

Tratamento físico-químicos de efluente têxtil utilizando sulfato de alumínio, carvão ativado e Moringa Oleífera (*Moringa moringa* (L.)) *Physicochemical treatment of textile effluent using aluminum sulphate, activated carbon and Moringa Oleífera (Moringa moringa (L.))*

Ana Luíza Xavier Cunha¹, Luiz Martins Pereira Neto¹, Valmir Cristiano Marques de Arruda¹, Vicente de Paulo Silva¹, Moacyr Cunha Filho¹, Rosângela Gomes Tavares¹

¹ Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil

Todos autores contribuíram de forma igualitária

Contato: rosangelagtavares@gmail.com

Palavras-Chave

efluente têxtil
recursos hídricos
coagulação
adsorção
Moringa Oleífera

RESUMO

Os processos industriais de produção têxtil têm como característica o uso de grandes volumes de água durante as etapas de lavagem e tingimento dos tecidos, resultando em efluentes com enorme diversidade e complexidade química. Os efluentes descarregados em rios ou plantas de tratamento público são altamente contaminados e não são possíveis de serem removidos pela simples separação física sendo aplicados processos físico-químicos com o intuito de clarificar os efluentes. O objetivo do trabalho foi avaliar a eficiência do processo de tratamento físico-químico com coagulação-floculação-decantação (CFD) frente ao tratamento com adsorção, usando como resposta os parâmetros cor, turbidez, pH e DQO (demanda química de oxigênio). O carvão comercial (ativado de origem comercial em pó (CAT_P) foi utilizado como adsorvente e sulfato de alumínio $Al_2(SO_4)_3$ e a Moringa Oleífera foram os agentes coagulantes. A aplicação dos ensaios indicaram valores dos parâmetros de controle dentro dos padrões de lançamento exigidos pela legislação brasileira e estatisticamente não houve diferença significativa. O uso do CFD com $Al_2(SO_4)_3$ e CAT_P, seguidos de adsorção com CAT_P, demonstraram ser os mais eficazes com correlação aos três parâmetros, tendo uma melhor resposta aos outros tratamentos e os melhores resultados para a diminuição dos parâmetros analisados: DQO (76,99%), cor (95,40%) e turbidez (99,97%) na quantidade de carvão de 0,1 g e o tempo de agitação de 40 minutos.

Key-word

textile Effluent
water resources
coagulation
adsorption
Moringa Oleífera

ABSTRACTS

Industrial textile production processes are characterized by the use of large volumes of water during the fabric washing and dyeing stages, resulting in effluents with enormous diversity and chemical complexity. Effluents discharged into rivers or public treatment plants are highly contaminated and cannot be removed by simple physical separation and physicochemical processes are applied to clarify effluents. The objective of the work was to evaluate the efficiency of the coagulation-flocculation-decantation (CFD) physicochemical treatment process against the adsorption treatment, using as parameters the color, turbidity, pH and chemical oxygen demand (COD) parameters. Commercial coal (powdered commercially activated activated powder (CAT_P) was used as adsorbent and aluminum sulfate $Al_2(SO_4)_3$ and Moringa Oleífera were the coagulants. The application of the tests indicated control parameter values). Within the release standards required by Brazilian legislation and statistically there was no significant difference. The use of CFD with $Al_2(SO_4)_3$ and CAT_P, followed by CAT_P adsorption, proved to be the most effective with correlation to the three parameters, having a better response. The other treatments and the best results for the reduction of the analyzed parameters: COD (76.99%), color (95.40%) and turbidity (99.97%) in the amount of coal of 0.1 g and the stirring time of 40 minutes.

Informações do artigo

Recebido: 08 de novembro, 2019

Aceito: 09 de dezembro, 2019

Publicado: 28 de dezembro, 2019

Introdução

A água é um bem natural cada dia mais escasso. Sendo fundamental demonstrar a importância da preservação dos recursos hídricos e o uso de tecnologias, possibilitando o seu reuso e reaproveitamento (VILLIERS, 2002).

Os processos industriais usam diariamente milhares de litros de água, onde desse total é descartado grande parte. Em relação a este aspecto, as lideranças do setor industrial vêm se conscientizando, demonstrando grande interesse em reduzir a poluição causada pelos seus processos industriais, não apenas nas estações de tratamento de efluentes, mas em todas as etapas da cadeia produtiva.

O Brasil está na lista dos dez principais mercados mundiais da indústria têxtil, bem como entre os países que possuem os maiores parques fabris do planeta. A grande parte das empresas brasileiras está concentrada no Nordeste, especialmente as voltadas para produção de jeans (COSTA et al., 2012). Oportuno registrar que no setor têxtil são comuns as lavanderias industriais, onde grande maioria estão espalhadas por todo o País, sendo que estas são ineficientes no que tange as questões ecológicas, econômicas e sociais.

A indústria têxtil é apontada como um dos empreendimentos com processos que mais geram poluentes, contribuindo quantitativa e qualitativamente para a poluição do meio ambiente, inclusive, mediante o descarte de corantes em efluentes que não são corretamente tratados (FERNANDES, 2016). Além disso, de acordo com Yang et al. (2015), o processo de tingimento têxtil é caracterizado por alto consumo de água, bem como, uma grande quantidade de material tóxico e recalcitrante, o que torna seu tratamento mais difícil, acarretando a descarga de águas residuais com forte coloração, uma grande quantidade de sólidos suspensos, pH altamente flutuante, temperatura elevada, grandes concentrações de DQO, compostos orgânicos clorados e surfactantes, tornando-se uma das principais fontes de graves problemas de poluição em todo o mundo.

Para a inibição das referidas práticas poluidoras, são adotadas iniciativas ambientais centradas na prevenção da poluição, acatando a pressão legal, para a redução do efluente gerado no processo de beneficiamento têxtil (preparação, tingimento e acabamento).

É fato que, os interesses da indústria visavam à remoção da cor, dos elevados níveis de eletrólitos, de substâncias tóxicas (tais como metais e materiais não fixados nos substratos têxteis) e dos agentes potencialmente cancerígenos no efluente têxtil. Estas preocupações lideraram várias políticas regulatórias que reduziram os processos de manufatura e aplicação de processamento têxtil que geravam efluentes têxteis ambientalmente inaceitáveis e causadores de riscos à saúde humana (ROSSI et al., 2017). Os impactos de efluentes com elevada cor são negativos para a fotossíntese das plantas e para a vida aquática, devido à redução da penetração da luz nos corpos aquáticos e seu consumo de oxigênio. Portanto, antes de ser descartado, o efluente da indústria têxtil deve ser devidamente tratado (HOLKAR et al., 2016).

Os processos de tratamento a serem adotados, as suas formas construtivas e os materiais a serem empregados são considerados a partir dos seguintes fatores: a legislação ambiental regional; o clima; os custos de investimento; os custos operacionais; a quantidade e a qualidade dos resíduos gerados nas estações de tratamento; a segurança operacional relativa aos vazamentos de produtos químicos utilizados ou dos efluentes; explosões; geração de odor; e possibilidade de reuso dos efluentes tratados (GHANDI, 2005).

No Brasil, os parâmetros e limites a serem obedecidos para o Padrão de Emissão foram estabelecidos na Lei n.º 997 de 31.05.76, do Estado de São Paulo, aprovados pelo Decreto n.º 8.468 de 08.09.76. No estado de Pernambuco, a regulamentação está firmada pela Resolução Federal do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) n.º 357/2005 e complementados pela Resolução n.º 430/2011 do CONAMA. Os padrões quantitativos usuais de referência para a indústria têxtil são definidos em função das variáveis: vazão, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos em Suspensão (SS), pH e temperatura. O controle desses parâmetros visa, portanto, a redução dos impactos originados durante os processos do beneficiamento na indústria têxtil.

A presença de corantes no efluente limita o tratamento por via biológica, devido à sua origem sintética, estabilidade química, presença de compostos fenólicos e complexos metálicos causando a inativação do meio biológico. Desta forma, pesquisas têm procurado a utilização de métodos avançados de tratamentos de efluentes através de processos oxidativos, processos eletrolíticos, filtração por membranas, fotocatalise, entre outros métodos para o tratamento de efluentes têxteis contendo corantes (KHALED et al., 2009).

As substâncias dissolvidas presentes em um efluente têxtil, responsáveis por sua contaminação, não são possíveis de serem removidos pela simples separação física. Os processos físico-químicos aplicados com o objetivo de clarificar efluentes são baseados na desestabilização dos colóides por coagulação-floculação, e separação das fases por sedimentação ou flotação (GHANDI, 2005). No entanto, existem alguns compostos, como fenóis, que não podem ser totalmente removidos apenas com o processo de coagulação. Nestes casos, têm surgido cada vez mais evidências que o uso de processos combinados é capaz de superar os prejuízos de uma operação unitária individual e realça todo o desempenho do tratamento (PAPIC et al., 2004; CHAKRABORTY et al., 2005; SOLMAZ et al., 2007).

A coagulação e a floculação são processos físico-químicos usados para agregarem colóides e partículas dissolvidas em flocos maiores, que podem ser facilmente sedimentados por gravidade e em seguida removidos, podendo ser usado no pré ou pós-tratamento biológico (NUNES, 2012). Esse processo utiliza sais de metal hidrolizantes de ferro e alumínio que são amplamente usados como coagulantes primários para promover a formação de agregados em efluentes e reduzir a concentração de corantes e outros compostos orgânicos dissolvidos.

Essa tecnologia tem sido utilizada para o tratamento de água potável e de efluentes industriais, tanto como etapa de pré-tratamento como etapa de tratamento terciário.

Também se destacam como promissores o uso de coagulantes naturais, particularmente o gênero *moringa* e as espécies oleífera, cuja fração ativa deve-se aos sítios catiônicos de alto peso de sua composição, responsável pela desestabilização das partículas coloidais de carga negativa contidas na água, que floculam os colóides, semelhante ao mecanismo provocado pelos polieletrólitos (PRITCHARD, 2010). Estudos com *Moringa oleífera* (*Moringa moringa* (L.)) vêm mostrando eficiência de seu uso como auxiliar de coagulação/floculação, com o objetivo de aumentar a velocidade de sedimentação dos flocos, aumentar a resistência dos flocos e propiciar a diminuição da dosagem do coagulante primário (RORATO, 2013).

O tratamento por via da adsorção e precipitação vem sendo eficazmente aceito, sobretudo de efluentes que contenham corantes ou outras substâncias solúveis com características recalcitrantes. Adsorção é um fenômeno em que o soluto é retirado de uma fase e acumulado na superfície da segunda fase. O material adsorvido é denominado adsorbato e o meio em que se processa a adsorção é o adsorvente (VASQUES, 2008). O processo de tratamento de efluentes têxteis envolvendo a adsorção é uma das técnicas físico-químicas considerada bem mais eficaz em relação aos métodos convencionais e de custos relativamente moderados em relação às novas técnicas de tratamento de efluentes. Ademais, a adsorção constitui uma alternativa tecnológica extremamente importante, principalmente pela possibilidade do uso de adsorventes de baixo custo em processos de controle de poluição. Visasse, portanto, medir os mecanismos engendrados nas indústrias têxteis para a redução dos impactos originados durante os processos do beneficiamento têxtil (ROSSI, 2017).

A adsorção de compostos orgânicos em carvão ativado é uma das tecnologias mais relevantes utilizada para tratamento de efluentes industriais. Seu poder adsorvente é proveniente da alta área superficial e de uma variedade de grupos funcionais em sua superfície (DUAN et al., 2002; GUILARDUCI et al., 2006).

O objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência das técnicas de coagulação-floculação-decantação usando sulfato de alumínio associado a semente de *Moringa* e adsorção com carvão ativado em pó, usando como resposta os parâmetros cor, turbidez, pH e DQO em efluente têxtil.

Material e Métodos

As amostras foram oriundas de processos de lavagem e beneficiamento de Jeans de uma lavanderia têxtil, localizada no município de Caruaru, Brasil. O efluente foi coletado em recipiente plástico de 20 litros, previamente higienizado antes da coleta para evitar contaminação. A coleta foi realizada por uma saída de efluente na canaletta de descarga da lavanderia. Em seguida foi armazenado em caixa térmica e mantida a ±

5°C e levado ao laboratório para a caracterização físico-químicas.

As análises foram realizadas no Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente (LIMA) do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e no Laboratório de Saneamento Ambiental e Drenagem Agrícola (LABSAM) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

O efluente têxtil foi caracterizado segundo a determinação dos parâmetros: pH, turbidez, cor real e DQO. Todas as determinações foram feitas em triplicatas aplicando os métodos de caracterização, segundo *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012), descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Métodos utilizados para análises dos parâmetros físico-químicos na amostra de efluente da lavanderia situada na Cidade de Caruaru/PE

Parâmetros	Método
pH	Método Potenciométrico - 4500B
Turbidez	Método Nefelométrico - 2130 B
Cor	Método Espectrofotométrico (Platino-Cobalto) - 2120 C
DQO	Método Espectrofotométrico - 5220D

Fonte: Autor (2019)

Tratamento Coagulação-Floculação-Decantação

A metodologia de coagulação-floculação-decantação e adsorção foram adotadas de Marchetto e Ferreira Filho (2005); Bezerra et al. (2006); Assis (2015); Paiva (2015) e Neto (2017). Para Marchetto e Ferreira Filho (2005) em muitos tratamentos de água e efluentes, a aplicação do carvão ativo em pó ocorre diretamente na água bruta ou efluente junto ou a jusante da mistura rápida, incorporando-o aos flocos do hidróxido metálico produzidos durante o processo de coagulação. Com isso os processos coagulação e adsorção neste trabalho foram:

1. Coagulação utilizando como coagulante o sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$);
2. Coagulação utilizando como coagulante o sulfato de alumínio associado ao auxiliar de coagulação *Moringa oleífera* em pó, preparado após secagem da semente a 40°C em estufa, triturado em almofariz e passado na peneira de 400 mesh para garantir uma granulometria de 1,19mm);
3. Coagulação utilizando como coagulante o sulfato de alumínio associado ao adsorvente carvão ativado em pó (partículas com 50-100 µm de diâmetro).

Foi realizado um planejamento fatorial (Tabela 2), onde foram usadas as variáveis de entrada: (i) concentração de sulfato de alumínio, (ii) concentração de carvão ativado e (iii) concentração da *moringa oleífera*. Para as variáveis fixas (Tabela 3) do experimento foram selecionadas: (i) tempo de mistura rápida (TMR), (ii) dois tempos de floculação (TF1) e (TF2), (iii) tempo de sedimentação (TSD). Foram realizados 5 tratamentos em triplicata.

Tabela 2 – Interação dos parâmetros das variáveis do planejamento fatorial 2², referente aos ensaios 1, 2, 3, 4 e 5

Concentração do Coagulante	Sulfato de Alumínio Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg.L ⁻¹)	Carvão Ativado (g/l)	Moringa Oleifera (mg.L ⁻¹)
Tratamento 1	50	0,2	200
Tratamento 2	100	0,4	300
Tratamento 3	150	0,6	400
Tratamento 4	200	0,8	500
Tratamento 5	250	1,0	600

Fonte: Autor (2019)

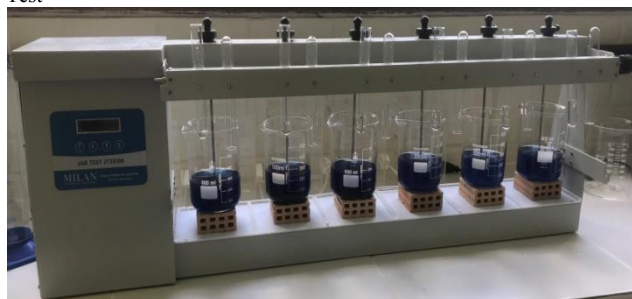
Tabela 3 – Variáveis Fixas, correspondentes à velocidade de coagulação, tempo de decantação, tempo de floculação e tempo de coagulação

Fase	Rotação (RPM)	Tempo (minutos)
TMR	400	0,5
TF1	55	13
TF2	40	7
TSD	0	30

Fonte: Autor (2019)

Os Tratamentos de coagulação/floculação foram realizados no equipamento "Jar Test" da marca MILAN modelo JT303M (Figura 1), de seis provas, com regulador de rotação das hastes misturadoras, em temperatura ambiente. Foi utilizado no experimento Bécker de 500ml com um volume de 250 ml de efluente bruto, ao mesmo foram adicionados os coagulantes nas concentrações descritas na tabela 2 e submetidos a taxa de rotação e tempo fixo, conforme tabela 3. As alíquotas de coagulantes/floculantes foram adicionadas diretamente à amostra, durante o tempo de mistura rápida (TMR), para desestabilizar a matéria em suspensão. Seguiu-se a floculação em dois tempos, simulando duas câmaras de floculação, para facilitar o processo. Para ocorrer a sedimentação (TSD) foi definido um tempo de 30 minutos, após esse tempo foram retiradas amostras de sobrenadante abaixo da superfície. Ao fim do processo de decantação, as amostras foram filtradas utilizando papel filtro quantitativo, faixa preta com 28 µm e determinada os parâmetros de pH, turbidez, cor e DQO.

Figura 1 – Ensaio de coagulação e floculação através de Ensaio "Jar Test"



Fonte: Autor (2019)

Tratamento Adsorção

O tratamento de adsorção (ADS) foi realizado com amostra do efluente bruto e com efluente após tratamento com CFD, realizado apenas para o melhor resultado dentre os tratamentos 1, 2, 3, 4 e 5.

O adsorvente utilizado foi o carvão ativado de origem comercial em pó (CAT_P), partículas com 50-100 µm de diâmetro. Foram realizados 5 tratamentos em triplicata, adotando o planejamento fatorial com a variação da massa (gramas) e o tempo (minutos), conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Método de planejamento fatorial 2² realizado nos ensaios

Planejamento Fatorial 2 ²				
Tratamentos	Massa (g)	Tempo (min)	Massa	Tempo
CAT_P1	0,05	40	+	+
CAT_P2	0,05	10	+	-
CAT_P3	0,01	10	-	-
CAT_P4	0,01	40	-	+
CAT_P5	0,03	25	0	0

Fonte: Autor (2019)

Os tratamentos foram realizados com 25ml do efluente (adsorbato) em contato com o carvão ativado (adsorvente), variando as concentrações, em mesa agitadora, marca QUIMIS, na velocidade de 250 rpm e com os tempos determinados no planejamento fatorial, conforme tabela 4. Após o período de agitação as amostras foram filtradas papel de filtro quantitativo, faixa preta com 28 µm. Em seguida foram realizadas análises de pH, turbidez, cor real e DQO.

Com a obtenção dos resultados da análise dos parâmetros estudados, foi aplicada a estatística dos dados baseando-se na metodologia de Dunnett, 1980, através do Software R versão 6.02, o qual primeiramente se fez uma análise descritiva dos dados obtendo-se os valores das médias, medianas e desvio padrão e posteriormente a aplicação do teste.

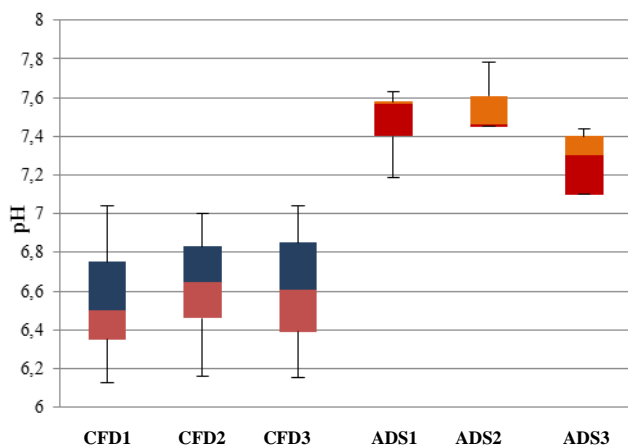
Resultados e Discussões

De acordo com a Resolução do CONAMA nº 430/11 (condições e padrões de lançamento de efluente) os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente no corpo receptor se o pH estiver entre 5 e 9. No tratamento do efluente industrial têxtil com o processo de CFD, o pH variou em entre 6,10 - 7,04. E para os tratamentos com adsorção a variação foi entre 7,0-7,8.

Esses valores ficaram dentro do limite estabelecido pela supracitada Resolução do CONAMA. Segundo Paiva (2015), a variação do pH pode ser explicada pela natureza dos coagulantes e adsorvente. Observou-se que para os tratamentos com CFD e adsorção o pH para todos os tratamentos não difere significativamente da testemunha, que é o efluente no estado bruto.

Porém após CFD os resultados foram levemente ácidos, devido a influencia do caráter ácido do sulfato de alumínio. Enquanto que após adsorção houve um leve aumento do pH para a faixa de neutralidade levemente alcalina, que pode ser associado aos grupos funcionais presentes nos sítios ativos do CAT_P, visto que a amostra bruta apresentou pH levemente ácido (6,88) após CFD ocorreu uma pequena redução e após adsorção houve elevação do pH (Figura 2).

Figura 2 – Variação do pH frente aos tratamentos de CFD e ADS



Legenda: CFD1: Sulfato de Alumínio; CFD2: Sulfato de Alumínio + Carvão Ativado; CFD3: Sulfato de Alumínio + Moringa Oleifera. ADS1: Sulfato de Alumínio; ADS2: Sulfato de Alumínio + Carvão Ativado; ADS3: Sulfato de Alumínio + Moringa Oleifera.

Fonte: Autor (2019)

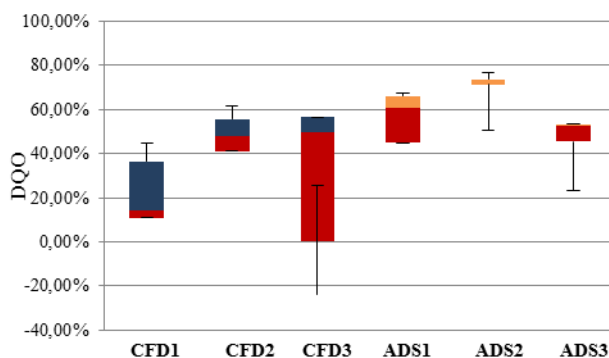
As altas concentrações de DQO em efluentes têxteis são provenientes de uma elevada carga de compostos orgânicos presentes neste (KUNZ et al., 2014). Esse parâmetro indica o grau de poluição orgânica biodegradável, cuja presença promove um grande consumo de oxigênio, inviabilizando a existência de seres aquáticos no corpo d'água (LATIF e DICKERT, 2015). Para minimizar o caráter do efluente com elevada carga orgânica pode-se usar os tratamentos CFD, Adsorção ou ainda a junção desses associados ou não a tratamentos biológicos.

A legislação Federal não especifica limites para demanda química de oxigênio (DQO) em efluentes. A Norma técnica 2001 divulgada pela CPRH (Agência Estadual do Meio Ambiente do Estado de Pernambuco), em que fala sobre o controle de carga orgânica em efluentes líquidos industriais, a fonte poluidora, uma indústria têxtil, por exemplo, deverá remover a carga orgânica não biodegradável (DQO) em 80%. Caso o valor seja menor, mudanças no processo produtivo ou no controle de efluentes orgânicos deverão ser realizadas a fim de alcançar o valor desejado.

Na Figura 3 são observados que os resultados da eficiência da redução da DQO para os tratamentos propostos. O tratamento apenas com sulfato de alumínio apresentou 44,53% na concentração de 100 mg.L⁻¹, a melhor eficiência de redução de DQO com uso do coagulante Al₂(SO₄)₃ + CAT_P foi de 61,55, nas concentrações de 150 mg.L⁻¹ de Al₂(SO₄)₃ e 0,6 g/l de CAT_P. Já com Al₂(SO₄)₃ + Moringa a melhor eficiência foi com as concentrações de 32,99%, nas concentrações de 100 mg.L⁻¹ de Al₂(SO₄)₃ e 300 mg.L⁻¹ de Moringa.

Esses resultados mostram que apenas os tratamentos físico-químicos de CFD propostos não são suficientes para remoção eficiente da DQO. Todavia, quando foi inserido o tratamento de adsorção houve uma melhora desses resultados, chegando a 77% no tratamento de adsorção após CFD Al₂(SO₄)₃ + CAT_P nas concentrações de 0,01g e tempo de 40 minutos.

Figura 3 – Eficiência de remoção da DQO do efluente com os tratamentos de CFD e de adsorção com CAT_P



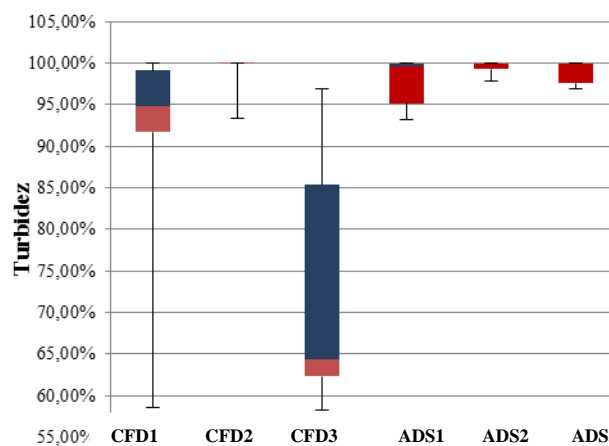
Legenda: CFD1: Sulfato de Alumínio; CFD2: Sulfato de Alumínio + Carvão Ativado; CFD3: Sulfato de Alumínio + Moringa Oleifera. ADS1: Sulfato de Alumínio; ADS2: Sulfato de Alumínio + Carvão Ativado; ADS3: Sulfato de Alumínio + Moringa Oleifera.

Fonte: Autor (2019)

Quanto ao parâmetro turbidez, todos os tratamentos realizados apresentaram redução entre 58 e 99,9% para CFD. Quando acrescido do tratamento de adsorção todos os tratamentos foram superior a 90% (Figura 4). Logo, todos os tratamentos foram eficazes, com eficiência significativa. Visto que o processo de floculação resulta em agregados com tamanho suficiente para uma sedimentação.

A desestabilização do sistema pela adição de íons Al³⁺ provoca a compressão da dupla camada elétrica e o consequente abaixamento do potencial zeta das partículas para valores próximos ao ponto isoelétrico (pie), de modo a favorecer a formação de agregados, que sedimentam com facilidade ou são adsorvidos em superfície porosa, resultando na redução da turbidez, que reflete na remoção dos sólidos em suspensão/coloidal no efluente.

Figura 4 – Eficiência de remoção da Turbidez do efluente com os tratamentos de CFD e de adsorção com CAT_P



Legenda: CFD1: Sulfato de Alumínio; CFD2: Sulfato de Alumínio + Carvão Ativado; CFD3: Sulfato de Alumínio + Moringa Oleifera. ADS1: Sulfato de Alumínio; ADS2: Sulfato de Alumínio + Carvão Ativado; ADS3: Sulfato de Alumínio + Moringa Oleifera.

Fonte: Autor (2019)

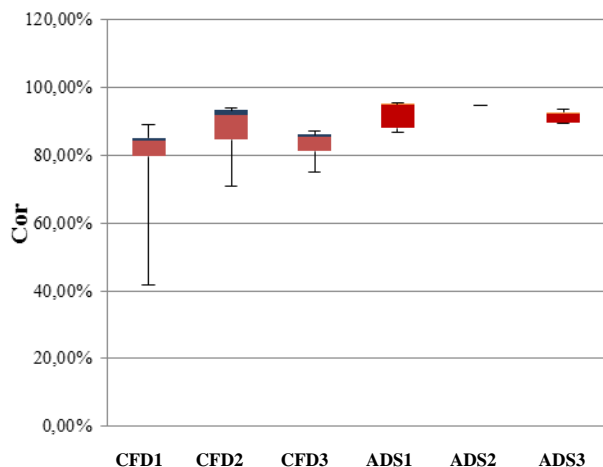
Segundo Melo et al. (2006) o problema da cor intensa nos efluentes têxteis, que são gerados pela grande quantidade de corantes não fixados, ionizados e principalmente corantes reativos que, possuem pequeno poder de degradabilidade, sendo assim de difícil eliminação tanto pelos processos biológico e físico-químicos. O tratamento biológico aeróbio é amplamente utilizado em efluentes têxteis, devido sua boa remoção de carga orgânica e por ser um processo seguro. Através de um processo secundário biológico, as substâncias orgânicas podem ser removidas, mas a cor é reduzida através de métodos físico-químicos (QUEIROZ et al., 2019).

Kouba e Ping (1994) destacam que complexos inorgânicos na coagulação/floculação não são totalmente efetivos na remoção de cor residual de certos tipos de corantes (ácidos e reativos).

Não existe padrão de cor aparente para lançamento de efluentes em Resoluções ou Normas. Os resultados de cor aparente (quando é realizada a medição de cor das amostras sem centrifugação) ficaram abaixo do valor máximo estabelecido pela Resolução do CONAMA nº 430/11 mesmo em relação à cor verdadeira 75 mg Pt-Co/L (quando a medição de cor das amostras é realizada após a centrifugação destas).

Na Figura 5, verifica-se o desempenho da Remoção de cor, onde todos os tratamentos de CFD seguido de adsorção apresentaram eficiência superior a 80%.

Figura 5– Eficiência de remoção da cor do efluente com os tratamentos de CFD e de adsorção com CAT_P



Legenda: CFD1: Sulfato de Alumínio; CFD2: Sulfato de Alumínio + Carvão Ativado; CFD3: Sulfato de Alumínio + Moringa Oleifera. ADS1: Sulfato de Alumínio; ADS2: Sulfato de Alumínio + Carvão Ativado; ADS3: Sulfato de Alumínio + Moringa Oleifera.

Fonte: Autor (2019)

Os tratamentos de CFD Sulfato de Alumínio + Carvão Ativado seguido de adsorção com CAT_P foi o que se destacou em eficiência de remoção, ficando com eficiência entre 93,97% e 95,44%. As condições com tratamento com CFD apresentaram o resultado com o coagulante $Al_2(SO_4)_3$ + CAT_P (CFD2) de 93,68%, na concentração de 250 mg.L^{-1} de $Al_2(SO_4)_3$ e $1,0 \text{ g/l}$ de CAT_P. A melhor eficiência de redução de cor. No $Al_2(SO_4)_3$ a amostra 5 foi quem apresentou maior eficiência de remoção com 88,79%, a concentração de 250 mg.L^{-1} .

Utilizando o $Al_2(SO_4)_3$ + Moringa (CFD3) a melhor eficiência foi com as concentrações de 87,07%, nas concentrações de 250 mg.L^{-1} de $Al_2(SO_4)_3$ e 600 mg.L^{-1} de Moringa. Após esse processo usando o carvão ativado como adsorvente o melhor resultado se deu na amostra 4 com remoção de 95,40%, nas concentrações de $0,01 \text{ g}$ e tempo de 40 minutos.

Segundo Toledo et al. (2003) a desvantagem de utilizar o carvão ativado é sua forma lenta de adsorção, sendo necessário algumas vezes ser realizado um pré-tratamento antes da adsorção, considerando que sólidos suspensos maiores que 50 mg.L^{-1} podem acumular nos leitos de carvão e reduzir a eficiência da descoloração. O uso do carvão ativado é aconselhável em processos descontínuos e com baixas concentrações de cor.

O tratamento biológico de efluente têxtil como pós-tratamento para remoção da cor é baixo, já que a maioria das moléculas de corante não são biodegradáveis. Para melhor eficiência seria a utilização como pré-tratamento, com redução efetiva da cor desse tipo de efluente, promovendo uma melhor tratabilidade por caminhos biológicos. Todavia esses caminhos podem ser comprometidos se houver grandes variações de pH, visto que para a maioria das bactérias seu crescimento está na faixa próxima da neutralidade (6,5 - 7,5), variações fora dessa faixa pode levar a falência do tratamento biológico ou onera-lo se a opção for a correção do pH.

Dentre os ensaios realizados o tratamento com CFD + carvão ativado em pó mostrou-se com maior eficiência com relação a todos os parâmetros analisados para os tratamentos de CFD. E a eficiência foi potencializada quando seguido da adsorção com CAT_P. Entre as principais características que fazem do carvão ativado um bom adsorvente destaca-se sua grande área superficial, alta pureza, natureza micro porosa, elevada capacidade de adsorção e fácil disponibilidade (ARASTEH, 2010). A habilidade de remoção de uma grande variedade de compostos em águas contaminadas elevaram a procura e o interesse por carvão ativado nos últimos anos (ODUBIYI, 2012).

Análise Estatística

Em uma análise estatística descritiva dos dados, Tabela 5, tomando-se como referência o ensaio CFD, evidencia-se que se obteve menor média aritmética no ensaio com CFD 2, correspondente a Sulfato de Alumínio + Carvão Ativado, dentre todos os ensaios realizados. Assim como com um menor desvio padrão, o que caracteriza melhor resultado para o tratamento.

Realizando a estatística descritiva dos dados com o tratamento ADS (Tabela 6), evidencia-se que se obteve menor média aritmética no ensaio com ADS2, correspondente a Sulfato de Alumínio + Carvão Ativado, dentre todos os ensaios realizados. Assim como com um menor desvio padrão, o que caracteriza melhor resultado para o tratamento.

Tabela 5 – Estatísticas descritivas para o tratamento coagulação-floculação-decantação (CFD), utilizando Sulfato de alumínio (CFD1), Carvão ativado (CFD2) e Moringa Oleifera (CFD3)

Parâmetro	Tratamento	Média	Desvio	Mediana	Mín.	Máx.
pH	CFD1	6,7	0,3	6,6	6,3	7
	CFD2	6,6	0,3	6,7	6,2	7
	CFD3	6,7	0,3	6,7	6,1	7
Turbidez (NTU)	CFD1	77,2	117	20,1	0,1	123
	CFD2	52,9	99,6	0,1	0,1	20
	CFD3	115,2	119,8	109	9,3	124
DQO (mg.L ⁻¹)	CFD1	444	130,9	399,1	297,3	64,5
	CFD2	315,2	88,3	279,8	206,1	537,4
	CFD3	498,1	174,2	397,6	359,1	711,9
COR (uH)	CFD1	128	126,8	63	39	203
	CFD2	96,3	118,8	41,5	22	101
	CFD3	107,7	123,5	58,5	45	87

Fonte: Autor (2019)

Tabela 6 – Estatísticas descritivas para o tratamento Adsorção (ADS), utilizando Sulfato de alumínio (ADS1), Carvão ativado (ADS2) e Moringa Oleifera (ADS3)

Parâmetro	Tratamento	Média	Desvio	Mediana	Mín.	Máx.
pH	ADS1	7,4	0,18	7,5	7,2	7,6
	ADS2	7,4	0,29	7,4	7,0	7,8
	ADS3	7,2	0,16	7,3	7,1	7,4
Turbidez (NTU)	ADS1	6,9	9,6	0,1	0,1	20,3
	ADS2	1,8	2,8	0,1	0,1	6,5
	ADS3	3,3	4,43	0,1	0,1	9
DQO (mg.L ⁻¹)	ADS1	351	307,7	211	175	895,5
	ADS2	167	55,3	153	123	263
	ADS3	279	83,2	254	186	411,5
COR (uH)	ADS1	27,8	14,8	18	16	46
	ADS2	18,8	1,7	19	16	21
	ADS3	33,6	12,5	28	23	54

Fonte: Autor (2019)

Utilizando análise estatística dos dados através do Software R versão 6.02, aplicando o teste de Dunnett, o qual foram definidas as hipóteses de forma geral, em que:

$$H_0 : \mu_{\text{Característica (tratamento)}} = \mu_{\text{característica (testemunha)}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Característica (tratamento)}} \neq \mu_{\text{característica (testemunha)}}$$

Sejam os parâmetros utilizados: pH, turbidez, cor ou DQO com o tratamento de sulfato, carvão e moringa não tem diferença significativa em relação a testemunha então a hipótese é (H0) e se houver diferença a hipótese é (H1).

Observa-se que para o tratamento de CFD o pH para todos os parâmetros, nenhum difere significativamente da testemunha que é o efluente no estado bruto, logo não há alteração no pH, da água nem para acido ou base depois de adicionar algum dos tratamentos.

Com relação à Turbidez, houve mudança significativa para todos os tratamentos, ou seja, adicionar esses tratamentos reduz a turbidez da água.

Apenas DQO na presença carvão ativado, a redução significativa, ou seja há uma redução da matéria orgânica. Referente à Cor, sua aparência mudou na presença dos três tratamentos. Comparando os tratamentos com relação à testemunha apenas o carvão ativado, mostrou-se mais eficiente, pois atuou na DQO e nos outros parâmetros foi o que obteve os melhores resultados.

Tabela 7- Comparação dos tratamentos através do teste de Dunnett ao nível (5% de significância) com os limites do intervalo para o tratamento coagulação-floculação-decantação (CFD)

Teste	Amplitude	Limite inferior	Limite superior	Decisão
pH(CFD2)	-0.259	-0.750	0.230	Não rejeita H ₀
pH(CFD3)	-0.272	-0.761	0.217	Não rejeita H ₀
pH(CFD1)	-0.326	-0.816	0.164	Não rejeita H ₀
Turbidez(CFD2) (NTU)	-292.945	-352.071	- 233.819	Rejeita H ₀
Turbidez (CFD3) (NTU)	-218.011	-277.026	- 158.996	Rejeita H ₀
Turbidez(CFD1) (NTU)	-263.875	-322.994	- 204.756	Rejeita H ₀
DQO(CFD1) (mg.L ⁻¹)	-220.768	-431.780	-9.755	Rejeita H ₀
DQO(CFD3) (mg.L ⁻¹)	-37.616	-248.548	173.316	Não rejeita H ₀
DQO(CFD1) (mg.L ⁻¹)	-91.253	-302.001	119.493	Não rejeita H ₀
COR(CFD2) (uH)	-301.888	-365.264	- 238.512	Rejeita H ₀
COR(CFD3) (uH)	-288.346	-351.647	- 225.046	Rejeita H ₀
COR(CFD1) (uH)	-264.051	-327.368	- 200.733	Rejeita H ₀

Fonte: Autor (2019)

Analisando após a adsorção (Tabela 8), com exceção a DQO para os tratamentos com a Moringa oleifera e Sulfato de Alumínio, todos mostraram-se significativos em relação a testemunha.

Tabela 8- Comparação dos tratamentos através do teste de Dunnett ao nível (5% de significância) com os limites do intervalo para o tratamento de adsorção (ADS)

Teste	Amplitude	Limite inferior	Limite superior	Decisão
pH(ADS2)	0.579	0.269	0.889	Rejeita H ₀
pH(ADS3)	0.388	0.078	0.697	Rejeita H ₀
pH(ADS1)	0.593	0.283	0.904	Rejeita H ₀
Turbidez(ADS2) (NTU)	-295.153	-304.175	-286.131	Rejeita H ₀
Turbidez(ADS3) (NTU)	-293.682	-302.694	-284.670	Rejeita H ₀
Turbidez(ADS1) (NTU)	-290.002	-299.034	-280.969	Rejeita H ₀
DQO(ADS2) (mg.L ⁻¹)	-369.103	-634.102	-104.105	Rejeita H ₀
DQO(ADS3) (mg.L ⁻¹)	-257.176	-521.933	7.580	Aceita H ₀
DQO(ADS1) (mg.L ⁻¹)	-184.716	-449.963	80.531	Aceita H ₀
COR(ADS2) (uH)	-329.214	-345.214	-313.214	Rejeita H ₀
COR(MO-Tes) (uH)	-314.402	-330.420	-298.384	Rejeita H ₀
COR(SA-Tes) (uH)	-320.224	-336.224	-304.223	Rejeita H ₀

Não tiveram diferença significativa em relação a testemunha. Comparando os tratamentos com relação a testemunha o carvão ativado, mostrou-se mais eficiente pois atuou em todos os parâmetros com os melhores resultados. O que corrobora Furlan (2008) utilizando processo de CFD e adsorção no tratamento de efluentes têxteis, ele obteve melhores resultados utilizando o carvão ativo em pó.

Conclusão

Avaliando a eficiência dos processos de tratamento físico-químico com CFD e o tratamento com adsorção, pode-se concluir que os tratamentos com CFD reduziram levemente o pH, enquanto os tratamentos seguidos de adsorção com CAT_P mantiveram o pH próximo da neutralidade. Apesar de todos os tratamentos apresentarem reduções dos parâmetros pH, cor, turbidez e DQO, estatisticamente não houve diferença significativa entre os tratamentos. Os valores para o parâmetro de DQO, turbidez e cor apresentaram melhor eficiência de remoção nos tratamentos CFD com $Al_2(SO_4)_3$ e CAT_P, seguidos de adsorção com CAT_P (76,99%, 99,97% e 95,40%).

Agradecimentos

À UFRPE pelo acolhimento, à Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio financeiro, à CAPES pela infraestrutura do PPEAMB. A Prof^a Rosângela Gomes Tavares da UFRPE por toda orientação para finalização do artigo. Ao Prof. o Dr. Mauricio Alves da Motta Sobrinho pela concessão do uso do Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente (LIMA) da UFPE e a Prof^a Neide Kazue Sakugawa Shinohara da UFRPE pela obtenção da semente da Moringa Oleifera.

Referências

APHA.; Standard Methods for the examination of water and wastewater. In: CLESCERI, L.S, GREENBREG, E.; EATON, A.D. (Ed). American public health association. 20 th ed. Washington, 1995.

ARASTEH, R.; MASOUMI, M.; RASHIDI, A.M.; MORADI, L.; SAMIMI, V.; MOSTAFAVI, S.T. Adsorption of 2-nitrophenol by multi-wall carbon nanotubes from aqueous solutions. *Appl. Surf. Sci.*, v. 256, p. 4447, 2010.

ASSIS FILHO, R. B. **Uso do resíduos de malacocultura como adsorvente de corantes têxteis.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2015.

BEZERRA, A. A. M., GUEDES, R. C., MELO, H. N. S., SOUZA, J. F., JERÔNIMO, C. E. M. **Aplicação Da Coagulação/Floculação Como Pré-Tratamento Ao Processo Uv- Peróxido No Tratamento De Efluentes Têxteis.** Xxx Congresso De La Asociación Interamericana De Ingeniería Sanitaria Y Ambiental. 2006.

BRASIL. Resolução CONAMA N° 357 de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil N° 053, págs. 58-63. 2005.

BRASIL. Resolução CONAMA N° 430 de 13 de maio de 2011. Condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da República Federativa do Brasil N° 430.

CHANG, CHENG-NAN; YU, RUEY-FANG; CHAO, A. C.; TOJO, S. On-Line Monitoring and Control of Textile Wastewater Color Removal Process. *Water Science and Technology*, v. 30, n. 3, p. 265-274, 1994.

CHAKRABORTY, S., De, S., Basu, J.K., Dasgupta, S. (2005). Treatment of a textile effluent: application of a combination method involving andnanofiltration. *Desalination*, v. 174, p. 73-85, 2005.

COSTA, M. C., MONTEIRO, G. A., MOTA, S. B. E DOS SANTOS A. B. **Descoloração Redutiva dos Corantes Reactive Red 2 e Congo Red por dois Consórcios Anaeróbios: Avaliação do Potencial Catalítico do AQDS na Presença de Diferentes Doadores de Elétrons.** XI Congresso Latino Americano de Digestão Anaeróbia. Ilha de Pacua Chile, 2012.

CPRH- Agência Estadual de Meio Ambiente. **Norma Técnica nº2001.** Estabelecer critérios e padrões de emissão que resultem na redução da carga orgânica industrial lançada direta ou indiretamente nos recursos hídricos do estado de Pernambuco. Revisada e atualizada em 03 de novembro de 2003. CPRH, 2003.

DUAN, J.; WILSON, F.; GRAHAM, N.; TAY, J. H. Adsorption of humic acid by powdered activated carbon in saline water conditions. *Desalination*, v. 151, p. 53-66, 2002.

DUNNETT, C. W. Pairwise multiple comparisons in the homogeneous variance, unequal sample size case. *Journal of the American Statistical Association*, vol. 75, n. 372, p. 789-795, December 1980.

FERNANDES, F. H. **Potencial toxicogenômico e carcinogênico de efluentes da indústria têxtil e dos corantes Disperse Red 1 e Disperse Blue 291 em roedores.** Tese de Doutorado. Departamento de Ciências Biológicas - Instituto de Biociências, Câmpus de Botucatu, UNESP, 2016.

GHANDI, G. Tratamento e controle de efluentes industriais. p. 5-46, 2005.

GUILARDCI, V. V. S.; MESQUITA, J. P.; MARTELLI, P. B.; GORGULHO, H. F. Adsorção de fenol sobre carvão ativado em meio ativado em meio alcalino. *Quim.Nova*, v. 29, n.6, p. 1226-1232, 2006.

HOLKAR, C.R. et al. A Critical Review on Textile Wastewater Treatments: Possible Approaches. *Journal of Environmental Management*, v. 182, p. 351-366. 2016.

KARCHER, S., KORNMULLER, A., JEKEL, M. Removal of Reactive Dyes by Sorption/Complexation with Curcubituril. *Water Science and Technology*, v. 40, n.4-5, p. 425-433, 1999.

KHALED, A.; EL-NEMR, A.; EL-SIKAILY, A.; ABDELWAHAB, O. Treatment of artificial textile dye effluent containing Direct Yellow 12 by orange peel carbon. *Desalination*. v. 238, p. 210-232, 2009.

KIRBY, N.; MC MULLAN, G.; MARCHANT, R. Descolorisation of an artificial textile effluent by Phanerochaete chrysosporium. *Biotechnology Letters*, v. 17, p. 761-764, 1995.

KOUBA, J. F.; PING, Z. Color Removal for Textiles dyeing Wastewater. *Fluid/Particle Separation Journal*, v. 7, n. 3, p. 87-90, 1994.

KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P.; Moraes, S. G.; DURÁN, N. Novas Tendências no tratamento de efluentes têxteis. *Quím. Nova*, v.25, n. 1, p. 78-82, 2014.

LATIF, U.; DICKERT, F. L. Graphene Hybrid Materials in Gas Sensing Applications. *Sensors*, n. 15, p. 30504- 30524, 2015.

LICSKÓ, I. Realistic coagulation mechanisms in the use of aluminium and iron (III) salts. *Water Science Technology*, v. 40, n. 4-5, p. 103-111, 1997.

- MARCHETTO, M.; FERREIRA FILHO, S. S. Interferência do processo de coagulação na remoção de compostos orgânicos causadores de gosto e odor em águas de abastecimento mediante a aplicação de carvão ativado em pó. **Engenharia sanitaria e ambiental**, Vol.10, nº 3, p. 243-252, 2005.
- MELO, J. S.; MELO, M. J.; CLARO A. As moléculas da cor na arte e natureza. **Química - Boletim da Sociedade Portuguesa de Química**, v. 101, P. 44-55, 2006.
- NETO, L. M. P. **Avaliação Físico-Química do rio Ipojuca e lavanderia têxtil de pequeno porte no município de Caruaru-PE**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017.
- NUNES, José A. Tratamento Físico-Químico de Águas Residuárias Industriais. 6ª edição revisada, ampliada e atualizada – Aracaju: **Gráfica Editora J. Andrade**. 315p. 2012.
- ODUBIYI, O. A.; AWOYALE, A. A.; ELOKA-EBOKA, A. C. Wastewater Treatment with Activated Charcoal Produced from Cocoa Pod Husk. **Int. J. Environ. Bioener**, v. 4, n. 3, p. 162-175, 2012.
- PAIVA, T. M. N. **Estudo de remoção de corantes aniônicos em conchas de molusco bivalves**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco . 2015.
- PAPIC, S.; KOPRIVANAC, N.; BOZIC, A. L.; METES, A. Removal of some reactive dyes from synthetic wastewater by combined Al(III) coagulation/carbon adsorption process. **Dyes and Pigments**, v. 62, n. 3, p. 291-298, 2004.
- PRITCHARD, M. et al. A comparison between Moringa oleifera and chemical coagulants in the purification of drinking water – An alternative sustainable solution for developing countries. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 35, p. 798-805, 2010.
- QUEIROZ, M. T. A., QUEIROZ, C. A., ALVIM, L. B., SABARÁ, M. G., LEÃO, M. M. D., & AMORIM, C. C.. Reestruturação na forma do tratamento de efluentes têxteis: uma proposta embasada em fundamentos teóricos. **Gestão & Produção**, v.26, n.1, e1149, 2019.
- RORATO, W. R.. **Utilização de Moringa oleifera LAM como auxiliar no processo de coagulação/floculação/filtração para o tratamento de água de abastecimento**. 2013. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2013.
- ROSSI, T. et al. Waste from eucalyptus wood steaming as a natural dye source for textile fibers. **Journal of Cleaner Production**. v. 143, Pages 303–310. 2017.
- SAPARI, N. Treatment and reuse of textile wastewater by overland flow. **Desalination**, v. 106 (1-3): 179-182, 1996.
- SIQUARA, L. O., A influência do íon cloreto na determinação da demanda química de oxigênio. **Revista Têxtil**, São Paulo: R. da Silva Haydu e Cia Ltda. 1994.
- SÃO PAULO. **Lei** nº 997 de 31 de maio de 1976. A prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. Sao Paulo: câmara municipal de São Paulo, 1976.
- SOLMAZ, S.K.A., Üstün, G.E., Birgül, A., Tasdemir Y. (2007). Treatability studies with chemical precipitation and ion exchange for an organized industrial district (OID) effluent in Bursa, Turkey. **Desalination**, p. 301-312, 2007.
- TOLEDO, L. C.; SILVA, A. C. B.; AUGUSTI, R.; LAGO, R. M. Application of Fenton's reagent to regenerate activated carbon saturated with organochloro compounds. **Chemosphere**, 50, p.1049-1054, 2003.
- VILLIERS, M. Água: como o uso deste precioso recurso natural poderá acarretar a mais séria crise do século XXI. **Rio de Janeiro: Ediouro**, 2002.