

# TRATAMENTO DE EFLUENTE KRAFT POR SISTEMA DE LODOS ATIVADOS COM ADIÇÃO DE CARVÃO ATIVADO COMO MEIO SUPORTE

## KRAFT EFFLUENT TREATMENT BY ACTIVATED SLUDGE SYSTEMS WITH ADDED ACTIVATED CARBON AS SUPPORT MEDIUM

**Ketiny Camargo Castro** 

Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Curitiba (PR), Brasil.

**Claudia Regina Xavier** 

Professora titular do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, UTFPR – Curitiba (PR), Brasil.

### Endereço para correspondência:

Ketiny Camargo de Castro – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000 – Cidade Industrial de Curitiba – CEP: 81280-340 – Curitiba (PR), Brasil – E-mail: ketinnycamargo@gmail.com

Recebido em: 20/12/2019

Aceito em: 10/06/2020

## RESUMO

Os efluentes industriais de celulose apresentam uma complexa composição de substâncias, com elevada carga orgânica e compostos recalcitrantes que dificultam o tratamento em sistemas biológicos comumente aplicados, como lodos ativados. Assim, faz-se necessária a realização de estudos para a melhoria desses tratamentos. Nessa perspectiva, este trabalho teve como objetivo avaliar um sistema de lodos ativados com adição de meio suporte de carvão ativado em pó (CAP) para o tratamento de efluente Kraft. Para isso, um reator foi operado por 110 dias, separado em quatro etapas. A primeira apenas de lodos ativados e as outras com concentrações de CAP de 2,4 e 6 g L<sup>-1</sup> (etapas II, III e IV, respectivamente). A remoção da matéria orgânica foi maior nas etapas com meio suporte, obtendo médias de 55,94 e 58% para demanda química de oxigênio, demanda bioquímica de oxigênio e carbono orgânico total, respectivamente. Parâmetros específicos, como cor, derivados de lignina e compostos aromáticos, foram removidos em 28, 29 e 36% em média, respectivamente, nas etapas com o CAP. Observou-se a formação de biofilme na superfície do meio suporte durante o tratamento, com maior concentração de biomassa na etapa IV, alcançando 4.086 mg L<sup>-1</sup> de sólidos suspensos voláteis. No geral, a adição do CAP como meio suporte no sistema de lodos ativados melhorou a eficiência de tratamento, entretanto o aumento da concentração de CAP no reator não apresentou melhorias significativas, o que indica a quantidade de 2 g L<sup>-1</sup> de CAP como a melhor concentração aplicada no sistema de lodos ativados.

**Palavras-chave:** tratamento biológico; efluente de celulose; biofilme.

## ABSTRACT

Pulp mill effluents have a complex composition of substances, with a high organic load and recalcitrant compounds that hinder treatment in commonly applied biological systems, such as activated sludge. Thus, it is necessary to carry out studies to improve these procedures. Therefore, this work aimed to evaluate an activated sludge system with the addition of powdered activated carbon (PAC) as support medium for biomass to treat kraft effluent. The reactor was operated for 110 days in 4 stages. The first stage corresponded to activated sludge only and the others were operated with PAC addition of 2, 4, and 6 g L<sup>-1</sup> (stages II, III, and IV, respectively). The removal of organic matter was greater in the steps with medium support, obtaining averages of 55, 94 and 58% for COD, BOD<sub>5</sub>, and TOC, respectively. Specific parameters such as color, lignin derivatives and aromatic compounds were removed in, on average, 28, 29 and 36%, respectively in the stages with the PAC. Biofilm formation was observed on the surface of the support medium during treatment, with a higher concentration of biomass in step IV, reaching 4,086 mg L<sup>-1</sup> of volatile suspended solids. Overall, the addition of PAC as a support medium in the activated sludge system has improved treatment efficiency. However, the increase in the concentration of PAC in the reactor did not show significant improvements, which indicates the amount of 2 g L<sup>-1</sup> of PAC as the best concentration applied in the activated sludge system.

**Keywords:** biological treatment; cellulose effluent; biofilm.

## INTRODUÇÃO

A indústria de celulose tem como características o elevado consumo de água e o alto potencial para poluição ambiental. O efluente gerado nesse setor depende essencialmente do tipo de matéria-prima utilizada, do tipo de tecnologia de processo aplicada, da quantidade de recirculação interna do efluente e de demais práticas de gestão, tais como condições operacionais e presença de aditivos (HUBBE *et al.*, 2016; KAMALI *et al.*, 2019). A polpação por processos químicos, especialmente o Kraft, é atualmente a tecnologia mais aplicada nas indústrias do setor, na qual tem-se a geração de efluentes com altas concentrações de matéria orgânica, presença de cor e compostos tóxicos oriundos dos derivados da lignina e outros extrativos da madeira, além dos produtos químicos utilizados no processo. Esse efluente, quando não tratado ou tratado inadequadamente, pode comprometer a qualidade da água dos corpos receptores, ocasionando danos à comunidade aquática (ORREGO *et al.*, 2019; PEITZ; XAVIER, 2019).

Diversas tecnologias de tratamento são empregadas visando à remoção da matéria orgânica, da cor e dos compostos derivados da madeira do efluente Kraft. Entre elas, os sistemas biológicos como lodos ativados e lagoas de estabilização são os mais aplicados (HUBBE *et al.*, 2016; KAMALI *et al.*, 2019; MACHADO; XAVIER; COUTO, 2018). Tais sistemas apresentam resultados promissores na remoção de matéria orgânica biodegradável, entretanto têm baixa eficiência quanto à redução de cor e compostos derivados da lignina (KAMALI *et al.*, 2019; PEITZ; XAVIER, 2019). A utilização de reatores com biomassa fixada em material suporte, como o carvão ativado, tem apresentado vantagens para o tratamento de efluentes industriais, visto que se tem uma configuração de sistema mais compacta, capaz de enfrentar variações de cargas orgânica e hidráulica, além de suportar os compostos tóxicos presentes no efluente (BOU *et al.*, 2018; BRINK; SHERIDAN; HARDING, 2017; MUHAMAD *et al.*, 2015; PEITZ; XAVIER, 2019; SOLER; XAVIER, 2015; WANG *et al.*, 2016).

O carvão ativado também vem sendo utilizado em tratamentos de efluentes de indústria de celulose, principalmente para a remoção de cor e compostos recalcitrantes por meio do processo de adsorção, atingindo cerca de 80% de remoção desses compostos (ANTONY *et al.*, 2012; FENG *et al.*, 2020; HINOJOSA; XAVIER, 2016; KAMALI *et al.*, 2019). No processo de adsorção, o carvão é aplicado como material adsorvente por apresentar características como alta área superficial específica (ASE) (acima

de  $700 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ), superfície irregular, volume de poros elevado e sítios ativos que favorecem a ligação e aderência de contaminantes, facilitando sua remoção do meio aquoso (GEREMIAS *et al.*, 2012; MISHRA; MISHRA; KHAN, 2010; XAVIER; TRAGHETTA; OLIVEIRA, 2010). Entretanto, esse processo tem como principal desvantagem a saturação dos sítios ativos do carvão, limitando o seu uso a um curto período tempo (MUHAMAD *et al.*, 2015).

Nesse sentido, a utilização do carvão ativado como meio suporte suspenso em sistemas de tratamentos biológicos se torna interessante, isso porque a elevada área específica disponível e a superfície irregular do carvão ativado em pó (CAP) podem facilitar a aderência de microrganismos e a formação de biofilme na superfície desse material, favorecendo a biodegradação dos contaminantes (BOU *et al.*, 2018; OSMAM *et al.*, 2013; YU *et al.*, 2019).

Buscando um sistema de tratamento estável e capaz de produzir um efluente tratado com melhor qualidade, foi desenvolvido o processo de lodos ativados com adição de carvão ativado em pó (PACT<sup>®</sup>), aplicado principalmente para tratamento de efluentes industriais (WANG *et al.*, 2016; YU *et al.*, 2019). Nele, o carvão ativado é utilizado como meio suporte suspenso para os microrganismos, fornecendo mais estabilidade no sistema, o que corrobora melhor condição de biodegradabilidade (BOU *et al.*, 2018; CAMPOS *et al.*, 2014).

O PACT<sup>®</sup> destaca-se em comparação aos sistemas de lodos ativados convencionais, principalmente pela maior concentração de biomassa, capaz de tratar maior quantidade de carga orgânica em menor tempo de detenção hidráulica (TDH). Ele já foi empregado para tratamentos de efluentes industriais, como aqueles de indústrias químicas e petroquímicas, além de tratamento de chorume, proporcionando a remoção de cor e de compostos recalcitrantes (BOU *et al.*, 2018; CAMPOS *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2016; YU *et al.*, 2019).

Entretanto, a utilização do processo PACT<sup>®</sup> para tratamentos biológicos de efluentes de indústrias de celulose é pouco estudada, o que torna interessante o estudo desse sistema para o tratamento de um efluente com tamanha complexidade. Com base no exposto, o presente estudo avaliou a adição de carvão ativado em um sistema de lodos ativados para o tratamento de efluente Kraft de uma indústria de celulose.

## MATERIAIS E MÉTODOS

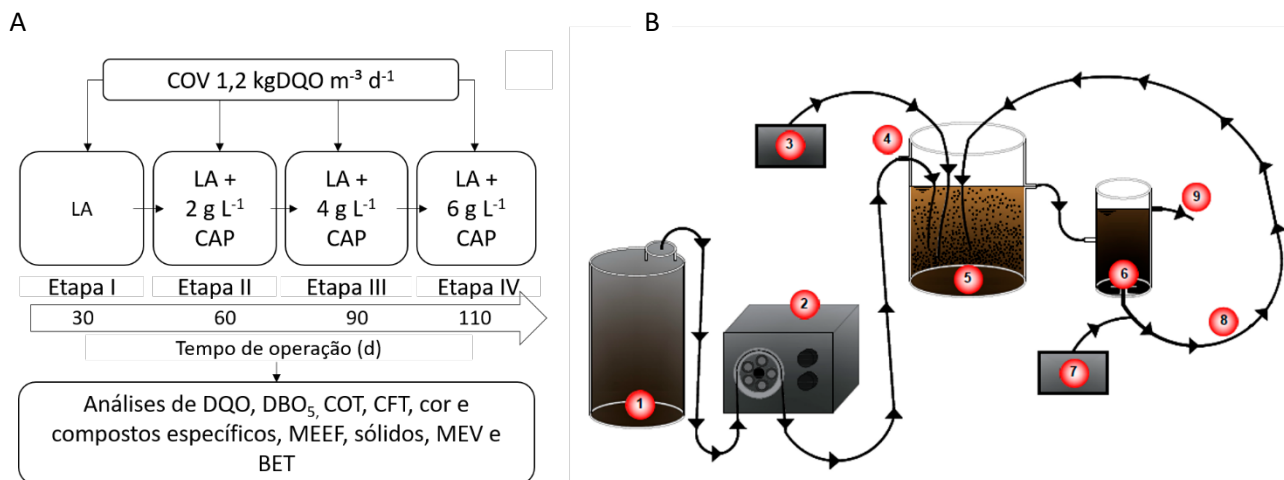
### Coleta e caracterização do efluente industrial de celulose

O efluente utilizado no estudo foi disponibilizado por uma indústria de celulose localizada na região metropolitana de Curitiba (PR), Brasil. Foram realizadas três coletas durante o período de operação do sistema. Essas coletas eram feitas sempre que a última amostra do efluente armazenado no laboratório estava se findando. O efluente era coletado na entrada do sistema de tratamento biológico da indústria, em dias e horários aleatórios, e em seguida transportado em galões de 30 L, mantido em temperatura de 4°C e na ausência de luz.

### Caracterização do meio suporte

O CAP utilizado no estudo foi fabricado com casca de coco. Para a caracterização desse material, foram realizadas a determinação da ASE e a distribuição de volume de poros de uma amostra do CAP utilizado nesta pesquisa. A amostra de CAP foi pré-tratada com aquecimento a 150°C a vácuo durante quatro horas. As isotermas de adsorção e dessorção de nitrogênios foram obtidas em um analisador de sorção de gás Quantachrome, modelo NOVA 2000e. A ASE da amostra foi

calculada utilizando o método com pontos múltiplos Brunauer-Emmet-Teller, desenvolvido para multicamadas, de acordo com a determinação da International Organization for Standardization (ISO) 9277 (ISO, 2010). O volume e o raio médio dos poros foram calculados pela análise da curva de dessorção utilizando o modelo de Barret-Joyner-Halenda, conforme descrito por Luz *et al.* (2013).



1: reservatório de efluente Kraft; 2: bomba peristáltica; 3: compressor de ar usado na aeração do reator; 4: entrada do afluente; 5: reator aeróbio; 6: decantador; 7: compressor de ar usado na recirculação do lodo; 8: recirculação de lodo; 9: saída do efluente tratado; COV: carga orgânica volumétrica; LA: lodos ativados; CAP: carvão ativado em pó; DQO: demanda química de oxigênio; DBO<sub>5</sub>: demanda bioquímica de oxigênio; COT: carbono orgânico total; CFT: compostos fenólicos totais; MEEF: matriz de emissão e excitação de fluorescência; MEV: microscopia eletrônica de varredura; BET: técnica de análise de área superficial específica Brunauer—Emmet—Teller.

**Figura 1 – (A) Fluxograma metodológico do experimento; (B) sistema de lodos ativados com carvão ativado em pó.**

## Operação do sistema de tratamento

O sistema empregado foi de lodos ativados, composto de um reator aeróbio com o volume útil de 1 L, seguido de tanque decantador (0,5 L) e sistema de retorno *airlift*. A alimentação do reator deu-se por meio de bomba peristáltica (modelo Milan — Mod. BP600), e a aeração foi promovida por compressores de ar com vazão média de 50 L O<sub>2</sub> h<sup>-1</sup>. Para o preparo do afluente, antes do tratamento foi adicionada solução contendo NH<sub>4</sub>Cl (19,103 g L<sup>-1</sup>) e K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (5,624 g L<sup>-1</sup>), de modo a se obter a proporção de 100:5:1 para a DQO:N:P. Além disso, o pH do afluente foi ajustado para 7,0 ± 0,1 (PEITZ; XAVIER, 2017). Na Figura 1, é possível observar o fluxograma experimental e o sistema do reator de lodos ativados com CAP como meio suporte.

A carga orgânica volumétrica (COV) adotada foi de 1,2 kg<sub>DQO</sub> m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>. A vazão de entrada e o TDH foram

controlados em função da COV prevista. Ao reator, foi adicionado lodo proveniente da estação de tratamento de efluente de celulose para a concentração de 2,5 g L<sup>-1</sup> de sólidos suspensos voláteis (SSV). Após a montagem e estabilização do sistema, o tratamento foi avaliado durante quatro etapas no período total de 110 dias, sendo a etapa I apenas com lodos ativados e as etapas II, III e IV com concentrações de 2,4 e 6 g L<sup>-1</sup> de CAP acumulado ao longo do tratamento, ou seja, a cada 30 dias de operação foram adicionados 2 g L<sup>-1</sup> de CAP até a obtenção do total de 6 g L<sup>-1</sup>. É válido ressaltar que o sistema foi operado de forma contínua e que o reator foi alimentado com efluente bruto proveniente da indústria durante todo o período de operação, não sendo feita a recirculação do efluente tratado.

**Tabela 1 – Frequência de análises realizadas e os métodos analíticos utilizados\*.**

Parâmetro	Frequência	Método/Equipamento/Referência
CFTs	3 vezes por semana	Abs <sub>215</sub> - Espectrofotômetro UV-Vis Varian (CHAMORRO <i>et al.</i> , 2010)
Compostos aromáticos	3 vezes por semana	Abs <sub>254</sub> - Espectrofotômetro UV-Vis Varian (ÇEÇEN, 2003)
Compostos lignínicos	3 vezes por semana	Abs <sub>280</sub> - Espectrofotômetro UV-Vis Varian (ÇEÇEN, 2003)
Compostos lignossulfônicos	3 vezes por semana	Abs <sub>346</sub> - Espectrofotômetro UV-Vis Varian (ÇEÇEN, 2003)
Cor	3 vezes por semana	Abs <sub>440</sub> - Espectrofotômetro UV-Vis Varian (ÇEÇEN, 2003)
COT	1 vez por semana	5310 C - Equipamento HiPerTOC (APHA; AWWA; WPCG, 2012)
DBO <sub>5</sub>	3 vezes por semana	5210 B - Incubadora BOD (APHA; AWWA; WPCG, 2012)
Desenvolvimento do biofilme	1 vez por etapa	Microscópio eletrônico de varredura Quanta Quorum Q150R
DQO	3 vezes por semana	5220 D - Espectrofotômetro UV-Vis Varian (APHA; AWWA; WPCG, 2012)
pH	3 vezes por semana	pHmetro CienlaBmPA - 210
SST e SSV	1 vez por etapa	2540 D, E e F (APHA; AWWA; WPCG, 2012)

\*As análises de demanda química de oxigênio (DQO), cor e de compostos fenólicos totais (CFT), lignínicos, aromáticos e lignossulfônicos foram realizadas em triplicatas. A de DBO<sub>5</sub> em duplicata com coeficiente de variação < 5%; CFT: compostos fenólicos totais; COT: carbono orgânico total; DBO<sub>5</sub>: demanda bioquímica de oxigênio; SST: sólidos suspensos totais; SSV: sólidos suspensos voláteis.

As amostras de afluente e efluente do tratamento foram filtradas em um aparato de filtração com membrana de nitrocelulose de 0,45 µm (UNIFIL). Para avaliação de remoção de matéria orgânica, foram utilizados os parâmetros de DQO, DBO<sub>5</sub> e COT. Já para os compostos específicos, os parâmetros de cor, CFT e compostos derivados de lignina foram avaliados. Na Tabela 1 estão expostas as metodologias empregadas na caracterização do efluente cedido pela indústria e na avaliação da eficiência do tratamento de lodos ativados com o CAP quanto à periodicidade das análises do afluente e efluente do sistema.

As eficiências de remoção (ER) de DQO, DBO<sub>5</sub>, COT, cor, CFT, compostos lignínicos, lignossulfônicos e aromáticos foram determinadas considerando as variáveis presentes no afluente (Co) e no efluente (Cf) do sistema por meio da Equação 1.

$$ER(\%) = \left( \frac{Co - Cf}{Co} \right) * 100 \quad (1)$$

Além disso, análises de matriz de excitação e emissão de fluorescência (MEEF) foram realizadas para avaliação qualitativa da remoção de contaminantes do efluente Kraft. Para a determinação de MEEF, amostras do afluente e do efluente ao final de cada etapa do tratamento foram filtradas em membrana de nitrocelulose de 0,45 µm. As análises foram realizadas em triplicata no equipamento Varian Cary Eclipse Fluorescence Spectrophotometer, nos espectros de MEEF, em comprimentos de onda de 200 a 700 nm para emissão e de 200 a 600 nm para excitação utilizando cubeta de quartzo de 1 cm<sup>2</sup>, seguindo a metodologia utilizada por Chen *et al.* (2003) e Managó (2018).

### Caracterização da biomassa

O desenvolvimento da biomassa no reator foi avaliado por análises de sólidos no licor misto. Foram analisados sólidos suspensos totais (SST) e SSV com base na metodologia descrita por American Public Health (APHA), American Water Works (AWWA) e Water Pollution Control Federation (WPCF) (2012). Considerando a influência do carvão ativado nas análises de sólidos, fez-se a diferença entre os sólidos totais voláteis presentes no reator e a contribuição do CAP em cada uma das concentrações empregadas (2,4 e 6 g L<sup>-1</sup> de CAP).

Com os valores de sólidos voláteis e a concentração de substrato (DBO<sub>5</sub>) disponível no sistema, determinaram-se os valores da razão alimento/microrganis-

mo (A/M) e a taxa de utilização do substrato (U), que auxiliam na análise de eficiência e desenvolvimento da biomassa durante o tratamento.

Além disso, amostras do CAP antes de ser adicionado ao sistema de lodos ativados e durante as etapas do tratamento foram analisadas em microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliação da superfície do meio suporte e do crescimento microbiano nele durante o tratamento. Para essa análise, as amostras foram liofilizadas e posteriormente metalizadas no equipamento Quanta Quorum Q150R, realizando seu recobrimento com ouro para análise no microscópio eletrônico de varredura com filamento de tungstênio em aumento de 1.000, 2.500 e 10.000 vezes.

### Análise estatística

Para avaliar diferenças significativas entre as ER dos parâmetros durante as etapas do tratamento, foram aplicadas análises estatísticas de variância após testes de normali-

dade dos dados utilizando o *software* BioEstat 5.3. Os testes estatísticos foram realizados com todos os resultados de remoção obtidos durante as etapas de tratamento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização do efluente Kraft

As características físico-químicas dos afluentes utilizados durante as etapas de tratamento estão expostas na Tabela 2. Os valores de DQO presente nos afluentes

tiveram baixa variação durante o tratamento, sendo o menor valor 642,3 (± 55) mg L<sup>-1</sup>, na etapa I, e o maior 764,6 (± 23,9) mg L<sup>-1</sup>, na etapa IV. Diferentes valores de

DQO de efluentes Kraft são encontrados na literatura, variando de 300 a 2.300 mg L<sup>-1</sup> (BRINK; SHERIDAN; HARDING, 2017; MACHADO; XAVIER; COUTO, 2018; MICHELETTO *et al.*, 2019; PEITZ; XAVIER, 2019; VANZETTO *et al.*, 2014). Essa variação dá-se principalmente em razão de mudanças operacionais como funcionamento de equipamentos e processos de lavagem na produção da celulose, gerando efluentes muito distintos para o mesmo tipo de processo (KAMALI *et al.*, 2019).

Conforme exposto na Tabela 2, o afluente aplicado na etapa I foi o que apresentou melhor biodegradabilidade, com razão DBO<sub>5</sub>/DQO de 0,30. De acordo com Chamorro *et al.* (2010), relações menores que 0,30 podem comprometer o tratamento biológico do afluente.

### Caracterização do meio suporte

As características do carvão ativado utilizado como meio suporte durante o tratamento foram analisadas por meio de determinação da ASE e dos volumes e diâmetros médios dos poros. Assim, a ASE do carvão ativado utilizado nesta pesquisa foi de 1.328,37 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, com diâmetro dos poros de 34,4 Å e volume de 0,42 cm<sup>3</sup> g<sup>-1</sup>. De acordo com Campos *et al.* (2014), a ASE do carvão ativado geralmente está entre 600 e 1.400 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, o que

Efluentes provenientes de indústria de celulose e papel geralmente apresentam valores da razão DBO<sub>5</sub>/DQO abaixo do indicado, por conta da presença de compostos específicos (lignínicos, aromáticos e lignossulfônicos) e CFT, os quais são recalcitrantes e dificultam o tratamento biológico (CHAMORRO *et al.*, 2010; MACHADO; XAVIER; COUTO, 2018). Apesar disso, sistemas biológicos são os mais aplicados para tratamento de efluente desse setor, o que salienta a necessidade de aprimoramento desses sistemas a fim de suprir a deficiência de remoção desses compostos recalcitrantes (KAMALI *et al.*, 2019; PEITZ; XAVIER, 2019).

varia de acordo com a origem do material e o processo de fabricação utilizado.

Luz *et al.* (2013) utilizaram um carvão ativado de casca de coco para adsorção de fenol e observaram ASE de 724 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, com diâmetro dos poros de 21,35 Å e volume de 0,39 cm<sup>3</sup> g<sup>-1</sup>. O estudo realizado por Bou *et al.* (2018) utilizou um carvão ativado proveniente da casca de coco com ASE de 726 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, com diâmetro dos

Tabela 2 – Caracterização físico-química dos afluentes aplicados nas etapas de tratamento\*.

Parâmetros	Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	642,3 ± 55,0	673,6 ± 15,7	762,3 ± 60,5	764,6 ± 23,9
DBO <sub>5</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	188,2 ± 67,9	199,1 ± 23,8	223,7 ± 48,9	203,7 ± 12,0
DBO <sub>5</sub> /DQO	0,30	0,29	0,29	0,27
COT (mg L <sup>-1</sup> )	129,6 ± 15,2	167,6 ± 28,2	192,4 ± 1,0	205,0 ± 9,4
CFT (mg L <sup>-1</sup> )	318,9 ± 58,6	345,2 ± 20,6	363,0 ± 32,2	359,9 ± 12,6
Cor (Vis <sub>440</sub> )	0,49 ± 0,03	0,55 ± 0,02	0,52 ± 0,03	0,55 ± 0,02
pH	7,8 ± 0,9	8,5 ± 0,9	8,1 ± 0,4	7,4 ± 0,3
C. aromáticos (UV <sub>254</sub> )	6,3 ± 0,6	6,8 ± 0,3	6,7 ± 0,7	6,8 ± 0,3
C. lignínicos (UV <sub>280</sub> )	4,6 ± 0,8	5,2 ± 0,2	5,6 ± 0,3	5,7 ± 0,1
C. lignossulfônicos (UV <sub>346</sub> )	1,6 ± 0,3	1,8 ± 0,1	1,9 ± 0,2	1,9 ± 0,1

\*Os valores apresentados foram obtidos por meio das análises realizadas durante todo o período de operação (110 d): N = 40; Etapa I: N = 12; Etapa II: N = 10; Etapa III: N = 10; Etapa IV: N = 8. Esses valores são referentes à caracterização do efluente cedido pela indústria, previamente à correção de pH e à adição de nutrientes, para ser utilizado como afluente do tratamento; DQO: demanda química de oxigênio; DBO<sub>5</sub>: demanda bioquímica de oxigênio; COT: carbono orgânico total; CFT: compostos fenólicos totais; C.: composto.

poros de 25,6 Å e volume de 0,26 cm<sup>3</sup> g, em um reator tipo PACT<sup>®</sup> para o tratamento de lixiviado, valores inferiores aos encontrados no CAP utilizado neste trabalho. Yu *et al.* (2019) relatam que o tamanho da partícula, a

porosidade e a área superficial disponível de um meio suporte particulado influenciam diretamente na formação de biofilme em sua superfície, o que pode facilitar a aderência dos microrganismos.

### Remoção de matéria orgânica

A remoção de matéria orgânica foi monitorada por meio dos parâmetros DQO, DBO<sub>5</sub> e COT. Na Figura 2, são apresentados os valores de COV e TDH e a relação de biodegradabilidade do afluente aplicado durante o tratamento (Figura 2A), além das remoções de DBO<sub>5</sub>, DQO e COT obtidos após as etapas I, II, III e IV (Figura 2B).

A COV foi mantida próxima a 1,21 (± 0,03) kg<sub>DQO</sub> m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>, conforme mostrado na Figura 2A. Em razão de a COV ter sido fixada, o TDH variou em função da concentração inicial de DQO no afluente, apresentando maiores valores nas etapas III e IV, com média de 15 h, quando

foram obtidos os maiores valores de DQO, com concentrações próximas a 760 mg L<sup>-1</sup> (Tabela 2).

Quanto à remoção da matéria orgânica (Figura 2B), na etapa I, tratamento apenas com o sistema de lodos ativados e com TDH de 12 h, obteve-se média de remoção de 76,5, 46 e 54% de DBO<sub>5</sub>, DQO e COT, respectivamente, valores inferiores aos obtidos nas etapas seguintes, como demonstrado na Figura 2B.

Com a adição de 2 g L<sup>-1</sup> de CAP na etapa II, pode-se observar na Figura 1B que houve elevação na ER de DQO, atingindo 65%. Isso pode ter ocorrido por conta do

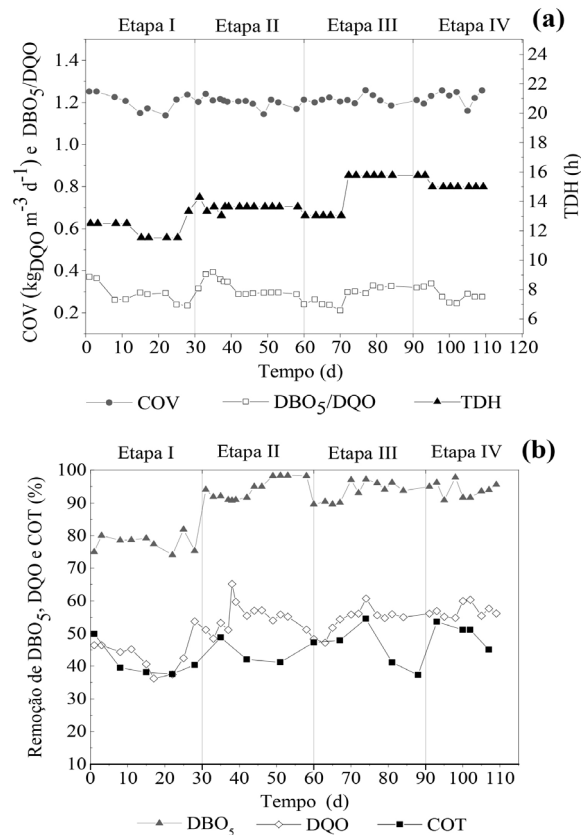


Figura 2 – (a) Carga orgânica volumétrica (COV), relação de biodegradabilidade (DBO<sub>5</sub>/DQO) e tempo de detenção hidráulica (TDH). (b) Remoção de demanda bioquímica de oxigênio (DBO<sub>5</sub>), demanda química de oxigênio (DQO) e carbono orgânico total (COT) durante o tratamento.

contato imediato do substrato com o carvão ativado, proporcionando maior eficiência, pois o carvão ativado é um excelente adsorvente e tem grande área superficial prontamente disponível (MUHAMAD *et al.*, 2015; YU *et al.*, 2019). Logo em seguida, é possível notar que ocorre uma estabilidade na ER, mantendo a média de  $55(\pm 5)\%$ . Quanto à  $DBO_5$ , também se obtiveram maiores remoções na etapa II, chegando a atingir 98% com TDH médio de 13,5 h. Wang *et al.* (2016) utilizaram um reator sequencial em batelada com ciclo de 28 h, com  $2 \text{ g L}^{-1}$  de CAP para tratamento de efluente de indústria química, e alcançaram 65 e 68% de remoção de DQO e COT respectivamente, e, apesar de matriz diferente, os resultados foram similares aos do presente estudo, no qual a remoção de COT chegou a 62% na etapa IV.

Estudos de tratamento de efluente industrial de celulose utilizando diferentes meios suportes em reatores biológicos obtiveram resultados inferiores aos encontrados neste estudo. Peitz e Xavier (2017) alcançaram 41% de remoção de DQO e 92% de  $DBO_5$  em um reator biológico contínuo com meio de suporte AMB, COV de  $1,2 \text{ kg}_{DQO} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  e TDH de 20 h. Brink, Sheridan e Harding (2017) estudaram o tratamento do efluente de uma indústria de celulose em um sistema biológico de leito móvel (MBBR, do inglês *moving bed biofilm reactor*) com meio suporte de polietileno de alta densidade, aplicando um TDH

de 16 h e COV com variação entre 2 e  $6 \text{ kg}_{DQO} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ , e obtiveram 46% de remoção de DQO.

Esses estudos alcançaram eficiências menores que os resultados obtidos nas etapas com CAP desta pesquisa, mesmo operando com TDH superiores. Isso possivelmente ocorreu por conta da interação entre a interface do CAP com biofilme e o efluente no reator, visto que, por ser um material em pó, o carvão ativado tem mais mobilidade no sistema, proporcionando maior contato dos microrganismos fixados em sua superfície com os contaminantes presentes no efluente, ocasionando maior eficiência na biodegradação, o que corrobora a viabilidade de aplicação do carvão ativado como meio suporte no tratamento de efluente de indústria de celulose.

Ao comparar os resultados de remoção da matéria orgânica obtidos durante as etapas de tratamento, observou-se uma diferença significativa ( $p < 0,01$ ) entre as remoções obtidas na etapa I (apenas lodos ativados) e as etapas com adição de CAP, com  $2,4$  e  $6 \text{ g L}^{-1}$ , conforme apresentado na Tabela 3.

É possível observar que não se teve uma melhoria significativa nas remoções com o aumento da concentração do CAP, obtendo-se remoções semelhantes durante as etapas II, III e IV para DQO,  $DBO_5$  e COT, conforme demonstrado na Tabela 3.

**Tabela 3 – Análise estatística de teste análise de variância entre as eficiências de remoção dos parâmetros de demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio ( $DBO_5$ ) e carbono orgânico total (COT) durante as etapas do tratamento\*.**

		Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV
DQO	Etapa II	< 0,01	-	ns	ns
	Etapa III	< 0,01	ns	-	ns
	Etapa IV	< 0,01	ns	ns	-
$DBO_5$	Etapa II	< 0,01	-	ns	ns
	Etapa III	< 0,01	ns	-	ns
	Etapa IV	< 0,01	ns	ns	-
COT	Etapa II	< 0,01	-	ns	ns
	Etapa III	< 0,01	ns	-	ns
	Etapa IV	< 0,01	ns	ns	-

\*Os resultados apresentados são referentes aos testes estáticos realizados utilizando os valores de eficiências de remoções de DQO,  $DBO_5$  e COT durante as etapas; ns: não significativo, testes que apresentaram  $p > 0,05$ .

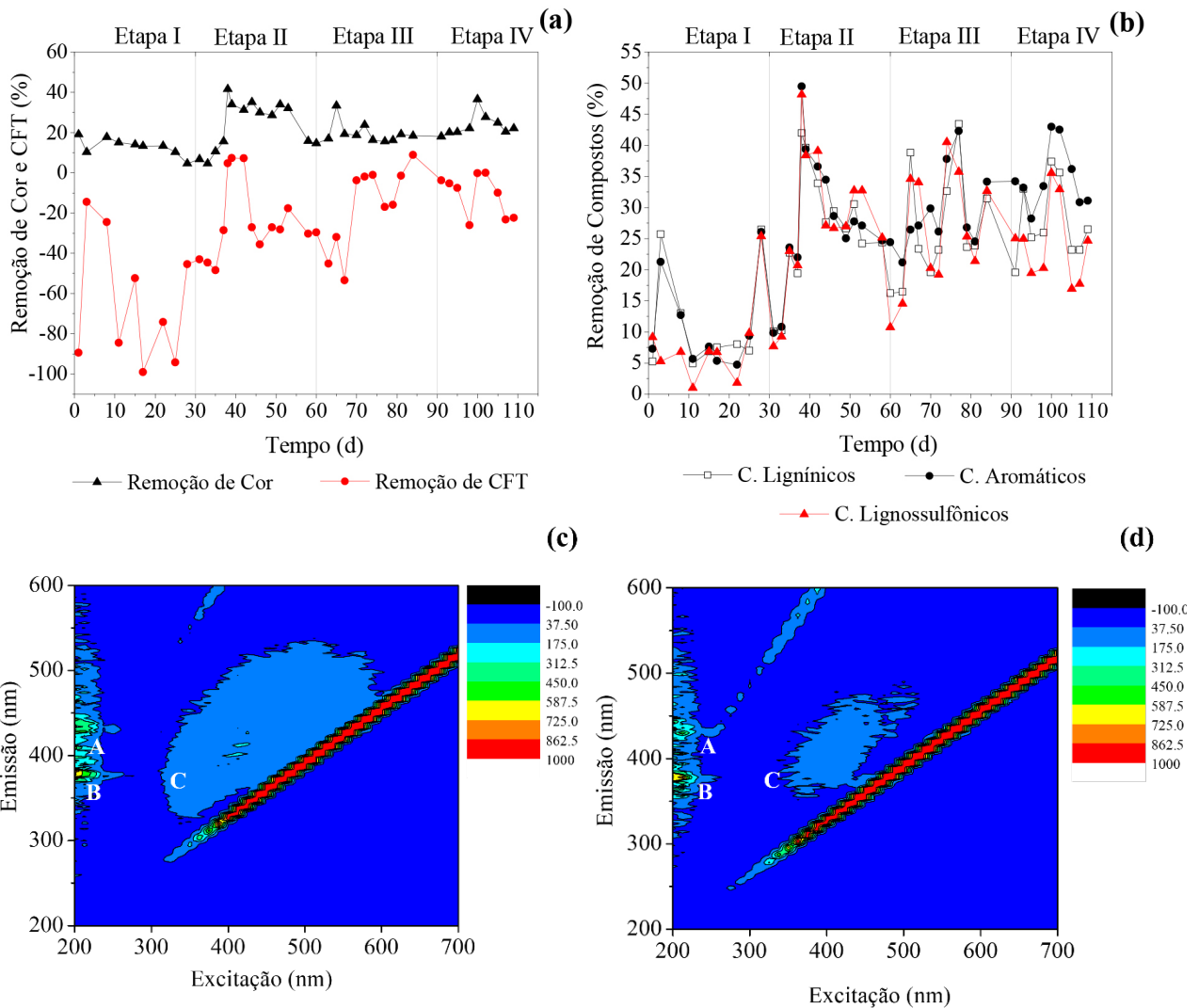


### Remoção de compostos específicos

Os valores de remoções de cor, CFT, compostos lignínicos, aromáticos e lignossulfônicos e remoção de compostos fluorogênicos durante o tratamento podem ser observados na Figura 3. A remoção de cor está exposta na Figura 3A, na qual se pode notar que a etapa I teve o menor valor de remoção (11%). Esses resultados são similares aos apresentados na literatura de que, de acordo com Kamali *et al.* (2019), tratamentos biológicos geralmente apresentam baixa ou nenhuma eficiência para remoção de cor de efluentes de indústria de celulose, podendo até gerar compostos cromóforos durante o tratamento, como descrito por Peitz e Xa-

vier (2019), que notaram o acréscimo de 20% de cor no tratamento de efluente Kraft em um sistema de lagoa aerada com meio suporte esponjoso.

No início da etapa II, com a adição de 2 g L<sup>-1</sup> de CAP e TDH de 12 h, o sistema removeu 41% de cor, possivelmente por adsorção dos compostos cromóforos derivados de lignina nos sítios de troca do carvão ativado. Após isso, a remoção da cor manteve-se em torno de 28%, ainda superior à obtida na etapa sem a adição do CAP. Essa tendência se manteve também nas etapas III e IV, com as concentrações de 4 e 6 g L<sup>-1</sup> de CAP. Em um



**Figura 3 – (a) Remoção de cor e compostos fenólicos totais (CFT). (b) Remoção de compostos lignínicos, aromáticos e lignossulfônicos. (c) Matriz de emissão e excitação de fluorescência do afluente. (d) Matriz de emissão e excitação de fluorescência do efluente.**

sistema de lodos ativados em batelada com adição de 2,4 e 6 g L<sup>-1</sup> de CAP e TDH de 24 h, Bou *et al.* (2018) trataram lixiviado de aterro sanitário em mistura com esgoto doméstico sintético (2,5 e 10% de lixiviado). Eles também buscaram remover cor e observaram os melhores resultados com o uso de 4 g L<sup>-1</sup> de CAP, atingindo 79% de remoção desse parâmetro (BOU *et al.*, 2018). Essa eficiência é superior à encontrada no presente estudo, entretanto, os autores trabalharam com um TDH maior, o que pode ter colaborado para a maior remoção.

Em relação aos resultados dos CFT, apresentados na Figura 3A, é possível notar que não houve remoção desse parâmetro durante o tratamento, ocorrendo seu incremento em todas as etapas. Na etapa I, o efluente tratado apresentou aumento de 57% na concentração média de CFT. Já nas demais etapas (II, III e IV), esse aumento foi de 12%. Resultados parecidos quanto à produção de CFT foram encontrados por vários autores que trataram efluentes Kraft em sistemas biológicos aerados, obtendo incrementos que passaram de 100% da concentração inicial (BRINK; SHERIDAN; HARDING, 2017; MACHADO; XAVIER; COUTO, 2018; PEITZ; XAVIER, 2017). A diferença no incremento dos CFT na presença e na ausência de CAP pode estar relacionada ao desenvolvimento de biofilme na superfície do carvão ativado, proporcionando o crescimento de microrganismos mais resistentes aos compostos tóxicos como os CFT, contribuindo para menores valores de incremento no sistema biológico aeróbio com o CAP, como discutido por Yu *et al.* (2019).

A média de ER dos compostos derivados de lignina na etapa I foi de 13% para lignínicos e aromáticos e de 10% para compostos lignossulfônicos, os menores resultados encontrados entre as distintas etapas (Figura 3B). Vanzetto *et al.* (2014) trataram efluente Kraft em MBBR com COV de 1,2 kg<sub>DQO</sub> m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>, similarmente ao que foi feito neste trabalho, e obtiveram remoções de compostos lignínicos e aromáticos de 1,4 e 3,8%, respectivamente. De acordo com Kamali *et al.* (2019), compostos derivados de lignina são em geral recalcitrantes e difíceis de serem removidos por tratamento biológico. Alguns estudos mostraram o incremento desses compostos chegando a aumentar em 10% as suas concentrações (CHAMORRO *et al.*, 2010; MACHADO; XAVIER; COUTO, 2018).

No início da etapa II (Figura 2B), com o TDH de 13,5 h, as remoções dos compostos aumentaram conside-

ravelmente em relação à primeira etapa, alcançando uma ER de 41, 49 e 48% de compostos lignínicos, aromáticos e lignossulfônicos, respectivamente. Posteriormente ao primeiro contato, as remoções médias ficaram em torno de 30% para esses compostos.

Quanto às análises estatísticas, as remoções dos compostos específicos apresentaram diferença significativa ( $p < 0,05$ ) apenas nos resultados obtidos entre a etapa I e as etapas com adição de CAP. Já entre as etapas II, III e IV, não se obteve diferença significativa nas remoções com diferentes concentrações de CAP. Isso ocorreu possivelmente por conta da baixa amplitude da faixa de concentrações adotadas (2, 4 e 6 g L<sup>-1</sup>), sendo necessária a realização de estudos com aplicações maiores que 6 g L<sup>-1</sup> de CAP para analisar se de fato a quantidade desse meio suporte no reator não influencia na eficiência do sistema.

A remoção desses compostos também pode ser observada nas Figuras 3C e 3D, nas quais são expostas as matrizes de fluorescência de emissão (Em) e excitação (Ex) do afluente e do efluente da etapa IV. Foram analisados picos primários de intensidade possivelmente atribuídos a:

- ácidos fúlvicos em Ex. 230 nm / Em. 400 a 450 nm (pico A);
- sulfonatos de lignina, lignina e lignina degradada em Ex. 250–400 nm / Em. 280–380 nm (pico B);
- ácidos húmicos em Ex. 320–330 nm / Em. 410–450 nm (pico C).

Os mesmos resultados também foram observados por Chen *et al.* (2003) e Managó (2018).

Nas imagens, é possível observar a diminuição de intensidade dos picos A, B e C, que, de acordo com Managó (2018), pode estar relacionada com a remoção de compostos orgânicos específicos. Já Carstea *et al.* (2016) separaram os compostos fluorogênicos por meio da emissão de 380 nm, na qual, segundo os autores, os componentes que contribuem para a fluorescência Em < 380 nm são hidrocarbonetos, aminoácidos aromáticos e compostos derivados de lignina. Foi possível notar a remoção desses compostos com a diminuição da intensidade nessa faixa de emissão.

## Desenvolvimento da biomassa no reator

A biomassa desenvolvida no sistema foi avaliada por análises de sólidos presentes no licor misto do reator e por meio de MEV. Na Tabela 4 são apresentadas as concentrações de sólidos presentes no licor misto do reator aerado. Também estão lá as razões de A/M e a taxa de utilização do substrato (U) em cada etapa.

Conforme apresentado na Tabela 4, a maior concentração de biomassa durante o tratamento ocorreu na etapa IV, com a concentração acumulada de  $6 \text{ g L}^{-1}$  de CAP, em que o SSV apresentou a concentração de  $4.086 \text{ mg L}^{-1}$ . Já em relação à razão SSV/SST determinada ao final de cada etapa, houve variação entre 0,5 e 0,7, o que indica a estabilização da biomassa. Também se observou que a razão SSV/SST não variou em função do aumento da concentração de carvão ativado. De acordo com Von Sperling (2016), sistemas de aeração prolongada com formação de flocos biológicos e de elevadas idades de lodo apresentam essa relação na faixa de 0,60 a 0,75, o que está de acordo com o obtido neste trabalho, em que não se realizou o descarte de lodo durante toda a operação (110 dias).

Na Tabela 4, observa-se que a relação A/M esteve entre 0,08 e 0,11  $\text{kgDBO}_5 \text{ kgSSV}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , o que também está de acordo com sistemas de aeração prolongada, os quais têm valores de A/M de 0,08 a 0,15  $\text{kgDBO}_5 \text{ kgSSV}^{-1} \text{ d}^{-1}$  (VON SPERLING, 2016).

Comparando a taxa de utilização do substrato (U) com a A/M, na Tabela 4, é possível verificar que houve um elevado consumo do substrato biodegradável durante o tratamento em cada uma das etapas. Os valores de U estão bem próximos aos de A/M, principalmente nas etapas com o CAP. Embora essa variação entre as eta-

pas seja pequena, isso indica a eficiência do sistema para a remoção de matéria orgânica biodegradável e confirma a melhoria do desempenho do sistema em relação à degradação de matéria orgânica ( $\text{DBO}_5$ ) nas etapas com o meio suporte, como mostrado na Figura 2B e observado no teste de análise de variância, com valor de  $p < 0,01$  entre as etapas sem e com CAP (Tabela 3). O desenvolvimento da biomassa também pode ser observado na Figura 4, que tem expostas as micrografias do CAP e do lodo retirado ao final das etapas com o meio suporte (etapas II, III e IV). Nelas, é possível observar a formação de biofilme sob a superfície do CAP ao longo do tratamento.

Observando as imagens expostas na Figura 4, é notório o aumento da biomassa durante o tratamento, com presença de maiores quantidades de material biológico, possíveis formações filamentosas e aglomerações de microrganismos, o que condiz com os resultados apresentados na Tabela 4, apontando a maior quantidade de biomassa na etapa IV. Quanto ao desenvolvimento do biofilme, observando as micrografias com o aumento de 10 mil vezes (Figuras 4C, 4I e 4L), percebe-se que ocorreu o crescimento de microrganismos aderidos à superfície do CAP. Estes são possivelmente bactérias, fungos e bactérias filamentosas, que estão em maior abundância em amostras de sólidos após os 110 dias de operação do reator tipo PACT®.

Com isso, é possível afirmar que a adição do carvão ativado permitiu a formação de biofilme, o que pode ter proporcionado uma estabilidade do sistema perante as remoções dos parâmetros avaliados, como também observado por outros autores (BOU *et al.* 2018; CAMPOS *et al.*, 2014; YU *et al.*, 2019).

**Tabela 4 – Concentrações de sólidos suspensos totais (SST) e voláteis (SSV), valores de SSV/SST, alimento/microrganismo (A/M) e taxa de utilização do substrato (U)<sup>#</sup>.**

Etapa	SST*	SSV*	SSV/SST	A/M**	U**
Etapa I	5.650,1	3.493,3	0,6	0,10	0,08
Etapa II	6.110,0	3.796,7	0,6	0,09	0,09
Etapa III	6.693,3	3.356,7	0,5	0,11	0,10
Etapa IV	6.060,0	4.086,6	0,7	0,08	0,07

<sup>#</sup>Os valores apresentados na tabela são referentes a uma análise de sólidos ao final de cada etapa; SST: sólidos suspensos totais do licor misto; SSV: sólidos suspensos voláteis do licor misto; \* $\text{mg L}^{-1}$ ; \*\* $\text{kgDBO}_5 \text{ kgSSV}^{-1} \text{ d}^{-1}$ .

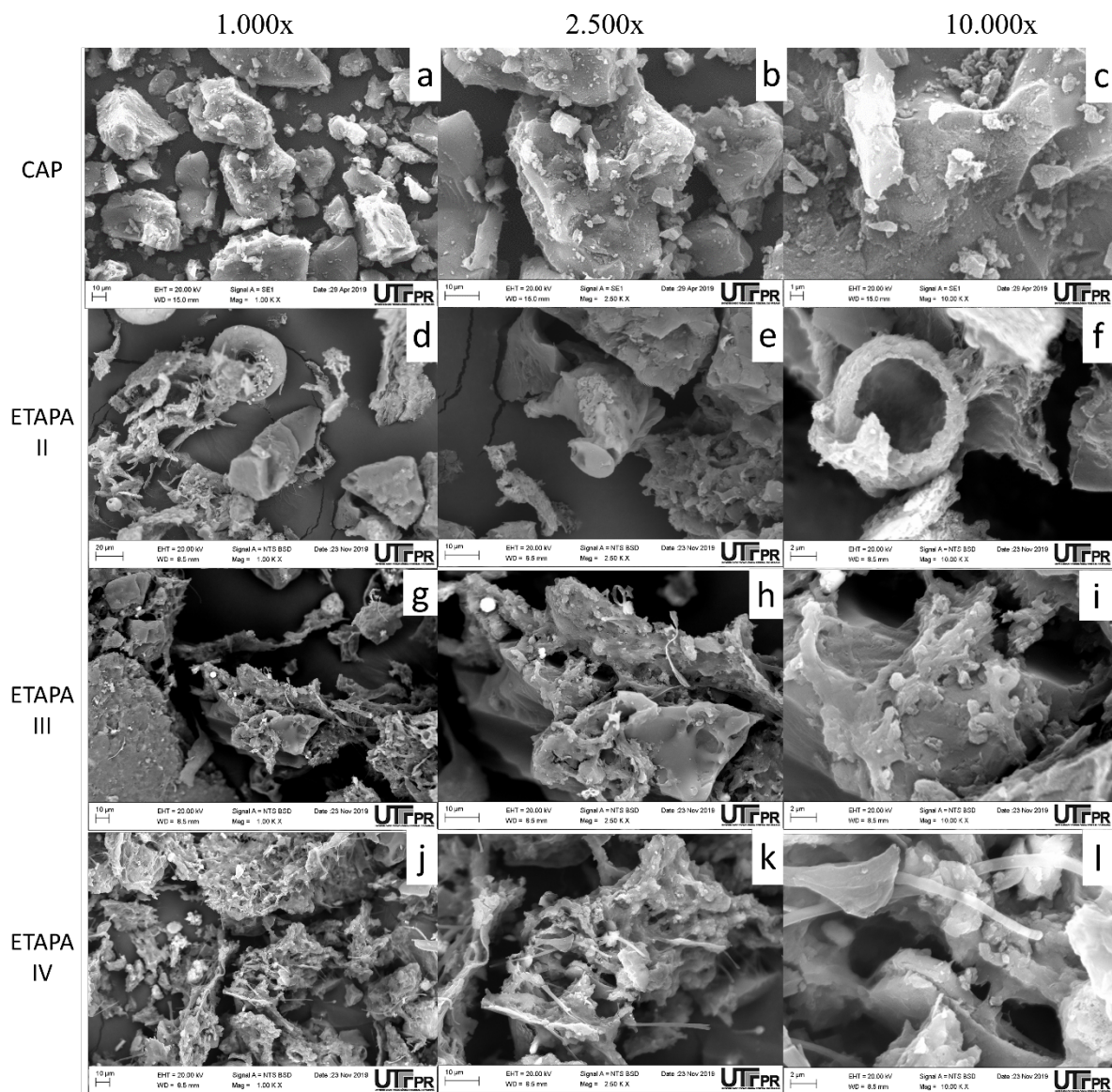
## CONCLUSÃO

Neste estudo, avaliou-se a adição de CAP como meio suporte em concentrações de 2,4 e 6 g L<sup>-1</sup> em um reator de lodos ativados em comparação com o sistema sem o CAP para tratamento de efluente Kraft. Durante o tratamento, a remoção da matéria orgânica foi maior na presença do meio suporte, obtendo médias de 55, 94 e 60% para DQO, DBO<sub>5</sub> e COT, respectivamente.

Parâmetros específicos, como cor, derivados de lignina e compostos aromáticos foram removidos em 28, 29 e

36% em média, respectivamente, nas etapas com meio suporte, entretanto CFT não foram removidos durante todo o tratamento. As análises de MEEF também indicaram a biotransformação de compostos específicos durante o processo com a remoção parcial dos compostos fluorogênicos.

Observou-se a formação de biofilme na superfície do meio suporte durante o tratamento, com maior concentração de biomassa na etapa IV, alcançando 4.086 mg L<sup>-1</sup> de SSV.



**Figura 4 –** Micrografias de partículas de carvão ativado em pó (CAP) com aumento de: (a) 1.000 x, (b) 2.500 x e (c) 10.000 x. Micrografias do lodo com CAP ao final da etapa II com aumento de (d) 1.000 x, (e) 2.500 x e (f) 10.000 x; ao final da etapa III com aumento de (g) 1.000 x, (h) 2.500 x e (i) 10.000 x; e ao final da etapa IV com aumento de (j) 1.000 x, (k) 2.500 x e (l) 10.000 x.

De modo geral, a adição do CAP ao sistema de lodos ativados melhorou a eficiência de tratamento do efluente de celulose Kraft, porém o aumento da concentração desse meio suporte no reator não apresentou melhorias estatisticamente significativas. Diante da variação de concen-

tração de meio suporte empregada neste estudo e dos resultados observados, considera-se que a concentração de 2 g L<sup>-1</sup> de CAP em lodos ativados foi suficiente para melhorar o tratamento do efluente de celulose Kraft em COV de 1,2 kg<sub>DQO</sub> m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> em escala de laboratório.

## AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem o apoio da indústria de celulose que forneceu o efluente para o estudo, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia

Ambiental, à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da UTFPR, ao Laboratório Multiusuário de Análises Químicas e a todos os demais colaboradores.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH (APHA); AMERICAN WATER WORKS (AWWA); WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPCF). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21. ed. Washington, D.C.: American Public Health/American Water Works, 2012.
- ANTONY, A.; BASSENDEH, M.; RICHARDSON, D.; AQUILINA, S.; HODGKINSON, A.; LAW, I.; LESLIE, G. Diagnosis of dissolved organic matter removal by GAC treatment in biologically treated paper mill effluents using advanced organic characterisation techniques. *Chemosphere*, v. 86, n. 8, p. 829-836, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.11.059>
- BOU, A.S.F.; PEREIRA, B.C.; SILVA, L.D.B.; FERREIRA, J.A.; CAMPOS, J.C.; NASCENTES, A.L. Remoção da cor no tratamento combinado de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico via processo PACT. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 23, n. 2, 2018. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018150425>
- BRINK, A.; SHERIDAN, C.M.; HARDING, K.G. A kinetic study of a mesophilic aerobic moving bed biofilm reactor (MBBR) treating paper and pulp mill effluents: The impact of phenols on biodegradation rates. *Journal of Water Process Engineering*, v. 19, p. 35-41, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.07.003>
- CAMPOS, J.C.; MACHADO, C.R.A.; COUTO, J.M.S.; FLORIDO, P.L.; CERQUEIRA, A.C.F.P.; SANTIAGO, V.M.J. Evaluation of an Activated Sludge Process Combined with Powdered Activated Carbon for the Treatment of Oil Refinery Wastewater. *Journal of International Environmental Application and Science*, v. 9, n. 1, p. 24-36, 2014.
- CARSTEA, E.C.; BRIDGEMAN, J.; BAKER, A.; REYNOLDS, D.M. Fluorescence spectroscopy for wastewater monitoring: a review. *Water Research*, v. 95, p. 205-219, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.021>
- ÇEÇEN, F. The use of UV-VIS measurements in the determination of biological treatability of pulp bleaching effluents. In: INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION SYMPOSIUM ON FOREST INDUSTRY WASTEWATERS, 7., 2003. *Anais...* Seattle, 2003.
- CHAMORRO, S.; POZO, G.; JARPA, M.; HERNANDEZ, V.; BECERRA, J.; VIDAL, G. Monitoring endocrine activity in kraft mill effluents treated an Aerobic moving bed bioreactor system. *Water Science and Technology*, v. 62, n. 1, p. 154-161, 2010. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.297>
- CHEN, W.; WESTERHOFF, P.; LEENHEER, J.A.; BOOKSH, K. Fluorescence excitation–emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter. *Environmental Science & Technology*, v. 37, n. 24, p. 5701-5710, 2003. <https://doi.org/10.1021/es034354c>

- FENG, Z.; CHEN, H.; LI, H.; YUAN, R.; WANG, F.; CHEN, Z.; ZHOU, B. Preparation, characterization, and application of magnetic activated carbon for treatment of biologically treated papermaking wastewater. *Science of The Total Environment*, v. 713, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136423>
- GEREMIAS, R.; LAUS, R.; FÁVERE, V.; PEDROSA, R. Adsorção de íons Cu (II), Mn (II), Zn (II) e Fe (III), utilizando rejeito de mineração de carvão como adsorvente. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 25, p. 48-59, 2012. Disponível em: <[http://rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes\\_RBCIAMB/article/view/316](http://rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/316)>. Acesso em: 20 maio 2020.
- HINOJOSA, E. A. L.; XAVIER, C. R. Remoção de matéria orgânica e cor de efluente kraft por adsorção usando carvão ativado e argila. *Hydro*, p. 26-31, 2016. Disponível em < <https://www.arandanet.com.br/assets/revistas/hydro/2016/novembro/index.php?>>. Acesso em: 12 nov. 2019.
- HUBBE, M.A.; METTS, J.R.; HERMOSILLA, D.; BLANCO, M.A.; YERUSHALMI, L.; HAGHIGHAT, F.; LINDHOLM-LEHTO, P.; KHODAPARAST, K.; KAMALI, M.; ELLIOTT, A. Wastewater Treatment and Reclamation: A Review of Pulp and Paper Industry Practices and Opportunities. *Bioresources*, v. 11, n. 3, p. 7953-8091, 2016. <https://doi.org/10.15376/biores.11.3.Hubbe>
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO 9277: Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption — BET method*. International Organization for Standardization, 2010.
- KAMALI, M.; ALAVI-BORAZJANI, S.A.; KHODAPARAST, Z.; KHALAJ, M.; JAHANSHAHI, A.; COSTA, E.; CAPELA, I. Additive and additive-free treatment technologies for pulp and paper mill effluents: Advances, challenges and opportunities. *Water Resources and Industry*, v. 21, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2019.100109>
- LUZ, A.D.; SOUZA, S.M.A.G.U.; LUZ, C.; REZENDE, R.V.P.; SOUZA, A.A.U. Multicomponent Adsorption and Desorption of BTX Compounds Using Coconut Shell Activated Carbon: Experiments, Mathematical Modeling, and Numerical Simulation. *Industrial e Engineering Chemistry Research*, v. 52, n. 23, p. 7896-7911, 2013. <https://doi.org/10.1021/ie302849j>
- MACHADO, E.P.; XAVIER, C.R.; COUTO, G.H. Tratamento de efluente Kraft em lagoa aerada facultativa empregando enzimas lignolíticas. *Interciência*, v. 43, n. 8, p. 590-596, 2018.
- MANAGÓ, B.L. *Treatment of pulp wastewater by membrane bioreactor*. 84f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2018.
- MICHELETTO, J.; SAMPAIO, N.M.F.M.; RUIZ, H.Z.; MARTINS, L.R.R.; LIZ, M.V.; FREITAS, A.M. Acute ecotoxicity on *Daphnia magna* to evaluate effluent samples of Kraft pulp mill treated by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process. *Ambiente e Água*, v. 14, n. 2, 2019. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2208>
- MISHRA, S.B.; MISHRA, A.K.; KHAN, M.A. Decolourization of pulp and paper mill effluents using heat-treated coal: a comparison with activated charcoal. *Environmental Chemistry Letters*, v. 8, p. 231-235, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10311-009-0211-4>
- MUHAMAD, M.H.; ABDULLAH, S.R.S.; HASAN, H.A.; RAHIM, R.A. Comparison of the efficiencies of attached- versus suspended-growth SBR systems in the treatment of recycled paper mill wastewater. *Journal of Environmental Management*, v. 163, p. 115-124, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.012>
- ORREGO, R.; HEWITT, L.M.; MCMASTER, M.; CHIANG, G.; QUEIROZ, M.; MUNKITTRICK, K.; GAVILÁN, J.F.; BARRA, R. Assessing wild fish exposure to ligands for sex steroid receptors from pulp and paper mill effluents in the Biobio River Basin, Central Chile. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 171, p. 256-263, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.092>
- OSMAN, W. H. W.; ABDULLAH, S. R. S.; MOHAMAD, A. B.; KADHUM, A. A. H.; RAHMAN, R. A. Simultaneous AOX and COD removal from wastewater from recycled paper using real GAC-SBBR. *Journal of Environmental Management*. v. 121, p. 80-86, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.02.005>

PEITZ, C.; XAVIER, C.R. Evaluation of aerated lagoon modified with spongy support medium treating Kraft pulp mill effluent. *Revista Facultad de Ingeniería*, v. 92, p. 70-79, 2019. <http://dx.doi.org/10.17533/udea.redin.20190725>

PEITZ, C.; XAVIER, C.R. Tratamento de efluente kraft contendo fitoesteróis por reator de leito móvel MBBR. *Interciência*, v. 42, n. 8, p. 536-541, 2017. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33952871009>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

SOLER, C.; XAVIER, C.R. Tratamento de efluente de indústria têxtil por reator biológico com leito móvel. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 38, p. 21-30, 2015. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820155714>

VANZETTO, S.C.; KLENK, M.; ROSA, S.M.C.; XAVIER, C.R. Tratamento de efluente de indústria de papel e celulose por reator MBBR. *Hydro*, v. 89, p. 42-45, 2014. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/330090754>>. Acesso em: 27 nov. 2019.

VON SPERLING, M. *Lodos ativados: princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

XAVIER, R.; TRAGHETTA, D.; OLIVEIRA, C. Avaliação da eficiência de um reator de carvão ativado impregnado com prata no tratamento de águas residuárias geradas em laboratórios de análises clínicas. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 15, p. 29-38, 2010. Disponível em: <[http://rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes\\_RBciAMB/article/view/393](http://rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBciAMB/article/view/393)>. Acesso em: 20 maio 2020.

WANG, D.; HU, Q.; LI, M.; WANG, C.; JI, M. Evaluating the removal of organic fraction of commingled chemical industrial wastewater by activated sludge process augmented with powdered activated carbon. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 9, supl. 2, p. S1951-S1961, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.08.031>

YU, Z.; HU, Y.; DZAKPASU, M.; WANG, X.C.; NGO, H.H. Dynamic membrane bioreactor performance enhancement by powdered activated carbon addition: Evaluation of sludge morphological, aggregative and microbial properties. *Journal of Environmental Sciences*, v. 75, p. 73-83, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.03.003>

