 da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
13. TANASE, M.; STENIUS, P.; GREGERSEN, Ø.; JOHANSSON, L.; HILL, J. Removal of extractives from TMP process water using dissolved air flotation. VII International Seminar on Fundamental mechanical Pulp research. Nanjing - China, 2010.