

II-004 – COMPARAÇÃO DA SEDIMENTAÇÃO E DA FLOTAÇÃO NO TRATAMENTO DE ÁGUA BRANCA DE UMA INDÚSTRIA DE PAPEL

Carlos Magno de Sousa Vidal⁽¹⁾

Biólogo pela Universidade de São Paulo (USP). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutor em Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP. Professor Associado do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste.

Jeanette Beber de Souza⁽²⁾

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

Daiane Cristine Kuhn⁽³⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA). Mestranda em Engenharia Sanitária e Ambiental na Universidade Estadual do Centro-Oeste.

Luana Falbot⁽⁴⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste. Mestranda em Ciências Florestais na Universidade Estadual do Centro-Oeste.

Mirelly Manica⁽⁵⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste. Mestranda em Engenharia Sanitária e Ambiental na Universidade Estadual do Centro-Oeste.

Endereço⁽¹⁾: Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Rodovia PR 153, Km 7, s/n – Riozinho – Irati – PR – CEP: 84500-000 – Brasil – Tel: +55 (42) 3421-3000 - e-mail: cmsvidal@unicentro.br

RESUMO

O objetivo do trabalho foi avaliar o emprego da sedimentação e flotação na eficiência de remoção de cor aparente, turbidez e matéria orgânica da água branca de uma indústria de papel. Foram realizados testes em laboratório, em equipamento de bancada do tipo flota-test. Os testes foram divididos em duas etapas: a etapa 01 visou a verificação da eficiência do tratamento com flotação por ar dissolvido com aplicação de coagulante (PAC – cloreto de polialumínio) e sem a aplicação do mesmo. Na etapa 02 foram realizados testes de coagulação, floculação e sedimentação testando a mesma dosagem do coagulante PAC da etapa 01, e repetidos sem a aplicação de coagulante. O êxito do tratamento foi medido em função da remoção de turbidez, cor aparente, DQO, sólidos totais e sólidos suspensos totais. Todos os testes foram realizados em triplicata. Os resultados indicaram que para DQO, turbidez e cor aparente a melhor redução ocorreu no ensaio de sedimentação com coagulante, alcançando eficiências de remoção de 49,7%, 99,4% e 98,6%, respectivamente. Porém a sedimentação sem coagulante não diferiu estatisticamente da anterior, sendo assim, dentre os tratamentos empregados a sedimentação sem uso de coagulante apresentou grande potencialidade de aplicação como tratamento de água branca da indústria de papel, uma vez que conseguiu alcançar resultados satisfatórios, além de ser viável economicamente.

PALAVRAS-CHAVE: Coagulação, floculação, cloreto de polialumínio, efluente industrial.

INTRODUÇÃO

A fabricação de papel consome grande quantidade de recursos retirados da natureza, sendo que as duas principais matérias-primas são fibras vegetais e água. Neste sentido, a livre utilização dos bens ambientais acentua a sua escassez. De acordo com Silva (2003), é importante que estudos nessa área orientem a percepção da obrigação que empresas possuem em relação a despejo de seus efluentes.

A técnica de reúso da água já é implementada em algumas empresas de grande porte, que possuem elevados recursos financeiros e técnicos. Esse método permite o tratamento de efluentes com o intuito de promover a sua reutilização com uma determinada finalidade. O surgimento dessa prática viabiliza a conservação da água e

amplia a eficiência e a capacidade do seu uso, se tornando uma opção para reduzir o lançamento desse recurso tratado pelas empresas novamente no corpo hídrico (AMARAL et al., 2009).

Os efluentes das indústrias de papel são importantes fontes de poluição das águas. Os que são gerados na máquina de papel pela formação e prensagem da folha, denominados de água branca, contribuem para o aumento da demanda química de oxigênio (DQO), devido às fibras celulósicas contendo resíduos de produtos como cola, agentes branqueadores, amidos, etc. (BARROS e NOZAKI, 2002).

Os processos físico-químicos como a coagulação, floculação, sedimentação, flotação, filtração e oxidação são uma das alternativas no tratamento de efluentes em geral. A flotação por ar dissolvido apresenta grandes potencialidades no tratamento de águas e águas residuárias e vem se destacando no tratamento de efluentes industriais. Apresenta capacidade de remoção de sólidos suspensos e parcela da matéria orgânica dissolvida, bem como a redução de teores de gases odoríferos (QUARTAROLI, 2012).

A coagulação é a alteração físico-química de partículas coloidais, produzindo partículas que possam formar flocos e serem removidas em seguida em um processo físico de separação, usualmente a sedimentação (RICHTER, 2009). Essa desestabilização das partículas é normalmente alcançada pela adição de sais de alumínio e ferro, denominados de coagulante, que podem ser utilizados individualmente ou combinados com algum polieletrólito auxiliar de floculação, de origem sintética ou natural (KURITZA, 2012).

O objetivo da presente pesquisa foi avaliar o emprego da sedimentação e flotação na eficiência de remoção de cor aparente, turbidez e matéria orgânica da água branca de uma indústria de papel com e sem a adição de coagulante e comparar os resultados obtidos.

OBJETIVOS

Avaliar e comparar a sedimentação e a flotação na remoção de cor aparente, turbidez e matéria orgânica de água branca de uma indústria de papel.

Avaliar o desempenho da sedimentação e da flotação por ar dissolvido com e sem aplicação coagulante em ambos os processos;

MATERIAIS E MÉTODOS

CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE ÁGUA BRANCA

A coleta da amostra de água branca foi realizada na saída da máquina de papel de uma indústria de papel do Estado do Paraná.

Foi realizada a caracterização da água branca para os seguintes parâmetros: pH, sólidos totais (ST), sólidos suspensos totais (SST), demanda química de oxigênio (DQO), turbidez e cor aparente a partir dos métodos estabelecidos na 20ª edição do *Standard Methods for Examination of the Water and Wastewater* (APHA, 1999).

ENSAIOS DE FLOTAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO

As amostras de efluente foram submetidas a dois tipos de tratamento: coagulação/floculação/flotação e coagulação/floculação/sedimentação. Ambos foram realizados em equipamento de flota-test, de acordo com a metodologia descrita por Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011).

O equipamento de flota-test é composto por 3 jarros de acrílico transparente com capacidade de 2 litros cada (dimensões 115 mm x 115 mm) e uma câmara de pressurização. A base do jarro permite a introdução e a distribuição uniforme de água saturada com ar. A base é constituída por placa de acrílico, com 121 orifícios de 2 mm de diâmetro.

Para realização dos ensaios, saturou-se a água de recirculação com ar na câmara de pressurização, em pressão de 5 bar durante 15 minutos. Após, foram ajustadas no painel de controle do flota-test, as condições pré-estabelecidas para cada parâmetro no ensaio e o tempo cronometrado. As condições operacionais empregadas na flotação foram de acordo com Managó (2015): Gradiente de mistura rápida 500 s^{-1} ; Tempo de mistura rápida 60s; Gradiente de floculação 50 s^{-1} . Tempo de floculação de 5min; Percentual de recirculação de 15 %; Pressão de saturação de 5bar; Tempo de saturação de 15 minutos e velocidade de flotação de 9 cm.min^{-1} .

No processo de coagulação/floculação/sedimentação foram adotadas as mesmas condições de mistura rápida e lenta diferindo apenas no quesito de velocidade de sedimentação a qual foi imposto o valor de $0,2 \text{ cm.min}^{-1}$.

A partir da definição das condições realizou-se os ensaios de flotação por ar dissolvido buscando verificar o desempenho com e sem o uso do coagulante Cloreto de Polialumínio (PAC). Testou-se a dosagem de 0 (sem coagulante) e 150 mg.L^{-1} , sendo o ensaio realizado em triplicata.

Com a finalidade de comparar os dois tipos de tratamento realizou-se também o ensaio de sedimentação com o mesmo coagulante e nas mesmas dosagens empregadas na flotação.

Após a realização dos tratamentos, as amostras foram submetidas a ensaios para determinação de sólidos totais (ST), sólidos suspensos totais (SST), demanda química de oxigênio (DQO), turbidez, cor aparente e pH. Sendo, portanto, avaliada a eficiência das tecnologias estudadas através da caracterização do efluente antes e após o tratamento por flotação e sedimentação.

DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Os dados foram previamente checados quanto à normalidade e homogeneidade de variâncias das médias, pelo teste de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente. O experimento foi conduzido no delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos, utilizando-se três repetições por tratamento. As médias obtidas foram analisadas no *software R*, procedendo-se a ANOVA (Análise de Variância) e quando pertinente o teste de Tukey. O nível de significância para todos os testes foi de 5%.

RESULTADOS OBTIDOS

Na Tabela 1 encontra-se a caracterização do efluente (água branca) utilizado nos ensaios de sedimentação e flotação por ar dissolvido. Desta forma, visando o reaproveitamento deste efluente dentro da própria indústria, a minimização da quantidade de fibras a serem destinadas para ETE industrial e consequente melhoria da qualidade do efluente a ser lançado no corpo receptor, faz-se necessário o tratamento deste efluente.

Tabela 1: Caracterização da água branca.

PARÂMETRO	EFLUENTE BRUTO
ST (mg.L^{-1})	2382
SST (mg.L^{-1})	1444
DQO (mg.L^{-1})	661
Turbidez (uT)	3505
Cor aparente (uC)	9000
pH	8,3

Verifica-se na Figura 1 a grande concentração de sólidos presente no efluente e elevada concentração de matéria orgânica ainda passível de ser removida. A elevada concentração de SST está associada a presença de fibras remanescentes no efluente da máquina de papel (água branca) e que ainda podem ser reaproveitadas no processo.

As eficiências de remoção de sólidos totais e sólidos suspensos totais alcançados a partir dos ensaios de flotação e sedimentação, sem e com a aplicação do coagulante PAC, estão apresentados na Figura 1.

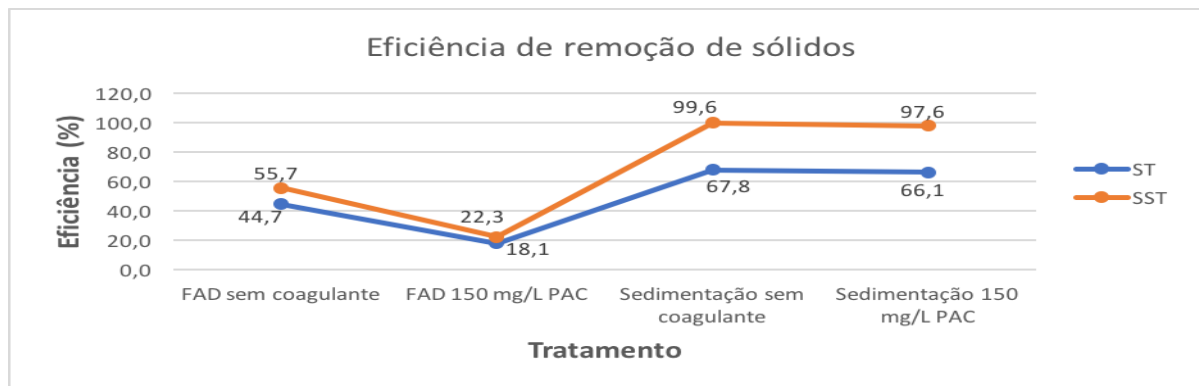


Figura 1: Eficiências de remoção de sólidos totais (ST) e sólidos suspensos totais (SST) na flotação e sedimentação com e sem o emprego de coagulante.

A partir da Figura 1 observa-se que tanto para remoção de ST quanto para remoção de SST os ensaios de sedimentação apresentaram melhor desempenho quando comparado com os resultados alcançados a partir dos ensaios de flotação. Vale destacar ainda que os melhores resultados foram obtidos com a sedimentação sem uso de coagulante, tendo sido alcançadas eficiências de remoção de 99,6 % e 67,8 % para SST e ST, respectivamente. No momento do ensaio foi possível visualizar que as fibras naturalmente sedimentavam com facilidade.

Thompson et al. (2001), em sua revisão sobre tratamento de efluente de indústria de papel e celulose, mencionam que o processo de sedimentação pode alcançar eficiências de remoção de SST acima de 80 %.

A remoção foi maior para SST tendo em vista que este parâmetro está associado a presença de partículas, as quais são facilmente removidas por sedimentação, enquanto que os ST englobam parcelas de partículas e de sólidos dissolvidos e coloidais que mesmo com a adição do coagulante não foram suficientemente removidos.

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados do teste de médias Tukey para os parâmetros DQO, turbidez e cor aparente, juntamente com as eficiências de remoção alcançadas em cada tratamento.

Tabela 2: Teste Tukey de comparação de médias para DQO, turbidez e cor e suas respectivas eficiências de remoção, em relação ao efluente bruto (Tabela 2).

PARÂMETRO	FAD s/ coag.	FAD 150 mg.L ⁻¹	SED. s/ coag.	SED. 150 mg.L ⁻¹
DQO	39,9 (%) a	4,1 (%) b	40 (%) a	49,7 (%) a
Turbidez	67,6 (%) b	51,5 (%) c	97,1 (%) a	99,4 (%) a
Cor aparente	76,1 (%) b	41,3 (%) c	94,3 (%) a	98,6 (%) a

As eficiências de remoção seguidas de mesma letra nas linhas não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ($P \geq 0,05$).

Analisando-se a Tabela 2 pode-se verificar que, assim como para a remoção dos sólidos, os ensaios de sedimentação apresentaram maiores eficiências de remoção de DQO, turbidez e cor aparente, quando comparados aos ensaios de flotação.

A partir dos resultados do teste de Tukey, verifica-se na Tabela 2, que a média de remoção de DQO alcançada com o processo de sedimentação com 150 mg.L⁻¹ não diferiram estatisticamente das médias de DQO alcançadas com os processos de sedimentação sem coagulante e FAD sem coagulante. Por sua vez, para os

parâmetros turbidez e cor aparente, não houve diferença estatística apenas entre as médias alcançadas pela sedimentação com 150 mg.L⁻¹ de coagulante e pela sedimentação sem adição de coagulante.

Portanto, de modo geral, além de ser operacionalmente mais simples e barato, o processo de sedimentação se mostrou o mais interessante, uma vez que apresentou maior potencialidade para a remoção de sólidos, turbidez, cor aparente e DQO do efluente em estudo. Na melhor condição operacional, a máxima eficiência de remoção de DQO alcançada foi de 49,7%, que corresponde a 332 mg.L⁻¹ de DQO remanescente, o que possibilitou a redução de carga de DQO para tratamento posterior na ETE industrial.

Dilek e Gökçay (1994), tratando efluente de máquina de papel por coagulação com 100 mg.L⁻¹ de sulfato de alumínio alcançou eficiências de remoção de 96% e 100% para DQO e sólidos suspensos, respectivamente.

Quartaroli (2012) utilizou flotação por ar dissolvido no tratamento de efluente de indústria de papel, com velocidade de flotação de 9 cm/min atingindo 90% de remoção de turbidez. No entanto, foi utilizado coagulante PAC em conjunto com polímero catiônico, o que pode explicar a alta remoção de turbidez encontrada por Quartaroli (2012), quando comparada à remoção atingida no presente estudo (51,5%), utilizando apenas coagulante PAC.

Vale ressaltar ainda que a elevada redução de sólidos e turbidez alcançada possibilita a reutilização da água no fechamento de circuito da máquina de papel.

A maior remoção de cor aparente foi alcançada na sedimentação com uso de coagulante (98,6%), Araújo (2013) também utilizou o coagulante PAC em um efluente de indústria de papel e celulose e alcançou uma remoção de 87% de cor na dosagem de 200 mg.L⁻¹.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

No presente estudo foi possível concluir que:

A aplicação do processo de sedimentação apresentou melhor desempenho na remoção de ST, SST, DQO, turbidez e cor aparente da água branca quando comparado ao processo de flotação por ar dissolvido.

A melhor condição estudada na pesquisa foi com o uso do processo de sedimentação sem uso de coagulante alcançando eficiências de remoção de 40 %, 97,1 % e 94,3 %, para os parâmetros de DQO, turbidez e cor aparente, respectivamente.

Desta forma, em termos de custo-benefício, pode-se afirmar que a aplicação da tecnologia de sedimentação sem a adição de coagulante se mostrou a melhor alternativa para o tratamento da água branca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMARAL, T. C.; MIRE, R. C.; YOKOYMA, L.; PESSOA, F.L.P. Valoração econômica dos impactos ambientais em cenários de reutilização hídrica na indústria. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ilha do Fundão, Rio de Janeiro.
2. APHA. AWWA, WPCF. (1999) *Standard Methods for the Examination of Water and wastewater*. 20th edition, Washington, USA.
3. ARAUJO, J. E. Processos de tratamento terciário para redução da DQO e da cor dos efluentes de uma fábrica integrada de celulose kraft branqueada e papel. Dissertação de Mestrado Profissional em Tecnologia de Papel e Celulose II. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2013.
4. BARROS, M. J.; NOZAKI, J. *Redução de poluentes de efluentes das indústrias de papel e celulose pela floculação/coagulação e degradação fotoquímica*. *Quim. Nova*, Vol. 25, No. 5, 736-740, 2002.
5. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. *Tratabilidade de Água e Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água*. São Carlos: Ldibe, 454 p. 2011.

6. DILEK, F. B.; GÖKÇAY, C. F. *Treatment of effluents from hemp-based pulp and paper industry . Waste characterization and physico-chemical treatability. Water Science and Technology*, v. 29, n. 9, p. 161-163, 1994
7. KURITZA, J. C. Aplicação da coagulação, floculação e sedimentação como póstratamento de efluente de uma indústria de papel e celulose. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR, 2012.
8. MANAGÓ, B, L. Avaliação do emprego da flotação da flotação por ar dissolvido para a recuperação de fibras de efluente água clara de máquina de papel. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR, 2015.
9. QUARTAROLI, L. Aplicação da flotação por ar dissolvido como pós-tratamento de efluente de lodo ativado em uma indústria de papel e celulose. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR, 2012.
10. RICHTER, B. D. 2009. *Re-thinking environmental flows: from allocations and reserves to sustainability boundaries. Rivers Research and Applications* 25: 1–12.
11. SILVA, J.R. 2003. Métodos de valoração ambiental: uma análise de do setor de extração mineral. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de PósGraduação em Engenharia de Produção. Florianópolis. 146 f.
12. THOMPSON, G.; SWAIN, J.; KAY, M.; FORSTER, C. F. The treatment of pulp and paper mill effluent: a review. *Bioresource technology*, v. 77, n. 3, p. 275-286, 2001.