

II-269 - AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO/SEDIMENTAÇÃO (CFS) E FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO (FAD) NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE UMA INDÚSTRIA DE PAPEL TISSUE

Carlos Magno de Sousa Vidal⁽¹⁾

Biólogo pela Universidade de Federal de São Carlos (UFSCAR). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutor em Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP.

Mayara Ananda Gauer

Mestre em Bioenergia. Doutoranda em Ciências Florestais pela Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná (UNICENTRO). Professora do curso de Engenharia Ambiental do Centro Universitário de União da Vitória, Paraná (UNIUV).

Daiane Cristine Kuhn

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA). Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Estadual do Centro Oeste (UNICENTRO).

Luiz Henrique Natalli

Engenheiro Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul. Mestrando em Ciências Florestais pela Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná (UNICENTRO).

Helluany Mehl

Engenheira Civil pela Faculdades Guarapuava, Paraná. Mestranda em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná (UNICENTRO).

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

Pesquisas recentes demonstram que o tratamento de efluentes da indústria de papel e celulose obtém sucesso com a aplicação de processos físico-químicos, em razão da sua habilidade em remover uma variedade de materiais suspensos e flotantes, assim como compostos tóxicos dos efluentes. Procurando atender aos padrões de qualidade exigidos pelas legislações ambientais, avaliou-se a eficiência dos processos de coagulação/floculação/sedimentação (CFS) e flotação por ar dissolvido (FAD) no tratamento de efluente proveniente do decantador primário de fábrica de papel sanitário (*tissue*).

O efluente coletado foi caracterizado e os ensaios realizados em escala de bancada em Jarreste e flotatestes. O coagulante empregado em ambos os ensaios foi o tanino Acquapol S5T, nas dosagens de 10, 30 e 50 mg.L⁻¹. O efluente tratado foi analisado em triplicata a partir das variáveis Demanda Química de Oxigênio (DQO), pH, turbidez, cor verdadeira, fenóis totais e varredura espectrofotométrica. Para análise estatística empregou-se o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) como desenho experimental, com aplicação de Teste-T para comparação das médias, utilizando o software Assistat.

Os resultados obtidos a partir do tratamento com CFS e FAD mostraram-se satisfatórios especialmente no que se refere à remoção de cor e turbidez. A eficiência de remoção de turbidez atingiu 81%, para o ensaio CSF (50 mg.L⁻¹) e 68% para FAD (50 mg.L⁻¹), sendo estes os maiores percentuais de remoção alcançados. Em relação à remoção de cor, as dosagens de 30 e 50 mg.L⁻¹, tanto para CSF quanto FAD, foram efetivas, com percentuais de remoção acima de 35%. Em relação à DQO e fenóis totais, verificou-se que os tratamentos não foram significativos estatisticamente, mostrando que as técnicas aplicadas não foram eficientes para a redução destes parâmetros. A partir da realização deste trabalho foi possível realizar ensaios comparativos e verificar a eficiência das técnicas de tratamento testadas. Ambos os processos estudados são adequados quando aplicados como etapa de pré-tratamento.

PALAVRAS-CHAVE: Agente Coagulante, Melhoria da Qualidade, Ensaios de Laboratório, Efluente Industrial.

INTRODUÇÃO

O Brasil é hoje um dos maiores produtores mundiais de celulose e papel, o que faz com que esta atividade industrial contribua de forma significativa para a economia nacional. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Árvores (IBÁ, 2017), em 2016 o país ocupou a segunda colocação entre os maiores produtores mundiais de celulose, com 18,8 milhões de toneladas produzidas e a oitava colocação em relação à produção de papéis (10,3 milhões de toneladas).

Conforme Vilas Boas (2019), em relação à linha de papéis para fins sanitários (tissue), atingiu-se em dezembro de 2018 o volume de 114,9 mil toneladas, representando um crescimento de 3,4% comparativamente ao mesmo período do ano de 2017. No ano de 2018, a produção foi de 1,35 milhão de toneladas em volume, evidenciando o aumento na capacidade de produção de papéis desta linha.

Este setor, apesar de sua reconhecida importância econômica, pode contribuir com impactos ambientais negativos, dados os elevados volumes de água consumidos no processo e a geração de efluentes líquidos de difícil tratabilidade, em função da presença de compostos recalcitrantes, cor, sólidos em suspensão e alta carga orgânica (CETESB, 2008; LIMA, 2007). Apesar da composição do efluente de indústria de papel e celulose variar em função do tipo de produto fabricado, já foram identificadas em seus componentes mais de um milhar de substâncias químicas, tais como compostos organoclorados, resinas, metais pesados, agentes tensoativos, soda cáustica, cor elevada, resíduos de cloro e ácidos (CETESB, 2008).

Sob o aspecto quantitativo, a indústria de papel apresenta uma geração de efluentes com vazões muito variáveis, sendo esta uma função do tipo de processo empregado para a fabricação e da capacidade produtiva da indústria (BRANDÃO, 2014). O volume de água utilizado está diretamente relacionado com a geração e/ou emissão de efluente, no entanto, o potencial poluidor depende da operação na qual a fábrica está e do grau de fechamento dos circuitos (SPRINGER et al., 2000).

Assim, as características qualitativas e quantitativas dos efluentes gerados na indústria de celulose e papel dependem do tipo de processo, do tipo de madeira utilizada, da tecnologia aplicada, das práticas de gerenciamento adotadas, da recirculação de efluente e da quantidade de água consumida pela planta industrial (POKHREL; VIRARAGHAVAN, 2004).

Dentre os processos mais comumente empregados para o tratamento de efluentes de indústrias de celulose e papel destacam-se os sistemas biológicos por lodos ativados e lagoas aeradas (FOELKEL, 2014; VIRKUTYTE, 2016).

O sistema de lodos ativados compreende o emprego de um reator biológico com aeração, onde os microrganismos são mantidos em suspensão, e de uma unidade posterior de decantação, sendo que há a recirculação de sólidos para o reator. O termo “lodos ativados” é utilizado para designar a produção da biomassa que ocorre no reator e é capaz de estabilizar o efluente (METCALF; EDDY, 2016). Segundo Von Sperling (1997), este sistema de tratamento é comumente utilizado em situações onde se requer elevada qualidade do efluente final e reduzidos requisitos de área. Basicamente, são partes integrantes da etapa biológica o tanque de aeração (reator), o decantador secundário e a recirculação de lodo. No tanque de aeração ocorrem as reações bioquímicas de remoção da matéria orgânica, onde a biomassa se utiliza do substrato para o seu desenvolvimento. Esta biomassa que cresce em grandes taxas é removida no decantador secundário, onde acontece a sedimentação dos sólidos. Parte desta biomassa decantada ainda é ativa e pode ser recirculada para o reator biológico, aumentando a concentração da mesma e permitindo grandes eficiências ao sistema (VON SPERLING, 1997).

As lagoas aeradas atuam de modo similar ao reator biológico do sistema de lodos ativados, no entanto, não há recirculação de sólidos, o que faz com que a eficiência destas seja relativamente menor àquela alcançada pelo lodo ativado (VON SPERLING, 2002). Este sistema, comparativamente a outras modalidades de lagoas de estabilização, exige menores áreas para o tratamento, sobretudo porque o oxigênio necessário às reações metabólicas dos microrganismos é suprido artificialmente, por meio de aeradores ou difusores de ar. Este sistema de lagoas pode operar de maneira facultativa (quando do provimento de oxigênio é mais baixo e há uma turbulência moderada) ou por mistura completa (quando o fornecimento de oxigênio se dá em maior grau

e todos os sólidos são mantidos em suspensão pela turbulência gerada). Neste último caso é necessário utilizar uma lagoa de decantação na sequência, para que ocorra a sedimentação dos sólidos (NUVOLARI, 2011).

Os tratamentos de efluente empregando processos biológicos são utilizados com frequência, pois permitem tratar um grande montante de efluente, transformando os compostos orgânicos presentes em CO_2 e H_2O nos sistemas aeróbicos, ou até mesmo em CH_4 e CO_2 em sistemas anaeróbios, com custos relativamente baixos. Os sistemas supracitados operam em condições possíveis de serem controladas, isto é, carga orgânica alta o que consequentemente gera taxas altas de conversão (KAMALI; KHODAPARAST, 2015).

Entretanto, o tratamento biológico por si só, muitas vezes não é suficiente para que o efluente da indústria de celulose e papel atenda aos padrões de lançamento, os quais são estabelecidos pela Resolução nº 430/11, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Amaral et al. (2013) avaliaram o efluente do branqueamento de polpa celulósica por processos aeróbios e anaeróbios e concluíram que sua biotratabilidade é limitada, sugerindo assim a necessidade de conjugar os tratamentos biológicos com processos físico-químicos. Dentre estes processos, pode-se citar a coagulação/floculação/sedimentação (CFS) e a flotação por ar dissolvido (FAD).

A CFS e a FAD são operações unitárias físico-químicas usadas para separar partículas sólidas ou líquidas de uma fase líquida. A CFS compreende o conjunto de mecanismos e reações que levam à desestabilização química das partículas e a consequente formação de partículas maiores e agregadas em função da colisão entre elas (floculação). O floco formado pode ser então removido por meio de sedimentação gravitacional.

A coagulação é essencial para reduzir as interações repulsivas entre partículas ou flocos e bolhas, e ainda, flocos com baixos potenciais zeta podem ser produzidos pela coagulação utilizando algumas substâncias químicas (EDZWALD, 2010).

A sedimentação é um fenômeno físico, onde devido a forças da ação da gravidade, as partículas movimentam-se no sentido descendente no meio líquido, diferentemente da decantação, visto que as partículas sedimentam enquanto a água decanta. Os processos de coagulação e floculação possibilitam que, mediante a agregação das partículas coloidais, estas consigam adquirir um diâmetro físico tal que a confirmem uma velocidade de sedimentação elevada o suficiente para serem removidas por sedimentação gravitacional. A sedimentação das partículas suspensas propicia a clarificação do meio líquido, ou seja, separação das fases líquida e sólida (DI BERNARDO et al., 2011; FERREIRA FILHO, 2017).

Na FAD, a inserção de microbolhas à fase líquida provoca a ascensão do material particulado para a superfície. As microbolhas são formadas a partir da pressurização do ar, o qual, posteriormente, é liberado à pressão atmosférica. Desta maneira, o floco tenderá a ascender verticalmente e separar-se da fase líquida. A redução da massa específica do floco é garantida pela adesão de partículas de ar liberadas na fase líquida sob condições controladas (FERREIRA FILHO, 2017). A separação dos particulados é rápida, pois a FAD possui baixo tempo de retenção da água no flotador pela ação das microbolhas que reduzem a densidade aparente das partículas. Já a etapa de formação das microbolhas é essencial na FAD, pois o seu tamanho médio influencia na separação das partículas. (FONSECA, 2017).

Comparativamente à sedimentação, a FAD possui como vantagem a remoção de partículas muito pequenas ou muito leves em curto intervalo de tempo, que sedimentam lentamente. A FAD é uma das tecnologias mais propícias para a clarificação, quando comparada aos decantadores. Em ambos os processos podem ser empregados aditivos químicos, que funcionam como auxiliares para a agregação do material particulado, facilitando a remoção destes (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2011; METCALF; EDDY, 2016). Portanto, mesmo partículas com densidade superior à da água podem ser carregadas para a superfície e aquelas com densidade menor podem ter sua flotação facilitada (METCALF & EDDY, 2003).

Diante do exposto, percebe-se a aplicabilidade destas técnicas, bem como a importância da realização de estudos que visem otimizar as configurações dos ensaios e testem diferentes polímeros e coagulantes, a fim de se verificar qual delas apresenta maior viabilidade e eficiência para tratar efluentes do processo de produção de celulose e papel.

Neste sentido, este trabalho teve como objetivo geral avaliar a eficiência dos processos de coagulação/floculação/sedimentação (CFS) e flotação por ar dissolvido (FAD) no tratamento de efluente de uma indústria de papel tissue.

MATERIAL E MÉTODOS

O efluente foi coletado na saída do decantador primário em uma fábrica de papel sanitário (tissue), localizada na região centro-sul do estado do Paraná. A produção da linha tissue se dá a partir do uso de celulose virgem adquirida pela empresa, bem como a partir da reciclagem de aparas. O tratamento de efluentes atualmente empregado pela empresa compreende a decantação primária seguida por tanques de aeração e decantador secundário, caracterizando um sistema de lodos ativados.

Após a coleta, o efluente foi caracterizado em laboratório e submetido aos ensaios de CFS e FAD. O coagulante empregado em ambos os ensaios foi o tanino Acquapol S5T, nas dosagens de 10, 30 e 50 mg.L⁻¹, definidas após testes de otimização. O Acquapol S5T é produzido a partir de árvores reflorestadas de Acácia Negra, sendo um produto orgânico, biodegradável e não tóxico. Apresenta o aspecto físico de um líquido castanho, caráter catiônico, densidade entre 1,07 a 1,17 g.(cm³)⁻¹ e pH de 1,9 a 2,5 (a 20°C, em solução de 200g.L⁻¹) (SETA, 2019).

Para os ensaios de CFS usou-se um equipamento Jar-Test, marca Policontrol, modelo FlocControl III, cujas configurações foram ajustadas conforme as proposições de Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011). Usou-se gradiente de mistura rápida de 600 s⁻¹, tempo de mistura rápida de 10 s, gradiente de mistura lenta de 40 s⁻¹, tempo de mistura e de sedimentação de 20 min, respectivamente. O tempo de coleta ocorreu aos 19 min e 35s e a duração foi de 30 s.

Os ensaios de FAD foram realizados em equipamento Flotateste da marca Nova Ética, também seguindo a metodologia proposta por Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011). O equipamento de Flotateste 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. O ar é dissolvido na massa líquida, sob pressão elevada relativamente superior à pressão atmosférica. Após, é introduzido nos jarros por meio de mangueiras de condução instaladas no sistema. A redução da pressão para condições de pressão atmosférica permite a liberação das bolhas de ar no meio líquido, dando início assim a flotação, com o arraste dos flocos para a superfície, onde estes se acumulam.

O coagulante e as dosagens empregadas foram os mesmos usados nos ensaios de CFS, de modo a ser possível a comparação entre os resultados obtidos pelas duas técnicas. Os parâmetros adotados para a realização dos ensaios no flotatestes foram: percentual de recirculação de 20%, pressão de 5 bar, velocidade ascensional de 5 cm.min⁻¹, tempo de saturação do ar na câmara de saturação de 15 min e tempo de coagulação de 20 min. O tempo e a duração da coleta foram de 2 min e 06s e 20 s, respectivamente.

O efluente bruto¹ e tratado (para cada método e dosagem utilizados) foi analisado, em triplicata, a partir das variáveis Demanda Química de Oxigênio (DQO), pH, turbidez, cor verdadeira, fenóis totais e varredura espectrofotométrica, seguindo as recomendações dos métodos estabelecidos na 22a edição do *Standard Methods for Examination of the Water and Wastewater* (APHA, 2012). Usou-se Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) como desenho experimental. Os resultados obtidos a partir dos ensaios de CFS e FAD foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA), no software *Assistat*, sendo previamente checados quanto à homogeneidade de variância pelo teste de Bartlett. Aplicou-se teste-T para comparação das médias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da caracterização do efluente bruto coletado são apresentados na tabela 1 a seguir.

¹ Apesar de ter sido coletado na saída do decantador primário, o efluente foi denominado “bruto” neste trabalho.

Em se tratando de efluente de indústria papelreira coletado da saída do decantador primário, já eram esperados valores relativamente elevados para a cor verdadeira e DQO. Para Sakurai (2016) e Von Sperling (2005), a cor verdadeira é ocasionada pela presença de sólidos dissolvidos e material em estado coloidal nas formas orgânicas e inorgânicas. A DQO está associada à presença de material orgânico, tanto biodegradável quanto não biodegradável (VON SPERLING, 2005).

Tabela 1: Caracterização do efluente bruto.

Parâmetro	Resultados (média e desvio padrão)	Coefficiente de variação (%)
pH	7,09 ± 0,43	6,06
Turbidez (uT)	68,23 ± 24,22	35,50
Cor verdadeira (uC)	183,67 ± 70,00	38,11
DQO solúvel (mg.L ⁻¹)	338,37 ± 126,55	37,40
Fenóis totais (mg.L ⁻¹)	6,77 ± 1,78	25,28

A turbidez, pH e cor verdadeira encontrados foram convergentes com os resultados obtidos por Prestes et al. (2016), ao caracterizarem o efluente de uma fábrica de papel do tipo *low weight coat*. Resultados similares também foram obtidos por Bender et al. (2016) a partir da realização de ensaios para tratamento de efluente de água branca de máquina de papel.

Em relação à concentração inicial de fenóis totais (6,77 mg.L⁻¹) verificou-se que estes foram mais baixos do que tradicionalmente se verifica para indústrias de celulose e papel (CHENG et al., 2015). Concentrações mais elevadas de fenóis ocorrem por ocasião das etapas de branqueamento da polpa de celulose (VIRKUTYTE, 2016), o qual não é realizada pela indústria em questão, que adquire a celulose branqueada de terceiros. Apesar disto, considerando os atuais padrões de lançamento de efluentes para este parâmetro (0,5 mg.L⁻¹) (CONAMA, 2011), bem como sua toxicidade e recalcitrância (SUHR et al., 2015), é necessário estudar técnicas que auxiliem em sua remoção, uma vez que os resultados de caracterização indicaram uma concentração de fenol no efluente bruto significativamente maior ao padrão preconizado pela legislação.

Os resultados obtidos a partir do tratamento com CFS e FAD (Tabelas 2 e 3) mostraram-se satisfatórios especialmente no que se refere à remoção de cor e turbidez.

Tabela 2: Resultados obtidos entre os tratamentos CFS e FAD em comparação ao efluente bruto.

Tratamentos	Variáveis			
	DQO solúvel (mg.L ⁻¹)	Turbidez (uT)	Cor verdadeira (uC)	Fenóis (mg.L ⁻¹)
Efluente bruto	338,37 ± 126,55 a	68,23 ± 24,22 a	183,67 ± 70,00 ab	6,77 ± 1,78 a
CFS (10 mg.L ⁻¹)	385,93 ± 224,15 a	48,17 ± 27,35 ab	241,67 ± 133,37 a	5,90 ± 3,27 a
CFS (30 mg.L ⁻¹)	336,40 ± 178,94 a	22,73 ± 14,56 b	117,00 ± 41,51 b	5,67 ± 2,04 a
CFS (50 mg.L ⁻¹)	319,30 ± 150,50 a	13,17 ± 7,07 b	86,00 ± 24,33 b	5,60 ± 1,45 a
FAD (10 mg.L ⁻¹)	306,48 ± 95,89 a	57,87 ± 23,68 a	195,00 ± 83,81 ab	5,73 ± 0,38 a
FAD (30 mg.L ⁻¹)	287,93 ± 90,44 a	35,53 ± 21,55 ab	116,33 ± 22,03 b	4,93 ± 0,83 a
FAD (50 mg.L ⁻¹)	291,03 ± 91,41 a	21,51 ± 14,00 b	96,00 ± 30,51 b	4,70 ± 0,26 a

Para cada coluna (parâmetro), as médias seguidas das mesmas letras não diferem, estatisticamente, entre si (ao nível de 5% de probabilidade).

Tabela 3. Eficiências entre os tratamentos CSF e FAD.

Tratamentos	Variáveis				
	DQO solúvel (mg.L ⁻¹)	Ph	Turbidez (uT)	Cor verdadeira (uC)	Fenóis (mg.L ⁻¹)
CFS (10 mg.L ⁻¹)	-14%	3%	29%	-32%	13%
CFS (30 mg.L ⁻¹)	1%	3%	67%	36%	16%
CFS (50 mg.L ⁻¹)	6%	3%	81%	53%	17%
FAD (10 mg.L ⁻¹)	9%	2%	15%	-6%	15%
FAD (30 mg.L ⁻¹)	15%	2%	48%	37%	27%
FAD (50 mg.L ⁻¹)	14%	1%	68%	48%	31%

O parâmetro pH não foi considerado como variável resposta para os tratamentos usados. Observou-se uma variação de 3% entre o resultado determinado para o efluente bruto (7,09) em todos os ensaios de CSF, de 2% para os ensaios FAD (10 mg.L⁻¹) e (FAD 30 mg.L⁻¹), e 1% para o ensaio FAD 50 mg.L⁻¹. Esta pequena variação pode ser explicada pelo fato de o coagulante tanino não consumir alcalinidade do meio e possuir a propriedade de não alterar o pH, o que representa uma vantagem, já que se evita a necessidade de utilização de agentes alcalinizantes no tratamento, levando a economia com uso de produtos químicos quando as técnicas de tratamento são aplicadas em escala empresarial (SKORONSKI et al., 2014).

Pode-se constatar que o emprego dos métodos de tratamento apresentou bons resultados para a remoção de turbidez. Percebeu-se que a redução das partículas em suspensão foi proporcional à concentração de coagulante usada, para ambos os processos. A diferença de turbidez entre as amostras bruta e tratadas foi de 81%, para o ensaio CSF (50 mg.L⁻¹) e 68% para FAD (50 mg.L⁻¹), sendo estes os maiores percentuais de remoção alcançados. Cabe destacar que com o uso da CSF (30 mg.L⁻¹) já se alcançou 67% de remoção, mostrando que, para este parâmetro, a CSF foi a técnica mais conveniente.

Em relação à remoção de cor, as dosagens de 30 e 50 mg.L⁻¹, tanto para CSF quanto FAD, foram efetivas, com percentuais de remoção acima de 35%. As remoções encontradas para as condições anteriormente descritas não diferiram, estatisticamente, entre si, apresentando bons resultados para ambos os métodos. Ainda para este parâmetro, a dosagem de coagulante foi um fator relevante, uma vez que, em termos estatísticos, a menor dosagem levou a um aumento da cor para CSF (10 mg.L⁻¹) e não demonstrou efetividade para FAD (10 mg.L⁻¹), comparativamente ao efluente bruto. Assim, percebe-se que a remoção de cor está atrelada ao uso de maiores concentrações de agentes coagulantes.

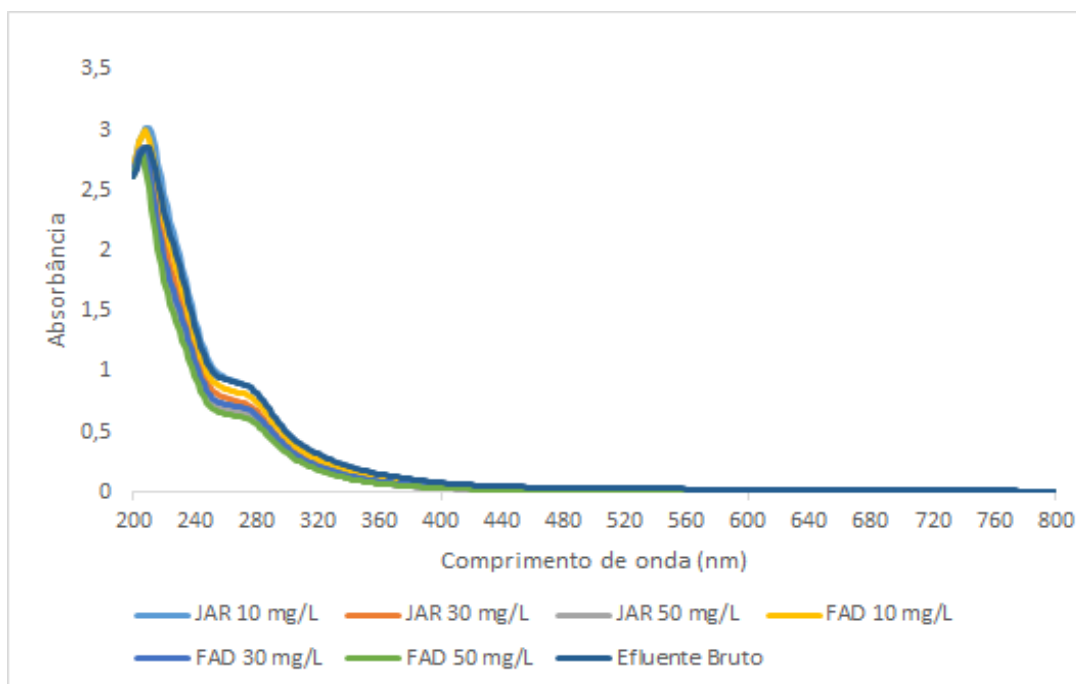
Gavino (2016) estudou a aplicação da CFS para tratamento avançado de efluente de indústria de papel e celulose, após passagem deste por lagoa anaeróbia, aerada e de polimento. O autor concluiu que a dosagem de 160 mg.L⁻¹ de tanino Acquapol S5T permitiu remover mais de 97% da turbidez e cor aparente das amostras. O estudo realizado, apesar de aplicar o tratamento para polimento de efluente, apresentou dados concordantes aos obtidos no presente trabalho, uma vez que se constatou diferenças estatisticamente significativas para as variáveis resposta consideradas.

Em relação à DQO e fenóis totais, verificou-se que os tratamentos não foram significativos estatisticamente. Apesar disso, observou-se que os tratamentos FAD (30 mg.L⁻¹) e FAD (50 mg.L⁻¹) diminuíram em 15% e 14%, respectivamente, a concentração de DQO e 27% e 31% a concentração de fenóis, indicando que a técnica pode ser aplicada para a remoção destes poluentes, sendo necessários novos estudos com dosagens de coagulantes distintos para se encontrar resultados mais conclusivos.

Prestes et al. (2016) estudaram a utilização da CFS como técnica de tratamento de efluentes de indústria de papel. Os autores propuseram o uso de coagulante natural tanino e verificaram que a melhor dosagem foi de 125 mg.L⁻¹, com remoções de 88% para a turbidez, 60% para cor verdadeira e 46% para DQO. Concluíram que a técnica proposta é uma alternativa interessante como etapa de pré-tratamento, já que os valores de remoção para a matéria orgânica não foram elevados, tal como percebido neste trabalho.

Outros estudos como de Managó et al. (2018), Bender et al. (2016), Quartaroli et al. (2014) e Kuritza (2012) também demonstram o potencial de utilização das técnicas de CFS e FAD como alternativa para tratamento dos efluentes gerados por tipologia industrial correlata (papel e celulose). Comparativamente aos resultados obtidos no presente trabalho, pode-se perceber que a dosagem de coagulante é um fator importante para a melhoria da eficiência do processo, no entanto, quanto maior este valor, maiores também são os gastos da indústria na aquisição de produtos químicos. Por isso, é relevante realizar ensaios com dosagens baixas e intermediárias, a fim de se encontrar qual seria a concentração ótima de coagulante para cada situação investigada.

A varredura espectrofotométrica realizada mostrou a redução da área espectral do efluente bruto e das amostras após CFS e FAD, com variações nas dosagens (Figura 1). Os intervalos de comprimento de onda em que foram realizadas essas varreduras foram de 200 a 800 nm. Nela pode-se observar a redução da absorbância na região de 280 nm, onde se absorvem os compostos de lignina. A varredura espectral ocorre pelo princípio de que a absorção da luz UV pelos compostos é proporcional a sua concentração.



FAD: ensaio de flotação; JAR: ensaio de coagulação/floculação/sedimentação.

Figura 1: Varredura espectrofotométrica.

Grande parte da literatura cita o emprego das técnicas como pós-tratamento, diferentemente deste trabalho, o qual aplicou a CFS e a FAD em um efluente coletado logo após o tratamento de nível primário. Neste aspecto, as eficiências de remoção atingidas ficaram aquém àquelas comumente reportadas pelas pesquisas que utilizam estes métodos como tratamento complementar.

Suhr et al. (2015), comenta, por exemplo, que o uso de processos de coagulação química bem controlados pode remover de 30 a 50% da DQO de um efluente de papel e celulose previamente tratado biologicamente, o que ratifica os resultados inferiores encontrados neste trabalho. Entretanto, isto não inviabiliza a aplicação da CFS e FAD, já que seu uso como pré-tratamento reduz parcialmente a concentração dos poluentes do efluente, diminuindo o volume das unidades de tratamento biológico subsequentes.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O setor de celulose e papel, apesar de sua importância econômica, pode ocasionar impactos ambientais, especialmente relacionados ao consumo hídrico e descarte dos efluentes líquidos gerados.

Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível realizar ensaios comparativos e verificar a eficiência das técnicas de tratamento testadas (CFS e FAD). A partir dos resultados obtidos, conclui-se que ambos os processos estudados são adequados quando aplicados como etapa de pré-tratamento de efluente de indústrias de papel e celulose.

Os percentuais de remoção mais significativos se deram para as variáveis turbidez (81%) e cor (53%) quando da utilização da técnica CFS, com dosagem de coagulante de 50 mg.L⁻¹.

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de ensaios com novos agentes coagulantes e dosagens e a variação dos parâmetros de configuração do Jar-test e Flotatest, para se verificar a influência destes nas eficiências de remoção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMARAL, M.C.S., ANDRADE, L.H., LANGE, L.C., BORGES, C.P. Avaliação da biotratabilidade do efluente de branqueamento de polpa celulósica por processos aeróbios e anaeróbios. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.18, n.3, p.253-262, 2013.
2. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA; AWWA, WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22 ed. Washington: American Public Health Association, 2012.
3. BENDER, A.F., PRESTES, A.P.B., MANAGÓ, B.L., VIDAL, C.M.S., TELEGINSKI, E. Flotação e membranas ultrafiltrantes como tratamento de efluente água branca de máquina de papel. *Enciclopédia Biosfera*, v. 13, n.24, p.553-563, 2016.
4. BRANDÃO, M.D. Avaliação operacional da estação de tratamento de efluentes de uma indústria de papel. Viçosa, 2014. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Viçosa, 2014.
5. CETESB. Guia técnico ambiental da indústria de papel e celulose – série P+L. São Paulo: Governo do Estado – CETESB, 2008.
6. CHENG, Z., YANG, R., WANG, B., YANG, F. Chlorophenol Degradation in Papermaking Wastewater through a Heterogeneous Ozonation Process Catalyzed by Fe-Mn/Sepiolite. *BioResources*, v.10, n.3, p.5503-5514, 2015.
7. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. *Diário Oficial da União*, nº 92, 16 mai. 2011. Seção 1, p. 89.
8. FERREIRA FILHO, S.F. Tratamento de Água: Concepção, Projeto e Operação de Estações de Tratamento—Um Guia Prático para Alunos e Profissionais. Elsevier Brasil, 2017.
9. EDZWALD, J. K. Dissolved air flotation and me. *Water Research*, v. 44, p.2077-2106, abr. 2010.
10. FOELKEL, C. Aplicações da Biotecnologia em Processos Ambientais da Fabricação de Celulose Kraft e de Papel de Eucalipto: Processos Aeróbicos por Lodos Ativados para Tratamento de Efluentes. *Eucalyptus Online Book and Newsletter: ABTCP, BRACELPA, IPEF*, 2014.
11. GAVINO, W.R.G. Tratamento avançado de efluente de indústria de papel e celulose por processos de coagulação e ultrafiltração. Irati, 2016. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2016.
12. IBÁ. Relatório anual 2017. 2017. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em 12 ago. 2018.
13. KAMALI, M., KHODAPARAST, Z. Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v.114, p. 326–342, 2015.
14. KURITZA, J.C. Aplicação da coagulação, floculação e sedimentação como pós-tratamento de efluente de uma indústria de papel e celulose. Irati, 2012. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2012.
15. LIMA, N.R. Controle Ambiental no Setor de Celulose e Papel. Apresentação da Comissão de Meio Ambiente da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. São Paulo: ABTCP, 2007.
16. DI BERNARDO, L., DANTAS, A.D.B., VOLTAN, P.E.N. Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água. São Carlos: LDiBe, 2011.
17. MANAGÓ, B.L., VIDAL, C.M.S., SOUZA, J.B., NEVES, L.C., MARTINS, K.G. Dissolved Air Flotation for Fiber Removal from Clear Water. *Floresta e Ambiente*, v.25, n.2, 2018.
18. METCALF, L., EDDY, H.P. Wastewater engineering, treatment and reuse. 4a ed. New York: Mc Graw Hill, 2003.
19. METCALF, L., EDDY, H.P. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5 ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2016.
20. NUVOLARI, A. Esgoto sanitário: coleta transporte, tratamento e reúso agrícola. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.
21. POKHREL, D., VIRARAGHAVAN, T. Treatment of Pulp and Paper Mill Wastewater – a Review. *Science of the Total Environment*, v. 333, p.37-58, 2004.
22. PRESTES, A.P.B., BENDER, A.F., VIDAL, C.M.S., NEVES, L.C., MANICA, M. Tratamento de efluente de indústria de papel com agente coagulante tanino vegetal. *Enciclopédia Biosfera*, v.13, n.24, p.1043-1051, 2016.
23. SAKURAI, K.S., NEVES, L.C., SOUZA, J.B.de., VIDAL, C.M.S., SOUZA, K.V.de. Pós-tratamento de efluente de indústria de papel e celulose empregando membranas de microfiltração e ultrafiltração combinadas com o processo foto-fenton. *Scientia Forestalis*, v.44, n.112, p.937-945, dez.2016.
24. SPRINGER, A.M., NOLASCO, M.A., PIRES, E.C. Uma Revisão sobre Aspectos Ambientais Relacionados aos Efluentes Líquidos das Indústrias de Celulose e Papel. *O Papel*, p.70-75, set. 2000.

25. SURH, M., KLEIN, G., KOURTI, I., GONZALO, M.R., SANTONJA, G.G., ROUDIER, S., SANCHO, L.D. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. European Commission, EUR 27235 EN – Joint Research Centre – Institute for Prospective Technological Studies. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015.
26. QUARTAROLI, L., KURITZA, J.C., CAVALLINI, G.S., VIDA, C.M.S., SOUZA, J.B. Application of cationic and anionic polymers in dissolved air flotation as a means of post-treatment of pulp and paper industry wastewater. *Scientia Forestalis*, v. 42, n.101, p. 57-67, mar. 2014.
27. SETA. Água e Efluentes. Coagulantes e Floculantes Orgânicos: Acquapol S5T. Disponível em: <<http://www.setaonline.com/pt/agua-e-efluentes/produtos/acquapol>>. Acesso em 12 abr. 2019.
28. SKORONSKI, E., NIERO, B., FERNANDES, M., ALVES, M.V., TREVISAN, V. Estudo da aplicação de tanino no tratamento de água para abastecimento captada no rio Tubarão, na cidade de Tubarão, SC. *Revista Ambiente & Água*, v.9, n.4, p.679-687, 2014.
29. VILAS BOAS, P. Indicadores de papéis tissue. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. O Papel: revista mensal de tecnologia em celulose e papel, n.65, mar. 2019.
30. VIRKUTYTE, J. Aerobic Treatment of Effluents From Pulp and Paper Industries. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Biological Treatment of Industrial Effluents*, 103-130, 2016.
31. VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Lodos ativados. 2. ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 1997.
32. VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Lagoas de Estabilização. 3. ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2002.
33. VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2005.