

AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO CONJUGADO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS E EFLUENTE TÊXTIL BRUTO SEGUIDO POR REAÇÃO DE FOTO-FENTON

Greice Wolkan

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Eliza Nagel Hassemer

2015/1

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental

**AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO CONJUGADO DE
DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS E EFLUENTE TÊXTIL BRUTO
SEGUIDO POR REAÇÃO DE FOTO-FENTON**

GREICE WOLKAN

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Programa de
Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau
de Engenheiro em Engenharia
Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof^a Dr^a. Maria Eliza
Nagel Hassemer

Florianópolis, SC
2015

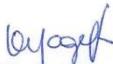
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA
E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO CONJUGADO DE
DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS E EFLUENTE TÊXTIL
BRUTO SEGUIDO POR REAÇÃO DE FOTO-FENTON**

GREICE WOLKAN

Trabalho submetido à banca examinadora
como parte dos requisitos para Conclusão
do Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental – TCC II.

BANCA EXAMINADORA:



Profª Drª. Maria Eliza Nagel Hassemer
(Orientador)



Profª Drª. Maria Angeles Lobo Recio
(Membro da Banca)



Drª. Cláudia Lavina Martins (Membro
da Banca)

Florianópolis, SC
Agosto/2015

WOLKAN, Greice. Avaliação do tratamento conjugado de drenagem ácida de minas e efluente têxtil bruto seguido por reação de foto-Fenton. **Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2015. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSC.**

RESUMO

A mineração de carvão é uma atividade de relevância na economia catarinense. O carvão extraído passa por um processo de beneficiamento que gera resíduos com alta concentração de compostos de ferro e enxofre, que se oxidam em contato com a água e o ar. O carregamento destes compostos para corpos hídricos constitui a drenagem ácida de minas (DAM), levando à acidificação da água e à solubilização de metais pesados, causando impactos negativos à fauna e à flora aquáticas e diminuindo drasticamente a qualidade da água. A depuração é lenta devido à presença de substâncias recalcitrantes, dificultando o reúso destas águas. Trabalhos recentes mostram possibilidades tecnológicas no tratamento conjunto de DAM com efluentes domésticos, em que a capacidade coagulante da DAM permite a precipitação dos contaminantes presentes no efluente, e o pH básico do mesmo atua como agente tamponante para a DAM. Além disso, o ferro dissolvido presente na DAM pode servir de insumo para as reações de Fenton e foto-Fenton. O objetivo deste trabalho foi o de avaliar o tratamento combinado de DAM e efluente têxtil bruto seguido por processo oxidativo avançado (POA) foto-Fenton, com concentrações de H_2O_2 de 500 e 1000 mg/L. Para isto, foram coletadas duas amostras de DAM em dois corpos d'água impactados pela DAM no sul de Santa Catarina, e uma amostra de efluente têxtil bruto coletada em uma indústria têxtil no norte do estado. Verificou-se que a mistura com menor proporção possível em que houve efeito de coagulação foi para 650 mL de DAM e 350 mL de efluente têxtil bruto. Após a coagulação e sedimentação, o sobrenadante foi encaminhado para o reator foto-Fenton, em que o ferro insumo da reação foi o próprio ferro dissolvido nas amostras de DAM, sem adição extra. O sistema de tratamento obteve eficiências de remoção de: 99% para cor, 99% para turbidez, 91% para COD, 95% para compostos aromáticos, 99% para sólidos totais, 83% para sólidos suspensos e 100% para sólidos dissolvidos. Entretanto, verificou-se que as amostras tratadas após coagulação/sedimentação e reação foto-Fenton não se enquadram nos padrões de reúso da indústria têxtil, devido às concentrações de ferro e sólidos suspensos.

PALAVRAS-CHAVE: Processo Oxidativo Avançado; Drenagem Ácida de Minas; Efluente têxtil; Reação de foto-Fenton.

ABSTRACT

Coal mining is an important activity for the economy in Santa Catarina. The coal is extracted and passes by a processing system which generates residues with high concentrations of iron and sulfur, which oxidize when in contact with air and water. These compounds are washed and carried away with rainwater and end up in water bodies, constituting the phenomenon known as Acid Mine Drainage (AMD). AMD causes negative impacts to the aquatic flora and fauna, decreasing drastically the water quality. The self-depuration is slow due to the presence of recalcitrant contaminants, posing difficulties to the water reuse. Recent works have shown new technological possibilities for the combined treatment of AMD and municipal wastewater, in which the AMD coagulant capacity takes to the precipitation of the contaminants present in the wastewater, and the high pH of the wastewater creates a tamponing effect on the AMD highly acidic pH. Besides that, the dissolved iron present in the AMD can be used as an input for the Fenton and photo-Fenton reaction. The goal of this work was to analyse the combined treatment of AMD and textile wastewater, followed by the advanced oxidative process photo-Fenton, with hydrogen peroxide concentrations of 500 and 100 mg/L. Two water samples were collected and two different water bodies at the south of Santa Catarina, both impacted by AMD. Another sample of textile raw wastewater was collected at a textile industry at the north of SC. The results showed that the mixture with the least possible proportion to induce a coagulation effect was the proportion of 650 mL of AMD and 350 mL of textile wastewater. After coagulation/sedimentation, the supernatant passed by the photo-Fenton reactor, in which the iron for the photo-Fenton reaction was the iron already dissolved in the AMD samples, without any further extra additions. The treatment system had the following efficiencies of removal: 99% for color, 99% for turbidity, 91% for DOC, 95% for aromatic compounds, 99% for total solids, 83% for suspended solids and 100% for dissolved solids. However, the results showed that the samples treated by coagulation/sedimentation and by the photo-Fenton reaction didn't meet the reuse standards for the textile industry, due to the iron and suspended solids concentrations.

KEY WORDS: Advanced Oxidative Process; Acid Mine Drainage; Textile wastewater; Photo-Fenton reaction.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por ser o pilar da minha vida e por todo o apoio que sempre recebi. Em especial à minha mãe, Solange, pelo seu amor maior que tudo.

Aos meus amigos pelos momentos de alegria compartilhados juntos e pela força para seguir em frente.

À professora e orientadora, Dra. Maria Eliza Nagel Hassemer, pela atenção, auxílio e incentivos em todos os momentos deste trabalho.

Aos colegas do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, pela companhia nesta jornada.

Ao Laboratório de Reúso de Águas (LARA) e ao Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA) pela disponibilização de infraestrutura e de material para realização dos ensaios.

SUMÁRIO

RESUMO.....	5
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	10
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVO GERAL.....	13
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
3.1 BENEFICIAMENTO DE CARVÃO.....	14
3.2 DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS (DAM).....	15
3.3 RIO SANGÃO E LAGOA LÍNGUA DO DRAGÃO.....	16
3.4 A INDÚSTRIA TÊXTIL.....	18
3.5 PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POA).....	19
3.6 PROCESSO UV/H ₂ O ₂	19
3.7 REAÇÃO DE FENTON.....	20
3.8 REAÇÃO DE FOTO-FENTON.....	21
3.9 COAGULAÇÃO.....	22
3.10 TRATAMENTO CONJUGADO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS COM OUTROS EFLUENTES.....	23
3.11 REÚSO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS TRATADAS.....	26
4. METODOLOGIA.....	29
4.1 COLETA DAS AMOSTRAS.....	29
4.1.1 Coleta das amostras de DAM.....	29
4.1.2 Coleta da amostra de efluente têxtil bruto.....	31
4.2 TRATAMENTO CONJUGADO – TRABALHO EXPERIMENTAL.....	31
4.2.1 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO.....	32
4.2.2 ENSAIOS DE TRATAMENTO FOTO-FENTON.....	34
4.2.3 ENSAIOS DE TRATAMENTO UV/H ₂ O ₂	36

5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE DAM E DE EFLUENTE TÊXTIL BRUTO	37
5.2	EXPERIMENTO DE COAGULAÇÃO/SEDIMENTAÇÃO	37
5.3	TRATAMENTO POR PROCESSO FOTO-FENTON	39
5.4	TRATAMENTO DO EFLUENTE TÊXTIL BRUTO POR PROCESSO UV/H ₂ O ₂	46
5.5	COMPARAÇÃO COM A LEGISLAÇÃO DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES E COM A LITERATURA DE REÚSO DE ÁGUA	47
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	49
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CO ₂	Gás Carbônico
COT	Carbono Orgânico Total
COD	Carbono Orgânico Dissolvido
DQO	Demanda Química de Oxigênio
H ₂ O	Água
H ₂ O ₂	Peróxido de Hidrogênio
NBR	Norma Brasileira
O ₃	Ozônio
OH•	Radical Hidroxila
POA	Processo Oxidativo Avançado
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
UV	Ultra Violeta

1. INTRODUÇÃO

Os minerais representam uma importante matéria-prima para diversos processos produtivos. A mineração de carvão é uma atividade de grande relevância na economia de Santa Catarina, especialmente no sul do estado, tendo como finalidade principalmente a geração de energia no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda. O chamado Distrito Carbonífero envolve as bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Tubarão e Urussanga, abrangendo os municípios de Orleans, Lauro Müller, Criciúma, Siderópolis, Treviso, Urussanga, Forquilha, Içara, Maracajá e Araranguá (NASCIMENTO et al, 2002). O processo de extração e beneficiamento de carvão gera resíduos formados pelas camadas retiradas do solo e por compostos de ferro e enxofre, como a pirita, siltitos e folhelhos, presentes nas impurezas retiradas do material. A exposição destes rejeitos ao ar e à chuva promove a oxidação dos minerais ali presentes, que são carregados pela água, atingindo o lençol freático, rios e lagos, promovendo o assoreamento dos corpos hídricos e a sua contaminação pelos rejeitos da atividade mineradora. Este fenômeno, conhecido por “drenagem ácida de minas” (DAM), provoca a acidificação da água e a solubilização de metais pesados presentes em sedimentos, causando impactos negativos à fauna e à flora aquáticas e diminuindo drasticamente a qualidade da água, incluindo efeitos de toxicidade (JENNINGS, NEUMAN E BLICKER, 2008).

A DAM pode levar à destruição de ecossistemas e impedir o reuso da água para irrigação ou mesmo para fins não-potáveis ou industriais, por conter compostos tóxicos e recalcitrantes em grandes concentrações. A gestão ambiental das minas envolve a drenagem

da área de trabalho, evitando que a água contaminada percole pelo solo; entretanto, o controle total é difícil devido não apenas às atividades atuais realizadas nas minas, mas também ao passivo ambiental acumulado. A recuperação de corpos hídricos contaminados pela drenagem ácida de minas é lenta e complexa devido à presença de substâncias recalcitrantes, ou seja, compostos de difícil biodegradação, o que acaba sendo uma barreira para a reutilização destas águas. (EPA, 2003)

A grande concentração de ferro nas águas contaminadas pela DAM tem motivado pesquisas que visam aproveitar o potencial coagulante/oxidativo destas águas em tratamento conjugado com outros tipos de efluentes, como o esgoto sanitário e o lixiviado de aterro sanitário. Enquanto o alto pH destes efluentes elevaria o pH da mistura, atingindo valores próximos à neutralidade, a DAM possibilitaria a

precipitação de poluentes presentes nos efluentes e a sua desinfecção. O ferro presente na DAM e seu baixo pH também podem servir como insumos para a Reação de Fenton, processo oxidativo avançado em que o íon ferroso promove a formação do radical hidroxila a partir de peróxido de hidrogênio, promovendo a coagulação/oxidação dos poluentes.

Assim como a atividade carbonífera, a indústria têxtil representa um setor de importância na economia catarinense e nacional. A produção têxtil em Santa Catarina representa quase 19% da produção industrial no estado, representando 21% do setor têxtil nacional e empregando mais de 170 mil trabalhadores (SINDIVEST, 2012). Destacam-se a nível estadual as regiões do Vale do Itajaí, Norte e Sul catarinense. A produção têxtil apresenta desafios à gestão ambiental, especialmente no que concerne aos seus efluentes, que apresentam cor elevada devido ao processo de tingimento e compostos tóxicos ao homem e ao meio ambiente (NAGEL-HASSEMER, 2012). Segundo Baêta (2012), “estes efluentes caracterizam-se por possuir uma variação de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO), e por elevada presença de cor e sólidos totais, sendo que a grande maioria dos sólidos refere-se aos sólidos dissolvidos”.

A complexidade do efluente têxtil é em grande parte devida à alta variedade de corantes e pigmentos usados no processo de tingimento que, segundo Kunz et al (2001), chegam a 10.000 diferentes compostos, representando um consumo anual de 26.500 toneladas no Brasil. Diversos métodos têm sido usados no tratamento de efluentes têxteis, tais como a floculação físico-química com auxílio de polímeros, carvão ativado e ozonização; entretanto, as moléculas de corantes apresentam tamanho significativamente inferior às demais moléculas inorgânicas, dificultando sua remoção (BUTHELEZI, 2012). O tratamento de efluente têxtil por processos oxidativos avançados Fenton, Foto-Fenton e UV/H₂O₂ tem se mostrado promissor na remoção de cor e carbono orgânico total (NAGEL-HASSEMER, 2006; KANG, 2002; KOS, 2010).

Com este trabalho propõe-se verificar qual a eficiência apresentada no tratamento conjugado de DAM e efluente bruto têxtil, seguido por Reação de Foto-Fenton.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Determinar a eficiência do tratamento conjugado de efluente bruto têxtil e drenagem ácida de minas (DAM) seguido por reação de foto-Fenton.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a eficiência do tratamento conjugado na remoção dos parâmetros Sólidos Totais, Carbono Orgânico Total, Cor, Turbidez, Compostos Aromáticos e Ferro Total.
- Determinar a concentração de H_2O_2 que permite uma maior eficiência de tratamento;
- Comparar a amostra de água tratada com os padrões de parâmetros da Legislação existente;
- Comparar os parâmetros da amostra de água tratada com algumas especificações requeridas para água de reúso industrial.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 BENEFICIAMENTO DE CARVÃO

Os minerais representam uma importante matéria-prima para diversos processos produtivos. Sua disposição irregular na crosta terrestre e as variações geológicas, climáticas e ambientais à que estão submetidos fazem com que estes materiais apresentem variações de qualidade, exigindo um tratamento prévio para atender os diversos requisitos produtivos. A Norma Reguladora de Mineração nº 18 define o beneficiamento de minérios como um “tratamento visando preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios por métodos físicos ou químicos sem alteração da constituição química dos minerais” (Portaria nº12/2002).

O carvão brasileiro apresenta grandes concentrações de minerais e pirita, que precisam ser retirados para atender aos padrões de qualidade de uso para geração de energia (VIGÂNICO et al, 2011), aumentando o poder calorífico do carvão. O processo de beneficiamento ocorre por separação de fases devido à diferença densimétrica, tendo o rejeito carbonoso como sub-produto (NEIL E NETO, 2008). Segundo Koppe e Costa (2008), os métodos utilizados em Santa Catarina para lavra de carvão envolvem lavras a céu aberto e subterrânea, sendo a última preponderante no cenário atual, devido principalmente aos impactos ambientais causados pelo primeiro método. Isto porque durante o processo de mineração, principalmente a céu aberto, a exposição dos resíduos ao oxigênio presente na água promove uma oxidação destes compostos. Estes resíduos são constituídos pela cobertura estéril, formada pelas camadas de solo retiradas para exploração do carvão, e por uma parcela de carvão sem valor econômico que é rejeitada (SOARES E BORMA, 2002). A Figura 1 mostra a abordagem tradicional do gerenciamento dos resíduos de carvão, e uma proposta de abordagem integrada segundo os princípios da Produção Mais Limpa, elaborado por Filho et al (2013) para a região carbonífera de Santa Catarina.

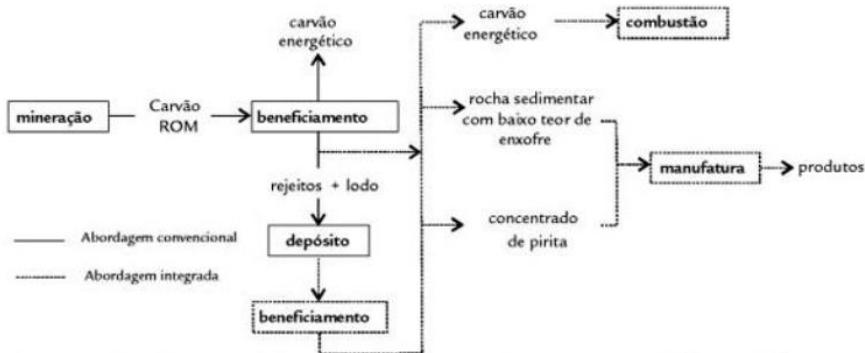
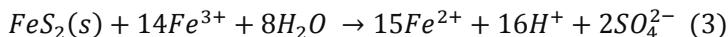
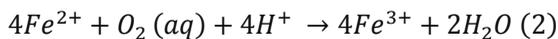
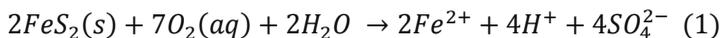


Figura 1: Abordagens tradicional e proposta para o gerenciamento de resíduos de carvão da região carbonífera catarinense (Fonte: Filho et al, 2013).

3.2 DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS (DAM)

Dentre os rejeitos da lavra de carvão, destaca-se a pirita (FeS_2), cuja oxidação ocorre em duas etapas, na primeira formando ácido sulfúrico e sulfato ferroso, e na segunda formando hidróxido de ferro e mais ácido sulfúrico. Este processo oxidativo leva, portanto, à acidificação do meio e à consequente solubilização e mobilização de metais pesados (SOARES et al, 1997). Este fenômeno é conhecido por Drenagem Ácida de Minas (DAM) e produz um percolado rico em minerais dissolvidos e ácido sulfúrico (SOARES E BORMA, 2002). Este percolado, ao atingir corpos d'água, promove a contaminação por metais pesados e aumenta a acidez da água, causando impactos negativos à fauna e flora aquáticas e impedindo o seu uso. A DAM representa, portanto um dos mais graves problemas ambientais gerado pela atividade mineradora. Silveira (2009) apresenta as reações do mecanismo de oxidação da pirita pela via direta (1), com a formação do íon Fe^{3+} (2), que pode novamente oxidar a pirita (3), promovendo a autocatálise:



A DAM é uma importante fonte de contaminação hídrica no sul catarinense. Em 1980, a região sul catarinense foi reconhecida nacionalmente por decreto federal como uma Área Crítica Nacional para Efeito de Controle da Degradação Ambiental, e em 2000 as empresas carboníferas envolvidas foram sentenciadas a uma multa de 96 milhões de reais devido ao passivo ambiental; desde então são realizados projetos de reabilitação ambiental para retirada da multa (NASCIMENTO et al, 2002). Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (2001), são encontradas em Santa Catarina 21% das reservas medidas oficiais brasileiras de carvão (DPNM, 2001), concentradas no sul do estado; em 2009, os investimentos realizados e previstos na mineração de carvão foram de R\$57.733.700 (DPNM, 2010). Filho et al (2013) apontam que, no sul do país, a estimativa é de que existam 300 milhões de toneladas de rejeitos de carvão, sendo esta a principal fonte de geração de DAM. Segundo Campaner e Silva (2009), o método de tratamento mais empregado para a DAM atualmente é a neutralização por reagentes alcalinos, como CaO e CaCO₃, com remoção dos metais na forma de hidróxidos, e com geração de lodo.

3.3 RIO SANGÃO E LAGOA LÍNGUA DO DRAGÃO

Localizado no sul de Santa Catarina, o Rio Sangão tem como afluentes os rios Maina, Criciúma e Cedro, e é afluente do rio Mãe Luzia, fazendo parte da bacia hidrográfica do rio Araranguá (Figura 2).

A bacia do rio Araranguá drena uma área de aproximadamente 4.000km² ao longo de 16 municípios no sul catarinense: Criciúma, Siderópolis, Treviso, Cocal do Sul, Içara, Nova Veneza, Forquilha, Maracajá, Araranguá, Arroio do Silva, Meleiro, Turvo, Ermo, Jacinto Machado, Morro Grande e Timbé do Sul (DANTAS et al, 2005). O rio Sangão, em particular, se encontra em situação crítica por receber efluentes do beneficiamento do carvão, de outras atividades industriais e também esgoto doméstico (KREBS E ALEXANDRE, 2000), além de ter o leito assoreado. Apresenta elevadas concentrações de metais pesados e de compostos de ferro e enxofre, e pH ácido, características da água contaminada pela DAM. O Sangão é um rio de quinta ordem, apresenta meandros com alta sinuosidade (DANTAS et al, 2005) e é considerado um rio de Classe II de acordo com o enquadramento proposto pela Resolução CONAMA 357. Ou pelo CNRH, dá uma olhada. A Tabela 3 apresenta a composição da DAM nas minas da Bacia do Rio Araranguá de acordo com dados de 2005.

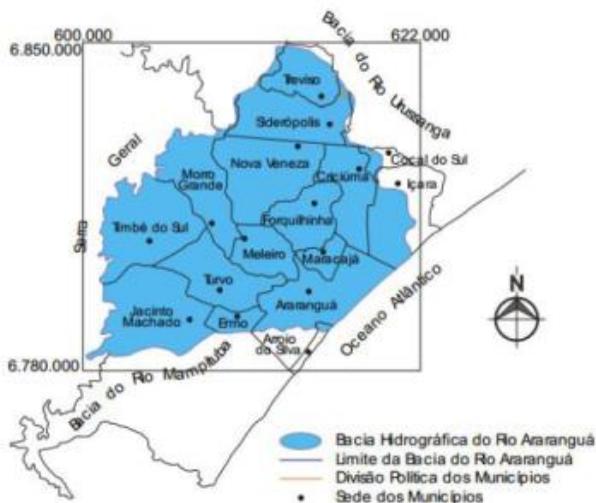


Figura 2: Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá (Fonte: KREBS e ALEXANDRE, 2000)

Tabela 1: Composição da DAM nas minas da Bacia do Rio Araranguá

Parâmetro	Padrão
pH	3,17
Fe	29,48 mg/L
Al	18,63 mg/L
Mn	2,63 mg/L
Zn	2,15 mg/L
Cu	0,001 mg/L
Sulfatos	1460 mg/L

Fonte: Bandeira, 2010 (Adaptado de Gomes, 2005)

A lagoa Língua do Dragão está localizada em Siderópolis, SC, e trata-se de uma lagoa artificial que recebe a drenagem superficial e sub-superficial de antigas minas a céu aberto (PAVEI, 2007). As suas águas apresentam coloração amarelada devido à grande presença de íons Fe^{3+} . Estudos realizados anteriormente mostram que a Lagoa apresenta profundidade média de 13m, e concentrações médias de 7.000mg/L para

sólidos dissolvidos, potencial redox de 434,3mV e pH de 2,8 na superfície (GEOLÓGICA, 2008). A Lagoa apresenta contaminação por velhas minas de carvão desativadas, algumas delas subterrâneas.

3.4 A INDÚSTRIA TÊXTIL

A indústria têxtil representa um setor de importância na economia catarinense e nacional. A produção têxtil em Santa Catarina representa quase 19% da produção industrial no estado, representando 21% do setor têxtil nacional e empregando mais de 170 mil trabalhadores (SINDIVEST, 2012). Destacam-se a nível estadual as regiões do Vale do Itajaí, Norte e Sul catarinense, sendo Blumenau o maior pólo têxtil (FIESC, 2006), cidade na qual o setor vem se desenvolvendo desde 1880 (LIMA E SANSON, 2008). Santa Catarina concentra 51 das 210 maiores empresas da indústria têxtil no Brasil, e 8 das 10 maiores do sul do país. (FIESC, 2006).

A produção têxtil apresenta desafios à gestão ambiental, especialmente no que concerne à grande geração de efluentes, que apresentam cor elevada devido ao processo de tingimento e compostos tóxicos ao homem e ao meio ambiente (NAGEL-HASSEMER, 2012). Segundo Baêta (2012), “estes efluentes caracterizam-se por possuir uma variação de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO), e por elevada presença de cor e sólidos totais, sendo que a grande maioria dos sólidos refere-se aos sólidos dissolvidos”. A complexidade do efluente têxtil é em grande parte devida à alta variedade de corantes e pigmentos usados no processo de tingimento que, segundo Kunz et al (2002), chegam a 10.000 diferentes compostos, representando um consumo anual de 26.500 toneladas no Brasil. Outro fator importante é a geração de diferentes tipos de efluente para cada etapa do processo produtivo, sendo a lavagem e alvejamento das fibras, o tingimento e o acabamento, gerando efluentes com grande variabilidade (NAGEL-HASSEMER, 2012).

Diversos métodos têm sido usados no tratamento de efluentes têxteis, tais como a floculação físico-química com auxílio de polímeros, carvão ativado e ozonização; entretanto, as moléculas de corantes apresentam tamanho significativamente inferior às demais moléculas inorgânicas, dificultando sua remoção. Outra dificuldade se apresenta no fato de a maioria dos corantes ser totalmente solúvel em meio aquoso, sendo de difícil remoção por métodos biológicos (BUTHELEZI, 2012). Os tratamentos físico-químicos e biológicos convencionais também apresentam o inconveniente a grande geração de lodo e os consequentes

problemas com seu tratamento e disposição (NAGEL-HASSEMER, 2002). O tratamento de efluente têxtil por processos oxidativos avançados Fenton, Foto-Fenton e UV/H₂O₂ tem se mostrado promissor na remoção de cor e carbono orgânico total (NAGEL-HASSEMER, 2006; KANG, 2002; KOS, 2010). Nogueira et al (2007) citam que é comum no tratamento de efluentes têxteis o uso dos processos Fenton/foto-Fenton em combinação com processos físico-químicos, onde inicialmente ocorre a remoção de material particulado e metais para após haver um polimento com o processo oxidativo avançado para promover remoção de cor, COD e odor.

3.5 PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POA)

Segundo Amorim et al (2009), os POA são utilizados principalmente para o tratamento de compostos recalcitrantes de difícil eliminação por métodos convencionais. São considerados tecnologia limpa, pois não há formação de lodo e os contaminantes são mineralizados. Lange et al (2006) definem os POA como processos que envolvem a geração de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), altamente reativos e oxidantes e pouco seletivos, que têm a capacidade de destruição total de muitos poluentes orgânicos. De acordo com Teixeira e Jardim (2004), os POA são reações em que os contaminantes orgânicos são transformados em dióxido de carbono, água e ânions inorgânicos. Melo et al (2009) afirmam que o radical hidroxila tem a capacidade de oxidar uma grande variedade de substâncias devido ao seu alto potencial padrão de redução, de $E^0 = 2,73\text{V}$, muito superior ao dos oxidantes convencionais. Os radicais livres reativos podem ser produzidos utilizando-se agentes oxidantes como o ozônio, o peróxido de hidrogênio e a radiação ultravioleta, ou combinações deles. Outro agente usado é o Reagente de Fenton, constituído por peróxido de hidrogênio e íons ferrosos.

3.6 PROCESSO UV/H₂O₂

A geração de radicais livres hidroxila pode ser realizada por métodos não fotoquímicos (sem absorção de luz ultravioleta) ou fotoquímicos (com absorção de luz UV). Dentre os métodos fotoquímicos, existe a fotólise homogênea (que usa soluções homogêneas de H₂O₂, O₃ ou uma combinação dos dois) e a fotólise heterogênea (que utiliza partículas coloidais de semicondutor) (GONÇALVES, 2004). A radiação ultravioleta representa os comprimentos de onda entre 100 e 400nm, entre a luz visível e os raios

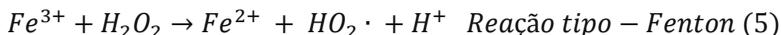
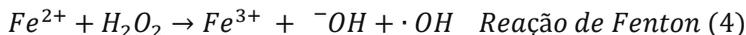
X, sendo classificada em: UV-A (315 a 400nm), UV-B (280 a 315nm) e UV-C (100 a 280nm) (WHO, 2015). Conforme o exposto por Ruas (2008), a radiação UV interage com as moléculas do meio líquido, provocando rupturas nas ligações químicas, sendo para isto necessária a absorção de um fóton pela molécula de acordo com o espectro de absorção de fótons das substâncias. De acordo com Ruas (2008), geralmente obtém-se maior eficiência associando-se os processos de oxidação e radiação. Para Mattos et al (2002), o peróxido de hidrogênio é um dos oxidantes mais versáteis que existe, pois após a catálise com formação de hidroxila sua reatividade fica inferior apenas a do flúor. O uso de H₂O₂ para oxidação de substratos orgânicos apresenta vantagens por ter baixo custo, ser ambientalmente limpo e de fácil manuseio (ISHII et al, 1988).

O processo UV/H₂O₂ consiste na formação de radical hidroxila a partir da quebra de uma ligação sigma de elevada energia da molécula de peróxido de hidrogênio, energia esta fornecida pela radiação UV (MORAIS, 2005). O processo oxidativo ocorre portanto em duas etapas, sendo a primeira de fotólise do H₂O₂ com formação de radicais, e a segunda a oxidação do contaminante pelos radicais. O processo UV/H₂O₂ apresenta maior eficiência em condições de pH ácido, devido à anulação do efeito de capturadores de radicais, como carbonatos e bicarbonatos. (CAVALCANTE et al, 2005 apud BRITO E SILVA, 2012). As lâmpadas disponíveis comercialmente para promover a fotólise do H₂O₂ por radiação UV são as de deutério, de xenônio e de vapor de mercúrio (CAVICCHIOLI E GUTZ, 2003 apud SUBTIL et al, 2009). Segundo Kammerdt (2004), a radiação UV-C é gerada por lâmpadas de mercúrio de baixa ou média pressão, e a maioria das lâmpadas usadas em processos de tratamento de efluentes emite radiação UV com comprimento de onda de 254nm.

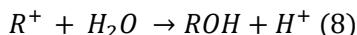
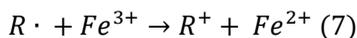
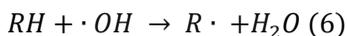
3.7 REAÇÃO DE FENTON

A reação conhecida como reação de Fenton consiste na oxidação de compostos orgânicos pelo íon Fe²⁺ e por peróxido de hidrogênio, e recebe este nome por ter sido descrita pela primeira vez por H.J.H. Fenton em 1894. A reação de Fenton gera radicais hidroxila, que promovem a oxidação de diversos compostos. Quando é utilizado o íon Fe³⁺ ao invés de Fe²⁺ e H₂O₂ em excesso, temos a reação tipo-Fenton, com produção de radicais menos oxidantes como hidroperoxila e o ânion superóxido (HAMMEL et al, 2002 e LIU et al, 2005 apud AGUIAR, 2007). Nogueira et al (2007) apontam que uma concentração

em excesso de H_2O_2 pode prejudicar o processo de degradação, uma vez que neste caso a concentração de Fe^{3+} torna-se superior à de Fe^{2+} , e que o radical hidroperoxila ($HO_2\cdot$) formado apresenta menor potencial de redução que o radical hidroxila. As reações de Fenton e tipo-Fenton estão exemplificadas nas equações 4 e 5 (AGUIAR, 2007):

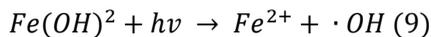


No processo Fenton, os radicais hidroxila gerados atacam substratos orgânicos (RH), causando a sua decomposição química (Lucas e Peres, 2006 apud Martins, 2011), de acordo com as equações 6, 7 e 8:



3.8 REAÇÃO DE FOTO-FENTON

Nogueira et al (2007) descrevem a reação de Foto-Fenton como a oxidação de compostos orgânicos sob irradiação UV na presença de íon férrico em meio ácido, em que o íon Fe^{3+} é reduzido a Fe^{2+} com formação do radical hidroxila, de acordo com a equação 9:



O íon Fe^{2+} reage com o peróxido de hidrogênio, dando sequência a reações catalíticas. Verificou-se que as reações de degradação de compostos orgânicos ocorrem com maior velocidade na faixa de pH entre 2,5 e 3,0, uma vez que acima do pH 3,0 ocorre a precipitação de Fe(III) reduzindo a sua interação com o peróxido de hidrogênio. No tratamento de efluente têxtil, a razão molar ótima do íon Fe^{2+} para o peróxido de hidrogênio varia amplamente conforme o tipo de efluente têxtil, podendo variar de 1:8 até 1:129. Em relação à concentração de Fe^{2+} , assume-se que deva estar entre 3 a 15 mg/L para permitir a reação de Fenton, não sendo recomendado aumentar a concentração de Fe^{2+} acima de 50% em relação à concentração de peróxido de hidrogênio. Já

o melhor pH para remoção de COD está na faixa de 3,5, em condições ácidas (KOS et al, 2010).

3.9 COAGULAÇÃO

Colóides são aglomerados que permanecem em suspensão em meio aquoso, devido ao seu pequeno tamanho. A coagulação consiste na neutralização das forças de repulsão existentes nestes colóides, retirando a sua estabilidade e permitindo a sua sedimentação (Fortino, 2012). Segundo Crittenden et al (2012), a coagulação envolve a adição de um produto químico à água para desestabilizar as partículas, de modo a que elas se agreguem ou formem flocos e precipitados, retirando as partículas da solução ou adsorvendo compostos dissolvidos. Os coagulantes químicos mais comumente utilizados são os sais de alumínio e ferro, por serem eficientes, de baixo custo e fáceis de manipular, acondicionar e aplicar (EPA, 2002). As reações simplificadas 10 e 11 mostram a formação de flocos de hidróxidos metálicos a partir da reação entre a acidez do coagulante e a alcalinidade natural da água, usualmente composta por bicarbonato de cálcio, com os compostos insolúveis (precipitados) em negrito (EPA, 2002):



Embora o objetivo inicial da coagulação seja de remover da água partículas suspensas, também é possível verificar que o processo é útil na remoção de matéria orgânica e de compostos inorgânicos dissolvidos. A seleção do coagulante a ser usado depende de diversos fatores, tais como as características do coagulante, concentração e tipo de material particulado, concentração e características dos NOM, temperatura e qualidade da água. Não é possível prever um coagulante ótimo a partir destes fatores devido à grande variação de reações e mecanismos presentes durante a coagulação, sendo a escolha do coagulante determinada por métodos empíricos, notadamente o ensaio de Jar Test. (CRITTENDEN et al, 2012)

No tratamento de efluente têxtil, estudos já realizados indicam que a concentração de coagulante pode variar entre 500 e 2000mg/L (NAGEL-HASSEMER, 2002).

3.10 TRATAMENTO CONJUGADO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS COM OUTROS EFLUENTES

Os trabalhos realizados na área de tratamento integrado de DAM e outros efluentes concentram-se basicamente em cinco perspectivas: mistura de DAM com outro efluente para tratamento conjugado (usualmente esgoto sanitário ou lixiviado de aterro sanitário), analisando os efeitos de coagulação simples; adição de peróxido de hidrogênio para estudar os efeitos da reação de Fenton, sendo a DAM a fonte de Fe para o processo; uso de DAM concentrada para diminuir o volume necessário de DAM na mistura com outro efluente; produção de coagulante a partir da DAM; combinação de mistura de DAM com outros efluentes em integração com outros métodos de tratamento, notadamente os biológicos. Os estudos realizados mostram que as amostras de DAM coletadas em diferentes locais variam grandemente em concentração de Fe e Al, assim como há diferenças entre os efluentes utilizados para tratamento conjugado. Estas variações justificam o uso de proporções diferentes de DAM e efluente nos diferentes estudos para que a mistura apresente efeito de coagulação. Os resultados mostram-se promissores, suscitando o interesse em pesquisas de estudo do tratamento conjugado da DAM com diferentes tipos de efluentes industriais.

Hughes (2012) analisou o tratamento conjugado entre DAM e esgoto sanitário, ambos sintéticos, em diferentes concentrações de metais e faixas de pH. Foram simulados três processos de tratamento conjugado: adição de DAM bruta a um tanque de lodos ativados; pré-tratamento da DAM por mistura com lodo digerido, sedimentação e posterior adição ao tanque de lodos ativados; e pré-tratamento da DAM por mistura com esgoto sanitário, permitindo a precipitação de uma parcela dos metais antes da adição do sistema de lodos ativados. A autora observou que no tratamento conjugado a remoção de metais esteve associada à precipitação de fosfato. Uma vez que o esgoto tem baixa concentração de metais solubilizados, a alta concentração de sólidos suspensos garante a existência de zonas de adsorção para os metais presentes na DAM, aumentando a sua precipitação. A mistura prévia de DAM com esgoto sanitário mostrou os melhores resultados de tratamento, entretanto, houve consumo de uma quantidade significativa da alcalinidade, podendo ser necessária a adição de álcalis para garantir o bom funcionamento do sistema de lodos ativados.

Fagundes (2009) realizou estudos verificando o potencial do tratamento conjugado de DAM e lixiviado de aterro sanitário por meio de coagulação simples e reação de Fenton, além de realizar o tratamento

do lixiviado a partir de um coagulante férrico produzido a partir da pirita. A DAM utilizada foi proveniente de drenagem de área de mineração de carvão em Criciúma, 30.712 mg/L de ferro total e 3.452 mg/L e alumínio. Nos experimentos de coagulação simples e reação de Fenton, a DAM foi adicionada de modo a atingir a dosagem de 1000mg/L de ferro, e o pH foi ajustado para 3,5. Para a reação de Fenton, o peróxido de hidrogênio foi adicionado na razão de 0,0825 g Fe^{2+} /mL H_2O_2 . Ambas as misturas foram agitadas por 3 horas, o pH foi ajustado a 8,7 e a amostra foi filtrada. A produção de coagulante a partir da pirita foi realizada com a lixiviação da pirita em uma coluna com recirculação de água durante 5 semanas, com posterior evaporação da água, atingindo a concentração de 12g/L de Fe. O coagulante produzido foi adicionado ao lixiviado em dosagem de 1000mg/L de Fe, passando por 2 minutos de agitação rápida, 5 minutos de agitação lenta e decantação. Os resultados mostraram que o coagulante produzido a partir da pirita apresentou eficiência semelhante ao coagulante comercial. O tratamento com reação de Fenton obteve maior eficiência em comparação à coagulação simples, entretanto, o efluente tratado não atendeu aos padrões de descarte.

Menezes et al (2009) utilizaram DAM coletada em Santa Catarina, com pH 2,3 e concentração de Fe de 5,900 mg/L, para produção de coagulante e tratamento de água de rio. A amostra foi filtrada e submetida a um processo de precipitação seletiva e aeração para precipitação do ferro, separado da DAM por centrifugação e lavado, processo repetido três vezes. O precipitado foi então dissolvido em ácido sulfúrico e usado como coagulante no tratamento de uma amostra de água do rio Guaíba (Porto Alegre, Brasil). O tratamento da amostra foi realizado com o coagulante produzido a partir da DAM e com dois coagulantes comerciais, com a mesma concentração molar de 0,4 mM (Fe + Al). O pH foi ajustado a 7,0, a amostra foi submetida a agitação rápida durante 5 minutos, a agitação lenta por 3 minutos e a decantação por 10 minutos. A amostra tratada atendeu aos parâmetros para água potável pra os três coagulantes.

Strosnider et al (2011) realizaram estudos com tratamento conjugado de esgoto sanitário bruto e DAM sintética, com pH 2,6 e 290 mg/L de Fe. A DAM foi adicionada em uma proporção de 1:2 com o esgoto sanitário a um sistema com diferentes reatores, passando por clarificadores (tempo de detenção: 32 horas), colunas com biofilmes para suporte de bactérias sulfato-redutoras e com fundo de cal para alcalinização, e wetlands para remoção dos metais. A escolha da proporção se deu de forma a não provocar uma grande redução do pH,

que poderia prejudicar o tratamento biológico. O sistema teve um tempo de retenção total de 6,6 dias. Os resultados mostraram remoção acima de 90% para os metais Al, Cd e Fe e aumento do pH para 6,79.

Em Potosí, na Bolívia, Strosnider e Nairn (2009) analisaram a eficiência do tratamento conjugado de DAM coletada em três minas diferentes e esgoto sanitário bruto na razão de 1:1, com e sem adição de cal, em incubação durante 72 horas. As amostras de DAM apresentaram pH baixo e concentrações elevadas de Fe. A mistura de DAM e esgoto promoveu a remoção de metais, remoção esta que foi mais completa na presença da cal, além da remoção de compostos raros geralmente não priorizados.

Neto et al (2010) realizaram um experimento de tratamento conjugado Fenton com amostras de DAM e de esgoto sanitário coletadas em Criciúma, no sul catarinense. As misturas foram realizadas nas proporções DAM:esgoto de 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 e 1:5. A reação de Fenton foi realizada com pH 3,5 e adição de 8mL/L de peróxido de hidrogênio, durante uma hora. Não houve adição de ferro para a reação, considerando a DAM como fonte, com uma concentração de 218,9 mg/L de Fe. A mistura na razão 1:1 removeu totalmente a DBO e os microrganismos patogênicos, além de reduzir a concentração de metais para níveis abaixo dos estabelecidos pela legislação.

Gehr, Lu e Finch (1992) realizaram um estudo pioneiro de produção de coagulante férrico a partir da DAM, em um método que utiliza a amina para evitar a co-precipitação de outros metais, já que estes poderiam contaminar a água e impedir o seu reuso. O método consiste em uma mistura de dodecylamina, DAM e cal em pH 3,5 com posterior filtração para retirada de $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Ao precipitado foi adicionado H_2SO_4 para formação do coagulante $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. O coagulante produzido mostrou-se efetivo.

O uso da DAM concentrada como fonte de ferro para a coagulação e a reação de Fenton no tratamento de esgoto sanitário foi estudado por Lopes (2011). A amostra de DAM concentrada foi obtida junto à uma empresa carbonífera a partir de uma unidade experimental de prevenção da DAM, e apresentou concentração de 17.640 mg/L de Fe total e de 1534 m/L de Al. Foram realizados ensaios prévios de tratabilidade para determinação das melhores concentrações de DAM concentrada e de peróxido de hidrogênio. A elevada concentração destes metais permitiu uma mistura com volume de DAM consideravelmente inferior quando em comparação com os estudos anteriores: foram adicionados 15 mL de DAM para 1L de esgoto sanitário. Foi estudado também um sistema de tratamento para o esgoto sanitário consistindo de

tratamento biológico RSB seguido por coagulação simples com a DAM concentrada. Os resultados indicaram que as melhores concentrações para a coagulação simples foram de 264 mg/L de Fe e 24 mg/L de Al, enquanto para a reação de Fenton obteve-se o melhor desempenho com 225 mg/L de Fe^{2+} e 0,25 mL de H_2O_2 . O tratamento biológico RSB integrado aos processos de coagulação simples e reação de Fenton apresentou melhor desempenho do que os tratamentos individuais para redução de matéria orgânica, fósforo, sólidos suspensos e coliformes.

Nunes (2010) realizou um trabalho de avaliação do tratamento combinado de drenagem ácida de minas e esgoto doméstico, utilizando misturas em diferentes proporções de DAM:efluente: 1:1, 1:2, 1:4 e 1:8. A DAM usada foi coletada no leito de um rio do sul de Santa Catarina, e apresentou concentrações de Fe e Al somadas de 250 mg/L. Os resultados mostraram que a proporção ótima foi de 1:2, com ajuste do pH para 7,0. Destacam-se as remoções de 90% de fósforo, de 99,998% de coliformes e de 99% de Fe e Al. Verificou-se que para a proporção ótima de DAM e efluente foi necessário um ajuste do pH para que o mesmo pudesse atender à legislação.

O tratamento combinado de lixiviados de aterro sanitário e de DAM foi objeto de estudo de Konarzewski (2009), que analisou diferentes combinações de DAM e lixiviado para determinação de uma proporção ótima, bem como o efeito de variações de pH entre 5,5 e 7,0. Verificou-se que o tratamento combinado foi eficiente em proporções DAM:chorume superiores a 5:1, com concentração somada de Fe e Al superior a 190 mg/L. O tratamento por coagulação simples permitiu redução de 100% para sólidos suspensos e de 72% para Fe, entretanto não foi suficiente para que o efluente tratado atendesse aos limites e emissão estabelecidos pela legislação. O clarificado foi posteriormente submetido a tratamento biológico subsequente por processo aeróbio e anaeróbio. Foram observadas poucas melhorias após o tratamento anaeróbio, estando de acordo com a observação de baixa biodegradabilidade anaeróbia dos lixiviados. O tratamento aeróbio mostrou melhorias para vários parâmetros, entretanto houve também um grande aumento na quantidade de bactérias em suspensão.

3.11 REÚSO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS TRATADAS

A indústria atualmente enfrenta importantes questões hídricas, com cobranças no mercado externo e condicionantes legais na gestão dos recursos hídricos, particularmente em relação à cobrança pelo uso da água. Com isto, são implementados sistemas de gestão ambiental que

visam gerir a demanda de água e minimizar a geração de efluentes. O reúso da água na indústria permite a redução da poluição hídrica e traz benefícios econômicos (FIRJAN, 2006). No Brasil, a atividade industrial corresponde a cerca de 20% do consumo de água (CIRRA, 2013). Na indústria, a água tem como principais usos, além do uso como matéria prima e do consumo humano, o uso para: fluido auxiliar, geração de energia, fluido de aquecimento e/ou resfriamento, combate a incêndio, entre outros (FIESP, 2004).

A água de reúso pode ser definida como a água residuária que se encontra dentro dos padrões exigidos para sua utilização (CNRH, 2005). O reúso de águas pode ser realizado de quatro maneiras: reúso indireto e não planejado, em que a água é descartada no meio ambiente e reutilizada de maneira não intencional e não controlada; reúso indireto e planejado, em que os efluentes são tratados e descarregados nos corpos d'água para serem usados à jusante; reúso direto e planejado, em que os efluentes tratados não são descarregados no meio ambiente, permanecendo no local para reúso; e reciclagem da água, em que a mesma é reutilizada antes mesmo de sua descarga em um sistema de tratamento. (COSTA E JUNIOR, 2005)

A Resolução nº 54 de 2005 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água. Esta Resolução determina que o reúso de água deve ser informado, quando requerido, ao órgão gestor de recursos hídricos para fins de cadastro, e estabelece que, caso o reúso implique alterações nas condições de outorga vigentes, deve ser solicitada uma retificação da mesma.

A Norma Técnica NBR 13.969/97 da ABNT dedica um item ao reúso local de esgoto doméstico tratado para fins não-potáveis, determinando padrões de qualidade para o efluente de acordo com quatro padrões de reúso: lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, incluindo chafarizes; lavagens de pisos, calçadas e irrigação dos jardins, manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticos; descargas de vasos sanitário; e irrigação de pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos.

Westerhoff (1984 apud LEITE, 2003) define duas grandes categorias de reúso: potável e não potável. O reúso potável pode ser direto, em que o esgoto tratado é reutilizado no sistema de água potável, ou indireto, em que o esgoto tratado é disposto em corpo d'água para posteriormente ser captado para uso como água potável. Já o reúso não potável compreende o reúso para fins agrícolas, industriais, recreacionais e domésticos. Leite (2003) complementa a divisão de

Westerhoff com o reuso não potável para os seguintes fins: manutenção de vazões, aquicultura e recarga de aquíferos subterrâneos.

Segundo o CIRRA (2013), o reuso de água na indústria pode ser aplicado no uso de água para caldeiras, nos sistemas de resfriamento como água de reposição, em lavadores de gases e como água de processos. De acordo com a FIESP (2004), na indústria têxtil, 57% da água consumida é utilizada para resfriamento sem contato, 37% para processos e atividades afins e 6% para usos sanitários e outros usos. A Tabela 2 apresenta requisitos de qualidade para o uso de água nos processos produtivos da indústria têxtil.

Tabela 2: Requisitos de qualidade de água para a Indústria Têxtil

Processo	Cor	Dureza	Ferro	Manganês	pH	SDT*	SS**
Unidade	UH	CaCO₃	mg/L	mg/L		mg/L	mg/L
Engomagem	5	25	0,3	0,05	6,5 – 10,0	100	5,0
Lavagem	5	25	0,1	0,01	3,0 – 10,5	100	5,0
Branqueamento	5	25	0,1	0,01	2,0 – 10,5	100	5,0
Tingimento	5	25	0,1	0,01	3,5 – 10,0	100	5,0

*SDT: Sólidos Dissolvidos Totais

**SS: Sólidos Suspensos

Fonte: Adaptado de FIESP, 2004

4. METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, no Laboratório de Reúso das Águas – LARA. Ele insere-se no contexto de pesquisas anteriores já realizadas pelo Laboratório com o tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos avançados (VENDRUSCOLO, 2014; ROSA, 2014; BOTELHO, 2014; NAGEL-HASSEMER, 2012).

4.1 COLETA DAS AMOSTRAS

A coleta de amostras e os experimentos foram realizados no período de março a julho de 2015. Foram utilizadas duas amostras de DAM coletadas em dois corpos d'água no sul de Santa Catarina, em Criciúma e em Siderópolis, e uma amostra de efluente têxtil bruto coletado em uma indústria têxtil em Brusque. As amostras foram coletadas em garrafas PET e trazidas para Florianópolis para realização dos ensaios e análises. Elas foram mantidas congeladas até o momento de realização dos ensaios, quando foram descongeladas por processo de banho-maria. Ressalta-se que o objetivo do trabalho não é o de fornecer uma caracterização completa dos corpos d'água ou do efluente industrial coletado, mas sim o de realizar experimentos iniciais exploratórios para se verificar as possibilidades de tratamento conjugado de efluente têxtil com DAM.

4.1.1 Coleta das amostras de DAM

As amostras de drenagem ácida de minas foram coletadas no sul de Santa Catarina em pontos de notável contaminação pela DAM. Foram coletadas amostras em dois corpos d'água. O primeiro ponto de coleta, chamado de DAM-1, foi na Lagoa Garganta do Dragão, em Siderópolis, um local com histórico de contaminação por minas abandonadas, em que também é possível notar forte coloração alaranjada da água. Neste ponto, a profundidade menor do corpo d'água permitiu a coleta da amostra diretamente na garrafa PET. O segundo ponto de coleta, chamado de DAM-2, foi no Rio Sangão, em Criciúma, em um trecho com cor alaranjada indicando forte presença de ferro dissolvido, bem como próximo a uma fonte de contaminação por esgoto doméstico. Neste ponto, a coleta foi feita com uso de uma corda amarrada a um balde, o qual foi arremessado para permitir a coleta de

amostra não tão próxima à margem do rio. A amostra foi então transferida do balde para a garrafa PET. Em ambos os pontos de coleta houve o cuidado de não se coletar próximo ao leito, a fim de não permitir a entrada de sedimentos, bem como de se encher as garrafas totalmente, de modo a evitar a entrada de ar e de retardar a oxidação da amostra. Os pontos de coleta são mostrados nas Figuras 03 e 04.

Figura 03: Local de coleta da amostra de água do Rio Sangão (DAM-2), em Criciúma/SC



Figura 04: Ponto de coleta da amostra na Lagoa Língua do Dragão (DAM-1), em Siderópolis/SC



4.1.2 Coleta da amostra de efluente têxtil bruto

A amostra de efluente têxtil bruto foi coletada junto a uma indústria têxtil de Brusque, Santa Catarina. Este efluente é levado para tratamento em uma estação de tratamento de efluentes, juntamente com outros efluentes industriais e, em menor proporção, com esgoto proveniente das próprias instalações sanitárias das indústrias. Na estação, este efluente é tratado por processos físico-químicos (desarenamento, coagulação, floculação, decantação, neutralização) e por tratamento biológico por lodos ativados. Estes processos objetivam a redução da carga orgânica, a retirada de contaminantes, incluindo metais pesados, por precipitação, e o ajuste de pH do efluente, de modo a permitir o seu lançamento no corpo receptor de acordo com os padrões estabelecidos pela Legislação. Da mesma forma que as amostras de DAM, a amostra de efluente têxtil foi coletada em garrafa PET e congelada até o momento dos ensaios. A Figura 05 mostra a comparação entre a amostra de água coletada no Rio Sangão e a amostra de efluente têxtil bruto.



Figura 05 – Amostra de água do Rio Sangão (à esquerda) e amostra de efluente têxtil bruto (à direita)

4.2 TRATAMENTO CONJUGADO – TRABALHO EXPERIMENTAL

Para este trabalho, propôs-se um tratamento conjugado em duas etapas. Na primeira etapa, foram realizadas misturas em diversas proporções de DAM e efluente têxtil bruto para verificar se havia efeito de coagulação. Com estes ensaios foi possível determinar o menor

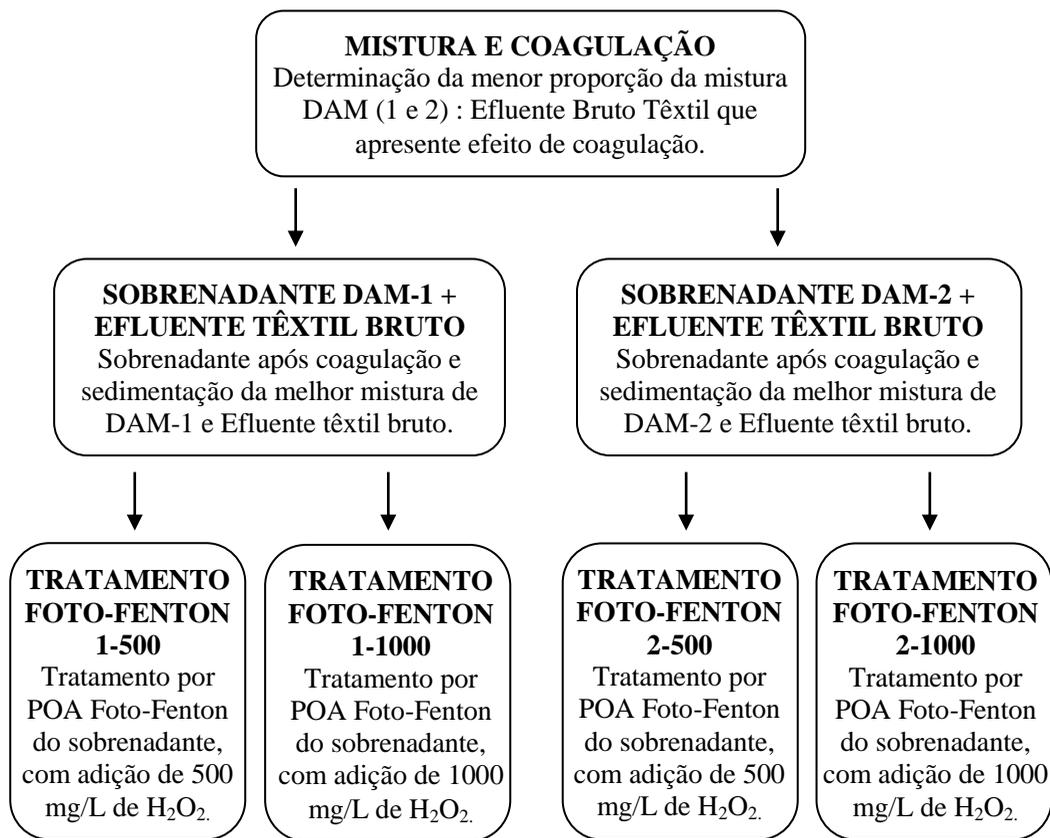
volume possível de DAM que apresentou efeito de coagulação. Esta informação é importante, pois quanto menor o volume de DAM necessário para coagular os poluentes, menor a carga hidráulica no sistema de tratamento conjugado, fator essencial para verificar futuramente a viabilidade da execução deste tipo de sistema. Este processo foi realizado para as duas amostras de drenagem ácida de minas: DAM-1 e DAM-2.

Uma vez determinada a menor proporção, o sobrenadante do efluente coagulado seguiu para Processo Oxidativo Avançado, sendo adicionadas a cada uma das duas misturas as concentrações de 500 e 1000 mg/L de peróxido de hidrogênio, com o objetivo de verificar a concentração que permite um efluente tratado de melhor qualidade. O POA utilizado foi o Foto-Fenton, em reação sob lâmpada UV e com adição de H_2O_2 , mas sem adição de ferro. A não adição de ferro, composto essencial para a reação de Fenton e de Foto-Fenton, é justificada pela presença de ferro nas misturas devido à presença da DAM. O objetivo é de verificar se o tratamento se mostra efetivo apenas com essas concentrações de ferro dissolvido presentes na mistura, sem adições sobressalentes. Para efeito de comparação, a amostra de efluente têxtil bruto foi submetida ao mesmo processo, com as mesmas concentrações de H_2O_2 , mas sem mistura com a DAM e sem adição de ferro. Este ensaio permitiu verificar se houve ou não diferença significativa no POA devido à mistura com a DAM, considerando o efeito de coagulação e a reação de Foto-Fenton devido à presença de ferro. A Figura 06 mostra uma representação esquemática do sistema de tratamento conjugado.

4.2.1 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO

Os ensaios de coagulação foram realizados com diferentes proporções de DAM e efluente têxtil bruto, a fim de determinar a mistura com menor volume possível de DAM que apresente efeito de coagulação. As misturas, com volume de 1L cada, foram submetidas à agitação rápida com agitador magnético por 50 minutos para coagulação, e à agitação lenta por 10 minutos para formação dos flocos, seguido de uma hora de decantação em cone Imhoff. Os tempos de reação foram adotados a partir dos dados da literatura (FAGUNDES, 2009; LOPES, 2011). Iniciou-se com uma mistura de proporção de 500 mL de DAM para 500 mL de efluente têxtil, sendo aumentada a proporção de DAM até encontrar a proporção mínima com efeito de coagulação.

Figura 06: Representação esquemática do sistema de tratamento conjugado



Ao misturar diferentes volumes de DAM ao efluente têxtil bruto é notável que o tratamento da amostra se dá por duas vias: pela coagulação dos poluentes devido à capacidade coagulante da DAM, e pelo efeito de diluição. Esta diluição ocorre pelo simples fato de se misturar um efluente mais contaminado (em termos de cor e sólidos suspensos) em um efluente menos contaminado, em proporções significativas de volume. A diluição não representa, entretanto, uma verdadeira remoção dos poluentes, sendo apenas uma diminuição artificial das concentrações dos solutos devido a um aumento do volume da solução, o que poderia ser obtido misturando-se o efluente a ser

tratado em qualquer volume de água menos poluída. A efetiva remoção dos poluentes se dá, portanto, pela coagulação, que permite a desestabilização e precipitação destes compostos, gerando um sobrenadante de melhor qualidade. Para desconsiderar o efeito de diluição e determinar a eficiência apenas do processo de coagulação, é preciso levar em conta que a velocidade da reação de coagulação dificulta a medição dos parâmetros imediatamente após a mistura das amostras. Para tanto, é realizado um cálculo teórico das concentrações imediatamente após a mistura considerando-se apenas as concentrações e volumes iniciais de cada amostra. Strosnider et al (2012) observam que, considerando a rápida reatividade da DAM, a composição da mistura teórica inicial (theoretical influent mix – Theomix) é calculada usando a razão de DAM em relação ao outro efluente. Nunes (2010) afirma que este método permite certificar-se de que os resultados obtidos no tratamento ocorreram por efeito de coagulação, e não apenas de diluição, através do cálculo de valores referentes à media ponderada. Konarzewski (2009) apresenta outro método de consideração do efeito de diluição, através do cálculo de uma carga removida de poluentes. O presente trabalho apresenta o cálculo da eficiência convencionalmente, a partir das concentrações de contaminantes presentes no efluente têxtil bruto a ser tratado, conforme o utilizado em alguns trabalhos da Literatura (KONARZEWSKI, 2009).

4.2.2 ENSAIOS DE TRATAMENTO FOTO-FENTON

O tratamento por POA Foto-Fenton foi realizado com lâmpada UV como fonte de radiação e com adição de peróxido de hidrogênio para formação dos radicais hidroxila. Não foi adicionado ferro, uma vez que deseja-se utilizar apenas o ferro que já se encontra na amostra devido à mistura com a DAM. Sendo assim, o procedimento operacional é o mesmo do usado para o POA UV/H₂O₂, sendo entretanto a amostra de efluente têxtil bruto submetida a uma mistura com amostra de DAM que apresenta elevadas concentrações de ferro dissolvido, caracterizando-se portanto um processo foto-Fenton.

O tratamento por POA foi realizado com um reator em batelada de bancada com volume de 1L. O reator foi mantido sob constante agitação magnética, para garantir a homogeneização da amostra. O reator tem dupla camada de vidro para permitir o resfriamento do líquido, impedindo o superaquecimento da lâmpada.

A fonte de radiação UV utilizada foi uma lâmpada de vapor de mercúrio com potência de 125W, acoplada a um tubo de quartzo para

permitir a uniformidade da radiação. A emissão de radiação UV ocorreu na faixa de 290 a 390nm. Este reator foi o mesmo utilizado anteriormente em demais trabalhos de tratamento por POA UV/H₂O₂ pelo LARA (NAGEL-HASSEMER, 2006; VENDRUSCOLO, 2014; ROSA, 2014; BOTELHO, 2014; SANTOS, 2014). A Figura 07 mostra um esquema com os principais componentes do reator.

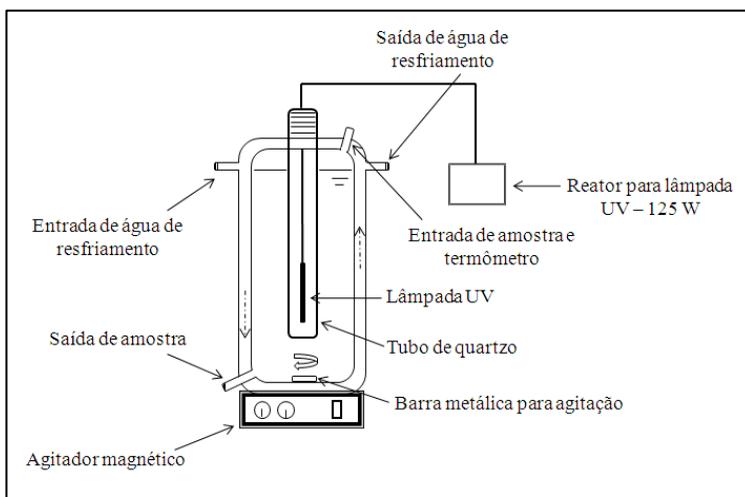


Figura 07: Esquema do reator UV/H₂O₂
Fonte: NAGEL-HASSEMER, 2006

Os experimentos POA foram realizados com as concentrações de peróxido de hidrogênio de 500 e 1000mg/L, a partir de uma solução de H₂O₂ a 36% em massa. O procedimento experimental se iniciou com a homogeneização de cada amostra a ser tratada com as respectivas concentrações de peróxido de hidrogênio, conforme o esquema já apresentado anteriormente (Figura 06). O tratamento ocorreu com um período de reação de uma hora, em batelada, após cinco minutos iniciais para estabilização da radiação. Durante o tratamento, foram retiradas para análise 5 amostras em diferentes intervalos para constatar-se a evolução do tratamento ao longo do tempo: em 5, 10, 15, 30 e 60 minutos após o início do tratamento, conforme os procedimentos realizados em trabalhos anteriores (VENDRUSCOLO, 2014). Imediatamente após cada coleta foram determinados os parâmetros pH (pHmetro modelo ORION 3 STAR), cor (Espectrofotômetro DR 2010

da HACH) e turbidez (Turbidímetro modelo 21COP da HACH) para cada uma das amostras. Após o final do tratamento foi realizada a determinação de carbono orgânico dissolvido pelo equipamento TOC-L (após filtração da amostra), ferro total (Espectrofotômetro DR 2010 da HACH) e sulfato total (DIONEX), e compostos aromáticos (Espectrofotômetro, modelo DR 5000 da HACH, com leitura de absorvância no comprimento de onda de 254 nm).

4.2.3 ENSAIOS DE TRATAMENTO UV/H₂O₂

O efluente bruto têxtil (sem mistura) foi submetido ao tratamento por UV/H₂O₂ com a adição das mesmas concentrações de H₂O₂ adicionadas ao processo Foto-Fenton, de 500 mg/L e 1000 mg/L, utilizando o mesmo reator. O procedimento experimental foi o mesmo, sendo realizadas as mesmas análises com retirada de amostras para análise nos mesmos intervalos que os definidos para o Processo Foto-Fenton. Desta forma, é possível comparar os resultados do tratamento do efluente têxtil bruto com o tratamento da mistura com a DAM, após coagulação e reação de Foto-Fenton.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE DAM E DE EFLUENTE TÊXTIL BRUTO

A caracterização das amostras de DAM e do efluente têxtil bruto é apresentada na Tabela 03.

Tabela 03: Caracterização físico-química das amostras de DAM-1 (Lagoa Língua do Dragão), DAM-2 (Rio Sangão) e de Efluente têxtil bruto.

Parâmetro	DAM-1	DAM-2	Efluente têxtil bruto
pH	2,87	2,64	7,78
Cor (un. de PtCo)	378	195	4750
Turbidez (NTU)	282	477	69,5
COD (mg/L)	128,62	88,64	298,56
Ferro total (mg/L)	470,00	115,00	NM ¹
Comp. Aromáticos (UV 254nm)	3,699	3,294	6,111
Sulfato (mg/L)	850,4	2265,55	231,92
Sól. Totais (mg/L)	60,5	171,6	6525,7
Sól. Suspensos (mg/L)	63,3	35,3	98,3
Sól. Dissolvidos (mg/L)	25,2	108,3	6429,4

NM¹: Não medido

A caracterização mostra que as amostras dos corpos d'água são típicas de DAM, com concentrações elevadas de ferro total e sulfato e pH baixo. Da mesma forma o efluente têxtil bruto apresenta cor bastante acentuada com pH acima de 7,00 e alta concentração de sólidos dissolvidos.

5.2 EXPERIMENTO DE COAGULAÇÃO/SEDIMENTAÇÃO

O efeito de coagulação com menor volume possível de DAM foi verificado para a mistura de 650 mL de DAM para 350 mL de efluente bruto têxtil, tanto para a DAM-1 quanto para a DAM-2. Estes volumes são coerentes com valores encontrados na literatura no tratamento conjugado de DAM com esgoto doméstico e lixiviados de aterro sanitário (NUNES, 2010; KONARZEWSKI, 2009). Apesar de as duas amostras apresentarem concentrações diferentes de ferro total, ambas começaram a apresentar efeito de coagulação a partir da mesma proporção de volume. Para esta proporção verificou-se efeito de

coagulação com remoção de sólidos, obtendo-se um sobrenadante de coloração avermelhada, indicando a presença do corante têxtil recalcitrante, como mostra a Figura 08. As Tabelas 04 e 05 mostram as características dos sobrenadantes tratados após a coagulação e sedimentação.

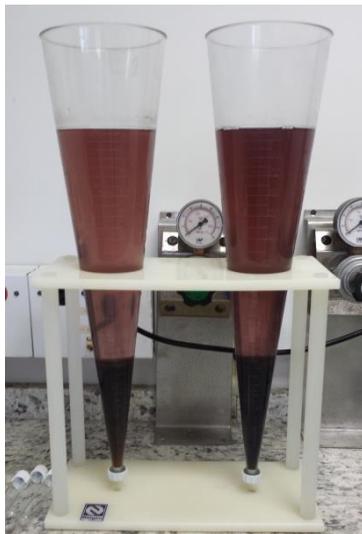


Figura 08: Sobrenadante das misturas de DAM-1 (à esquerda) e DAM-2 (à direita) com efluente bruto têxtil, após reação de coagulação e sedimentação por 1 hora.

Tabela 04: Caracterização da mistura de DAM-1 e efluente têxtil bruto após reação de coagulação e sedimentação

Parâmetro	Efluente têxtil bruto	Sobrenadante 1
pH	7,78	4,33
Cor (un. de PtCo)	4750	600
Turbidez (NTU)	69,5	22,9
COD (mg/L)	298,56	329,44
Comp. Aromáticos (UV 254nm)	6,111	1,490
Sulfato (mg/L)	231,92	1569,4
Sól. Totais (mg/L)	6525,7	4175,4
Sól. Suspensos (mg/L)	98,3	75,6
Sól. Dissolvidos (mg/L)	6429,4	4099,8
Sól. Sedimentáveis (mL/L)	NM ¹	72,6

NM¹: Não medido

Tabela 05: Caracterização da mistura de DAM-2 e efluente têxtil bruto após reação de coagulação e sedimentação

Parâmetro	Efluente têxtil bruto	Sobrenadante 2
pH	7,78	5,82
Cor (un. de PtCo)	4750	770
Turbidez (NTU)	69,5	27,6
COD (mg/L)	298,56	340,48
Comp. Aromáticos (UV 254nm)	6,111	1,220
Sulfato (mg/L)	231,92	775,81
Sól. Totais (mg/L)	6525,7	4614,4
Sól. Suspensos (mg/L)	98,3	91,3
Sól. Dissolvidos (mg/L)	6429,4	4523,1
Sól. Sedimentáveis (mL/L)	NM ¹	69,5

NM¹: Não medido

Os resultados mostram que, embora apresentem concentrações diferentes de ferro total, as duas amostras de DAM tiveram efeito coagulante semelhante, com concentrações próximas de sólidos sedimentáveis. O sobrenadante da mistura com a DAM-1 apresentou pH inferior ao da mistura com DAM-2; ambas as misturas resultaram em um sobrenadante com pH ácido. Destacam-se a remoção de cor, com eficiências de 87% (mistura DAM-1) e 84% (mistura DAM-2), de turbidez, com eficiências de 67% (mistura DAM-1) e 60% (mistura DAM-2), e de compostos aromáticos, com eficiências de remoção de 76% (mistura DAM-1) e 80% (mistura DAM-2), todas as eficiências calculadas em relação às concentrações do efluente têxtil bruto. Entretanto, observou-se um aumento nas concentrações de COD, que pode ser explicado por uma possível solubilização do carbono orgânico presente no efluente bruto têxtil devido ao pH ácido das amostras de DAM, uma vez que uma parte da matéria orgânica apresenta solubilidade tanto em meio ácido quanto em meio alcalino (CANELLAS et al, 2001).

5.3 TRATAMENTO POR PROCESSO FOTO-FENTON

As Tabelas 06 e 07 mostram os resultados após 60 minutos de pós-tratamento Foto-Fenton, com concentrações de peróxido de hidrogênio de 500 e 1000 mg/L, para as amostras tratadas com DAM-1 e DAM-2, respectivamente. Durante o processo, observou-se a formação de precipitado alaranjado no reator com elevação da turbidez e a

diminuição do pH, indicando a reação do peróxido de hidrogênio com o ferro solúvel existente na água, formando Fe^{3+} e precipitados metálicos.

Tabela 06: Caracterização do Sobrenadante da mistura com DAM-1 por Processo Foto-Fenton, com concentrações de peróxido de hidrogênio de 500 e 1000 mg/L, após período total de 60 min de radiação

Parâmetro	Sobrenadante 1	Foto-Fenton	Foto-Fenton
		$\text{H}_2\text{O}_2 = 500$ mg/L	$\text{H}_2\text{O}_2 = 1000$ mg/L
pH	4,33	3,54	2,25
Cor (un. de PtCo)	600	31	168
Turbidez (NTU)	22,9	10,0	2,99
COD (mg/L)	329,44	25,76	25,63
Ferro total (mg/L)	NM ¹	44,52	36,33
Comp. Aromáticos (UV 254nm)	329,44	0,575	1,810
Sulfato (mg/L)	1569,4	1272,83	1822,9
Sól. Totais (mg/L)	4175,4	79,9	78,3
Sól. Suspensos (mg/L)	75,6	51,3	47,3
Sól. Dissolvidos (mg/L)	4099,8	28,6	33,8
Sól. Sedimentáveis (mL/L)	72,6	NM ¹	NM ¹

NM¹: Não medido

Tabela 07: Caracterização do Sobrenadante da mistura com DAM-2 por Processo Foto-Fenton, com concentrações de peróxido de hidrogênio de 500 e 1000 mg/L, após período total de 60 min de radiação

Parâmetro	Sobrenadante 2	Foto-Fenton	Foto-Fenton
		$\text{H}_2\text{O}_2 = 500$ mg/L	$\text{H}_2\text{O}_2 = 1000$ mg/L
pH	5,82	5,75	5,80
Cor (un. de PtCo)	770	69	62
Turbidez (NTU)	27,6	11,0	4,11
COD (mg/L)	340,48	28,93	27,84
Ferro total (mg/L)	NM ¹	0,63	1,68
Comp. Aromáticos (UV 254nm)	1,220	0,380	0,324
Sulfato (mg/L)	775,81	708,95	273,81
Sól. Totais (mg/L)	4614,4	75,1	75,8
Sól. Suspensos (mg/L)	91,3	41,3	16,3
Sól. Dissolvidos (mg/L)	4523,1	33,8	59,5
Sól. Sedimentáveis (mL/L)	69,5	NM ¹	NM ¹

NM¹: Não medido

Na mistura com DAM-1 houve redução do pH para um valor abaixo de 3,00 para a concentração de H_2O_2 de 1000 mg/L, enquanto na

mistura com DAM-2 observou-se um efeito tamponante não havendo grande variação de pH em relação ao sobrenadante. Houve remoção de cor em relação ao sobrenadante do processo de coagulação. A Figura 09 mostra as amostras retiradas ao longo do tratamento Foto-Fenton.

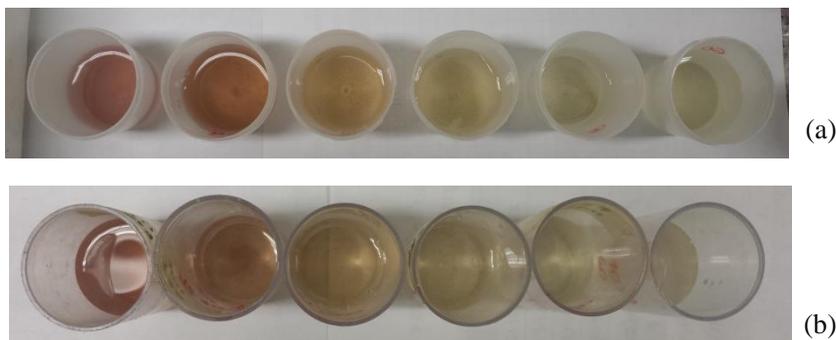


Figura 09: Amostras retiradas do reator 0, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos (da esquerda para direita) após o início da reação de Foto-Fenton, com concentrações de 500 mg/L (a) e 1000 mg/L (b) de H_2O_2 .

Os resultados mostram que o pH permaneceu estável após o tratamento Foto-Fenton para as duas concentrações de H_2O_2 , mantendo-se próximo a 6,0. A concentração de Ferro manteve-se alta, indicando que o volume de H_2O_2 adicionado não foi suficiente para precipitar todo o ferro.

As Figuras 10 a 13 mostram a variação da concentração dos parâmetros durante os processos Foto-Fenton a 500 e 100 mg/L de H_2O_2 , para os intervalos de 0, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos após o início do tratamento. É possível observar que a cor e os compostos aromáticos apresentam redução significativa já nos primeiros 10 minutos, enquanto a turbidez começa a se estabilizar após 30 minutos.

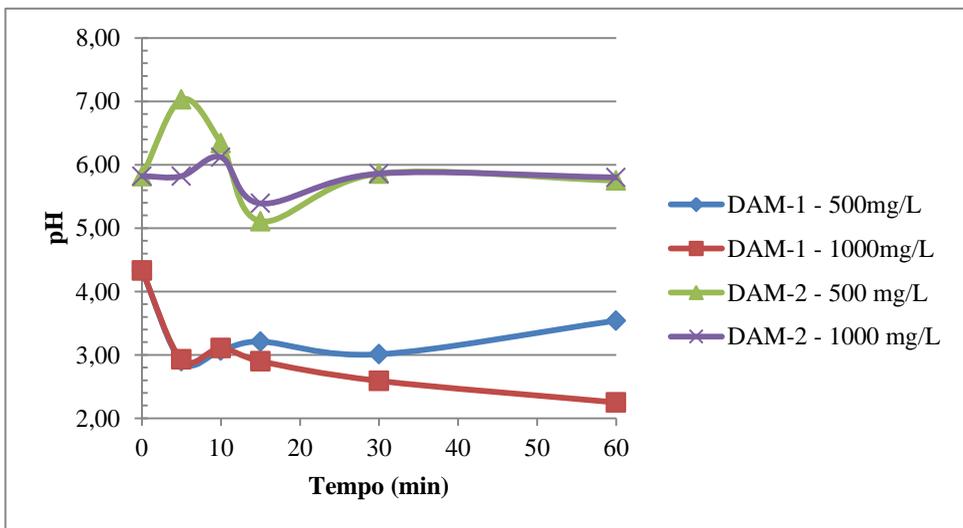


Figura 10: Variação do pH ao longo do tratamento Foto-Fenton

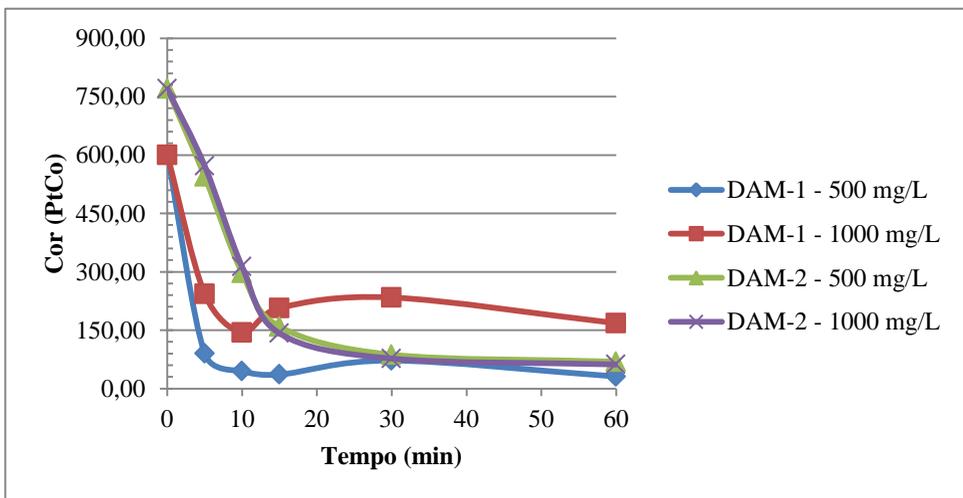


Figura 11: Variação da Cor ao longo do tratamento Foto-Fenton

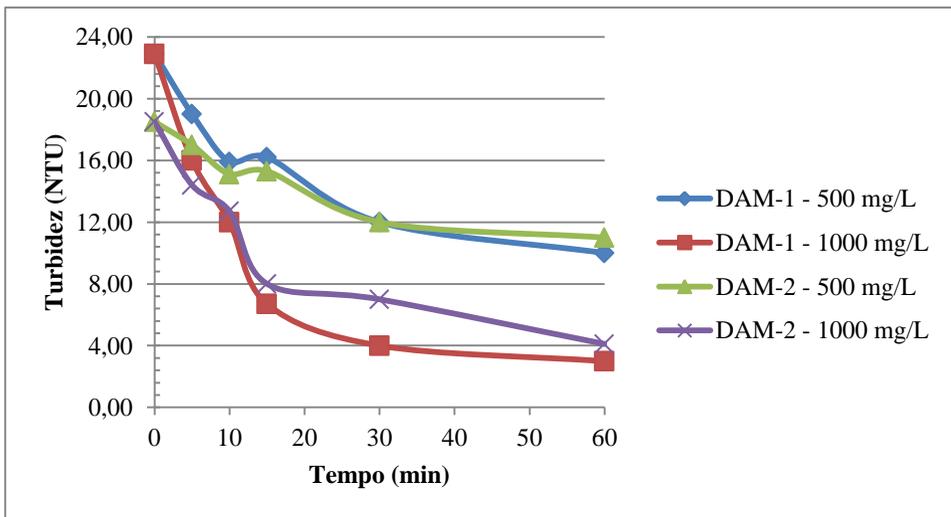


Figura 12: Variação da Turbidez ao longo do tratamento Foto-Fenton

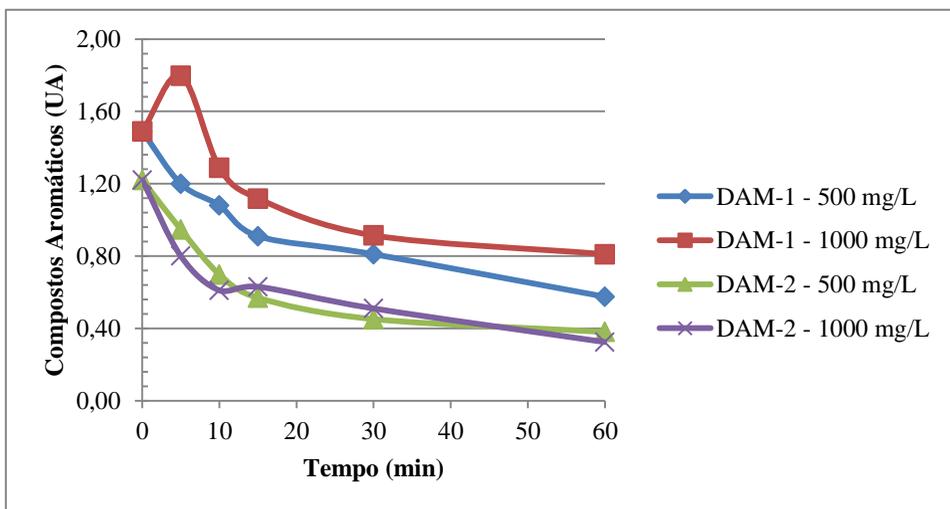


Figura 13: Variação da concentração de compostos aromáticos ao longo do tratamento Foto-Fenton

A Tabela 08 apresenta a concentração teórica de mistura e as concentrações presentes no efluente têxtil bruto para os parâmetros de análise. A Tabela 09 apresenta a eficiência de remoção para os principais parâmetros, considerando o sistema completo de mistura e reação de coagulação/sedimentação e reação Foto-Fenton para as amostras tratadas de mistura DAM-1 $H_2O_2 = 500$ mg/L e DAM-2 $H_2O_2 = 1000$ mg/L. Estas amostras foram escolhidas para permitir uma simplificação na apresentação dos resultados, e por terem apresentado as menores concentrações de Cor. A Tabela 09 apresenta as eficiências de acordo com a concentração teórica de mistura para cada DAM e de acordo com as concentrações encontradas no efluente têxtil bruto, conforme o exposto na Metodologia. As maiores eficiências de remoção para cada parâmetro encontram-se destacadas em negrito.

Tabela 08: Concentração teórica de mistura e concentrações presentes no Efluente têxtil bruto para os parâmetros de interesse

Parâmetro	Concentração teórica de mistura DAM-1	Concentração teórica de mistura DAM-2	Efluente têxtil bruto
Cor (un. de PtCo)	1908	1789	4750
Turbidez (NTU)	207,63	334,4	69,5
COD (mg/L)	188,10	162,11	298,56
Comp. Aromáticos (UV 254nm)	4,543	4,280	6,111
Sulfato (mg/L)	633,93	1553,78	231,92
Sól. Totais (mg/L)	2323,3	2395,5	6525,7
Sól. Suspensos (mg/L)	75,6	57,4	98,3
Sól. Dissolvidos (mg/L)	2266,7	2320,7	6429,4

Os valores negativos encontrados na Tabela 09 indicam que houve formação de sulfato. Isto ocorre porque, devido à presença de enxofre na pirita, as águas com DAM usualmente apresentam elevadas concentrações de sulfeto, e uma vez expostas a um processo oxidativo, levam à formação de sulfatos (EPA, 2003). Observa-se que, para a maioria dos parâmetros, não houve diferença significativa entre o cálculo da eficiência em relação à concentração teórica de mistura e em relação ao efluente têxtil bruto. Isto pode ter ocorrido devido às concentrações iniciais serem muito altas; um cálculo a partir de concentrações iniciais menores poderia levar à divergências mais significativas.

Tabela 09: Eficiências em relação à concentração teórica de mistura e em relação ao efluente bruto têxtil para o sistema completo de tratamento com mistura, coagulação e reação de foto-Fenton, para as amostras DAM-1 $H_2O_2 = 500$ mg/L e DAM-2 $H_2O_2 = 1000$ mg/L.

Parâmetro	1-500	1-500	2-1000	2-1000
	Eficiência CT (%) ¹	Eficiência EFT (%) ²	Eficiência CT (%) ³	Eficiência EFT (%) ⁴
Cor (un. de PtCo)	98	99	97	99
Turbidez (NTU)	95	86	99	94
COD (mg/L)	86	91	83	91
Comp. Aromáticos (UV 254nm)	87	91	92	95
Sulfato (mg/L)	-101	-449	82	-18
Sól. Totais (mg/L)	97	99	97	99
Sól. Suspensos (mg/L)	32	48	72	83
Sól. Dissolvidos (mg/L)	99	100	97	99

¹ Eficiência de remoção da amostra DAM-1 $H_2O_2 = 500$ mg/L em relação à concentração teórica de mistura.

² Eficiência de remoção da amostra DAM-1 $H_2O_2 = 500$ mg/L em relação à concentração do Efluente têxtil bruto.

³ Eficiência de remoção da amostra DAM-2 $H_2O_2 = 1000$ mg/L em relação à concentração teórica de mistura.

⁴ Eficiência de remoção da amostra DAM-2 $H_2O_2 = 1000$ mg/L em relação à concentração do Efluente têxtil bruto.

Os resultados mostram valores diferentes para os diferentes métodos de cálculo da eficiência. Quando se calcula a eficiência em relação às concentrações do efluente bruto que se pretende tratar, o efluente têxtil, as eficiências de remoção se mostram muito mais altas do que as calculadas em comparação às concentrações teóricas de mistura. Entretanto, as eficiências em relação à concentração teórica ainda se mantêm altas, mostrando que o tratamento ocorreu também por mecanismos de coagulação/sedimentação e não apenas por efeito de diluição. Destacam-se as eficiências de remoção de: 99% para cor, 99% para turbidez, 91% para COD, 95% para compostos aromáticos, 99% para sólidos totais, 83% para sólidos suspensos e 100% para sólidos dissolvidos, considerando-se as maiores eficiências para ambos os métodos (valores em negrito). As amostras de DAM-1 e DAM-2 apresentaram eficiências de remoção semelhantes para a maioria dos parâmetros, exceto para sólidos suspensos, em que a amostra DAM-2

teve aproximadamente o dobro de eficiência de remoção em relação à DAM-1.

5.4 TRATAMENTO DO EFLUENTE TÊXTIL BRUTO POR PROCESSO UV/H₂O₂

A Tabela 10 mostra os resultados do tratamento do efluente bruto têxtil por POA UV/H₂O₂ para os parâmetros de pH, Cor e Turbidez.

Tabela 10: Caracterização do Sobrenadante do tratamento de amostra de efluente bruto têxtil por POA UV/H₂O₂ com concentrações de peróxido de hidrogênio de 500 e 1000 mg/L, após período total de 60 min de radiação

Parâmetro	Efluente têxtil bruto	UV/H ₂ O ₂	UV/H ₂ O ₂
		H ₂ O ₂ = 500 mg/L	H ₂ O ₂ = 1000 mg/L
pH	7,78	8,11	8,19
Cor (un. de PtCo)	4750	2930	2421
Turbidez (NTU)	69,5	75,4	70,2

Os resultados mostram que não houve modificação significativa do pH, o mesmo mantendo-se em torno de 8,00. Houve redução da Cor, com eficiência de 38% e de 49% de remoção em relação ao efluente têxtil bruto, para as concentrações de H₂O₂ de 500 e 1000 mg/L respectivamente. Já em relação à turbidez, não houve alterações significativas, sendo possível notar mesmo um pequeno aumento. É possível observar que a mistura do efluente têxtil bruto com a amostra de DAM seguido por reação de foto-Fenton promoveu melhores resultados na remoção da cor e da turbidez, indicando que um tratamento prévio com coagulação aumenta a eficiência do POA.

A Figura 14 mostra as amostras retiradas ao longo do tratamento UV/H₂O₂ do efluente têxtil bruto com adição de 1000 mg/L de H₂O₂.



Figura 14: Amostras retiradas do reator 0, 5, 10, 15, 30 e 60 minutos (da esquerda para direita) após o início da reação de UV/H₂O₂, com concentração de 1000 mg/L (b) de H₂O₂.

5.5 COMPARAÇÃO COM A LEGISLAÇÃO DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES E COM A LITERATURA DE REÚSO DE ÁGUA

A Lei nº 14.675/2009, que estabelece o Código Estadual do Meio Ambiente, determina os padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água em Santa Catarina. Dentre os parâmetros pertinentes ao âmbito do projeto, consta o seguinte limite: pH entre 6,0 e 9,0. Verifica-se que as amostras tratadas precisariam passar por um ajuste de pH para permitir o lançamento em um corpo receptor.

A Resolução nº 430/2011 do CONAMA dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes no Brasil. Dentre os parâmetros pertinentes ao âmbito do projeto, constam os seguintes limites: pH entre 5,0 e 9,0 e ferro dissolvido até 15 mg/L. Verifica-se que a amostra da mistura com a DAM-2 atende aos requisitos de pH e concentração de ferro.

O Manual de Conservação e Reúso de Água elaborado pela Fiesp (2004) apresenta alguns parâmetros de efluente tratado que permitam o seu reuso na indústria. A Tabela 10 apresenta os parâmetros de reúso para água de resfriamento e geração de vapor e para alguns processos da indústria têxtil, mostrando os parâmetros pertinentes ao projeto.

Tabela 11: Parâmetros de reúso de água na indústria têxtil

Indústria Têxtil	Ferro (mg/L)	pH	Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	Sólidos Suspensos (mg/L)
Engomagem	0,3	6,5 – 10,0	100	5,0
Lavagem	0,1	3,0 – 10,5	100	5,0
Branqueamento	0,1	2,0 – 10,5	100	5,0
Tingimento	0,1	3,5 – 10,0	100	5,0

Fonte: Adaptado de FIESP, 2004

De acordo com os parâmetros de reúso apresentados pelo Manual, as amostras tratadas por processo foto-Fenton precisariam apresentar maior remoção de ferro e de sólidos suspensos para permitir seu reúso na indústria. Uma possibilidade para melhoria no tratamento e atendimento aos padrões de reúso seria a verificação do efeito do uso de maiores concentrações de H_2O_2 , o que poderia permitir uma maior oxidação do ferro dissolvido e consequente adsorção de sólidos suspensos. Outra alternativa a ser explorada seria uma maior duração do tempo de exposição à radiação UV. Em relação ao parâmetro sólidos dissolvidos totais, todas as amostras tratadas pela reação de foto-Fenton atendem aos requisitos de reúso. No que concerne o pH, as amostras de mistura DAM-2 atendem aos requisitos de reúso nos processos de lavagem, branqueamento e tingimento.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O efeito coagulante da mistura de DAM com efluente bruto têxtil só foi verificado na mistura de proporção 650:350mL. Em um sistema de tratamento, isto significaria um aumento de cerca de três vezes no volume total de efluente a ser tratado, o que poderia ser um aumento inviável da carga hidráulica. Portanto, recomenda-se trabalhos futuros que avaliem a mistura do efluente bruto têxtil com amostras de DAM concentrada, a fim de verificar se há efeito de coagulação com volumes consideravelmente menores de DAM, conforme o que já foi verificado na Literatura no tratamento de outros efluentes.

Verificou-se que o efluente bruto têxtil ajudou a neutralizar o pH da DAM, entretanto o sobrenadante após a mistura continuou apresentando pH ácido de 4,33 e 5,82 (DAM-1 e DAM-2).

Considerando o sistema de tratamento por coagulação/sedimentação seguido de reação foto-Fenton, obteve-se eficiências de remoção de: 99% para cor, 99% para turbidez, 91% para COD, 95% para compostos aromáticos, 99% para sólidos totais, 83% para sólidos suspensos e 100% para sólidos dissolvidos (considerando-se as maiores eficiências verificadas com ambos os métodos de cálculo). As amostras de DAM-1 e DAM-2 apresentaram eficiências de remoção semelhantes para a maioria dos parâmetros. Para a DAM-1, a concentração de H_2O_2 que promoveu a melhor remoção de cor foi $H_2O_2 = 500$ mg/L, enquanto para a DAM-2 a melhor remoção de cor ocorreu para $H_2O_2 = 1000$ mg/L.

A amostra de efluente bruto têxtil tratada por processo UV/ H_2O_2 apresentou remoção de 97% da cor para ambas as concentrações de H_2O_2 . Também obteve-se remoção das concentrações de COD, com eficiência de 90% sendo que a concentração de 500 mg/L permitiu uma melhor remoção. Para os compostos aromáticos, verificou-se remoção de 94% e 75% para as concentrações de 500 e 100 mg/L de H_2O_2 , respectivamente. Novamente, considerando-se as maiores eficiências verificadas com ambos os métodos de cálculo.

Em relação ao reúso, as amostras tratadas por coagulação e reação foto-Fenton não se enquadram nos padrões de reúso da indústria têxtil, devido às concentrações de ferro e sólidos suspensos. Considerando os padrões de lançamento em corpo receptor, as amostras precisariam passar por um ajuste de pH e por um processo de remoção de ferro para estarem de acordo com os padrões da Legislação.

Os resultados para o tratamento do efluente têxtil bruto por processo UV/ H_2O_2 mostram que não houve modificação significativa

do pH, o mesmo mantendo-se em torno de 8,00, indicando que a redução do pH durante o tratamento foto-Fenton ocorreu pela oxidação do ferro presente na DAM. Houve redução da Cor, com eficiência de 38% e de 49% de remoção em relação ao efluente têxtil bruto, para as concentrações de H_2O_2 de 500 e 1000 mg/L respectivamente. Já em relação à turbidez, não houve alterações significativas, sendo possível notar mesmo um pequeno aumento. É possível observar que a mistura do efluente têxtil bruto com a amostra de DAM seguido por reação de foto-Fenton promoveu melhores resultados na remoção da cor e da turbidez, indicando que um tratamento prévio com coagulação aumenta a eficiência do POA.

Observou-se que, embora o tempo de reação adotado tenha sido de 60 minutos, a cor e os compostos aromáticos apresentaram redução significativa já nos primeiros 10 minutos, enquanto a turbidez começou a se estabilizar após 30 minutos. Em trabalhos futuros, sugere-se adotar diferentes tempos de reação com o objetivo de determinar o menor tempo possível que apresente a eficiência desejada para remoção dos principais parâmetros, o que diminuiria os custos com a radiação UV.

As amostras DAM-1 $H_2O_2 = 500$ mg/L e DAM-2 $H_2O_2 = 1000$ mg/L apresentaram as menores concentrações finais de Cor. Entre elas, a amostra DAM-2 $H_2O_2 = 1000$ mg/L foi a que apresentou as melhores eficiências de remoção para os parâmetros Cor, COD, Compostos aromáticos e sólidos totais e suspensos.

Verificou-se que ambos os processos de coagulação e de foto-Fenton apresentaram geração de precipitado, o qual por conter metais pesados apresenta um aspecto ambiental a ser considerado e que precisa receber destinação final correta.

Recomenda-se a realização de novos trabalhos com mistura de DAM e outros tipos de efluentes industriais, verificando-se a influência de fatores como ajuste de pH, concentrações de metais e outras concentrações de peróxido de hidrogênio. Recomenda-se usar diferentes tipos de efluentes industriais que estejam próximos à fonte geradora de DAM.

Considerando que exista distância considerável entre a fonte geradora de DAM e a indústria têxtil, recomenda-se realizar novos trabalhos de tratamento de efluente bruto têxtil com uso de coagulante produzido a partir da DAM, o qual poderia ser facilmente transportado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13969 Tanques sépticos. Rio de Janeiro, 1997.

AMORIM, Camila Costa de; LEÃO, Mônica Maria Diniz; MOREIRA, Regina de Fátima Peralta Muniz Moreira. Comparação entre diferentes processos oxidativos avançados para degradação de corante azo. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.14, no.4, 2009. Disponível em: < <http://www.link.springer.com/>>. Acesso em 01 out. 2014.

BAÊTA, Bruno Eduardo Lobo. Tratamento de efluentes de indústria têxtil utilizando Reatores Anaeróbios de Membranas Submersas (SAMBR) com e sem carvão ativado em pó (CAP). Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

BANDEIRA, Adriano de Paula Fontainhas. Alocação econômica de recursos naturais no contexto de bacia hidrográfica – aplicação na bacia do Rio Sangão em Santa Catarina. Tese (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BOTELHO, Ana Paula Mignoni. Pós-tratamento utilizando processo oxidativo avançado H₂O₂/UV de efluente doméstico tratado em biorreator à membrana. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

BRITO, Núbia Natália de; SILVA, Victor Borges Marinho. Processo oxidativo avançado e sua aplicação ambiental. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v.1, no.3. Disponível em: < <http://www.revistas.ufg.br/>>. Acesso em 01 out. 2014.

BUTHELEZI, Simphifwe P. et al. Textile Dye Removal from Wastewater Effluents Using Biofloculants Produced by Indigenous Bacterial Isolates. Molecules, n. 12, 2012.

CANELLAS, Luciano Pasqualoto et al. Distribuição da matéria orgânica e características de ácidos húmicos em solos com adição de

resíduos de origem urbana. *Pesq. agropec. bras.*, v. 36, no. 12. Brasília, 2001.

CAMPANER, Veridiana Polvani; SILVA, Wanilson Luiz. Processos físico-químicos em drenagem ácida de mina em mineração de carvão no sul do Brasil. *Quím. Nova*, v.32, no.1, 2009. Disponível em: < <http://www.scielo.br/>>. Acesso em 01 out. 2014.

CIRRA - Centro Internacional de Referência em Reúso de Água. Reúso Industrial. Disponível em < <http://biton.uspnet.usp.br>>. Acesso em 12 abr. 2015.

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução n. 54 de 2005.

COSTA Djerson Mateus Alves E JUNIOR, Antônio Carlos de Barros. Avaliação da necessidade do reúso de águas residuais. *Holos*, v. 21, 2005.

CRITTENDEN, John C. et al. *Water treatment: principles and design*. Wiley, 2012.

DANTAS, Marcelo Eduardo et al. Geomorfologia aplicada à gestão integrada de bacias de drenagem: Bacia do rio Araranguá (SC), zona carbonífera sul-catarinense. In: Simpósio brasileiro de recursos hídricos, n.16, 2005, João Pessoa. Anais do Simpósio, ABRH. João Pessoa, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Informativo anual da indústria carbonífera – 2000. Brasília, 2000.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Balanço Mineral 2001. Brasília, 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Normas Reguladoras de Mineração. Portaria Nº 12 , de 22 de janeiro de 2002.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Acid Mine Drainage: Innovative Treatment Technologies. Disponível em: <<http://www.epa.ie/>>. Acesso em 05 jan. 2015.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Water treatment manuals: Coagulation, flocculation and clarification. Disponível em: < <http://www.epa.ie/>>. Acesso em 05 jan. 2015.

FAGUNDES, Rosângela Maria Schuch. Utilização da drenagem ácida de minas como reagente para tratamento do lixiviado do aterro sanitário de Campo Bom – RS: estudos de coagulação e reação de Fenton. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

FIESC - Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina. A participação de Santa Catarina no mercado têxtil do Sul do País – 2006. Disponível em: <<http://fiesc.com.br>>. Acesso em 01 out. 2014.

FILHO, Juarez R. Do Amaral et al. Caracterização de um depósito de rejeitos para o gerenciamento integrado dos resíduos de mineração na região carbonífera de Santa Catarina, Rev. Esc. Minas, v.66, no.3, 2013. Disponível em: < <http://www.scielo.br/>>. Acesso em 01 out. 2014.

FIRJAN - FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Manual de Conservação e Reúso de Água na Indústria. Rio de Janeiro, 2006.

FORTINO, Patrícia Carneiro. Pós-tratamento de efluente têxtil usando coagulação/floculação combinado com processos de separação por membranas. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

GEOLÓGICA ENGENHARIA E MEIO AMBIENTE. Estudo hidrológico e hidrogeológico da área do campo Vila Funil, em Siderópolis, SC. Disponível em: < <https://www.jfsc.jus.br/>>. Acesso em 21 jan. 2015.

GONÇALVES, Adriana Cinopoli. Tratamento de efluentes contendo cianeto livre através do sistema H₂O₂/UV. Tese (Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

JENNINGS, S.R.; NEUMAN D.R. E BLICKER, P.S. Acid Mine Drainage and Effects on Fish Health and Ecology: A Review Reclamation Research Group. Montana, 2008.

NAGEL-HASSEMER, Maria Eliza et al. Processo UV/H₂O₂ como pós-tratamento para remoção de cor e polimento final em efluentes têxteis. Rev. Química Nova, v. 35, no. 5. São Paulo, 2012.

NAGEL-HASSEMER, Maria Eliza. Oxidação fotoquímica - UV/H₂O₂ – para degradação de poluentes em efluentes da indústria têxtil. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

NAGEL-HASSEMER, Maria Eliza et al. Tratamento de efluente têxtil através da oxidação por via úmida ativada. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/>>. Acesso em 15 fev. 2015.

ISHII, Yasutaka et al. Hydrogen peroxide oxidation catalyzed by heteropoly acids combined with cetylpyridinium chloride. J. Org. Chem., 1988, 53 (15), pp 3587–3593. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/>>. Acesso em 12 set. 2014.

KANG, Shyh-Fang et al. Pre-oxidation and coagulation of textile wastewater by the Fenton process. Chemosphere, v. 46, no. 6, 2002.

KAMMRADT, Patricia Bastos. Remoção de cor de efluentes de tinturarias industriais através de processo de oxidação avançada. 92 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

KONARZEWSKI, Vitor Hugo Cordeiro. Tratamento Combinado de Chorume com Drenagem Ácida de Minas. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

KOPPE, Jair Carlos; COSTA, João Felipe Coimbra Leite. A lavra de carvão e o meio ambiente em Santa Catarina. In: Carvão brasileiro: Tecnologia e meio ambiente. Centro de Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro, 2008.

KOS, Lech et al. Textile Wastewater Treatment by the Fenton Method. *Fibres & Textiles*, v. 18, no. 4, 2010.

KREBS, Antonio Sílvio Jornada; ALEXANDRE, Nadja Zim. Recursos hídricos da bacia do rio Araranguá-SC: Disponibilidades e conflitos. XI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. ABAS. São Paulo, 2011.

KUNZ, Airton et al. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. *Revista Química Nova*, v. 25, no. 1, 2002.

LANGE, Liséte Celina et al. Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por processo oxidativo avançado empregando reagente de Fenton. *Eng. Sanit. Ambient.* v.11, no.2. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/>>. Acesso em 12 set. 2014.

LEITE, Ana Maria Ferreira. Reúso de água na gestão integrada de recursos hídricos. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Gestão Ambiental) - Universidade Católica de Brasília, 2003.

LIMA, Juliana Daldegan e SANSON, João Rogério. O surto de industrialização do setor têxtil a partir de 1880: Blumenau e Brasil. *Revista de História Econômica & Economia Regional Aplicada*, v. 3, no. 5, 2008.

LOPES, Fabrício Abella. Drenagem ácida de minas concentrada como fonte de ferro para a coagulação e para a Reação de Fenton : aplicações no tratamento de esgoto sanitário de uma instituição de ensino superior. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

MARTINS, Leonardo Madeira et al. Aplicação de Fenton, foto-Fenton e UV/H₂O₂ no tratamento de efluente têxtil sintético contendo o corante Preto Biozol UC. *Eng Sanit Ambient*, v. 16, no. 3, 2011.

MATTOS, Ivanildo Luiz de et al. Peróxido de hidrogênio: importância e determinação. *Quim. Nova*, v. 26, no. 3, 2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br/>>. Acesso em 12 set. 2014.

MELO, Silene Alessandra Santos et al. Degradação de fármacos residuais por processos oxidativos avançados. *Química Nova*, v. 32, no. 1, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/>>. Acesso em 12 set. 2014.

MORAIS, Josmaria Lopes de. Estudo da potencialidade de processos oxidativos avançados, isolados e integrados com processos biológicos tradicionais, para tratamento de chorume de aterro sanitário. Tese (Pós-Graduação em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

NASCIMENTO, Flávia M. F. Et al. Impactos ambientais nos recursos hídricos da exploração de carvão em Santa Catarina. Centro de Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro, 2002.

NEIL, Norton Ferreira; NETO, Francisco José Kliemann. Produção Conjunta no Processo de Beneficiamento de Carvão Mineral: Custos Conjuntos. *Produto&Produção*, v. 9, n. 2, 2008. Disponível em: <<http://www.seer.urgs.br/>>. Acesso em 01 out. 2014.

NOGUEIRA, Raquel Fernandes Pupo. Fundamentos e aplicações ambientais dos processos fenton e foto-fenton. *Química Nova*, v. 30, no. 2, 2007.

NUNES, M. A. S.; Tratamento combinado de drenagem ácida de minas e esgoto doméstico. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

PAVEI, Paula Tramontini. Caracterização e estudo do comportamento de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em ecossistemas aquáticos contaminados pelas atividades de mineração de carvão. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2007.

POLEZI, Mauricio. Aplicação de processo oxidativo avançado (H_2O_2/UV) no efluente de uma ETE para fins de reuso. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

SILVEIRA, Aline Nogueira da. Avaliação do reuso e tratamento de águas ácidas de minas de carvão pelo método NF-Fadat-Neutralização,

floculação e flotação por ar dissolvido de alta taxa. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SINDIVEST – Sindicato da Indústria do Vestuário do Sul Catarinense. Indústria têxtil e do vestuário de SC. Disponível em: <<http://www.sindivestcriciuma.com.br/>>. Acesso em 05 mar. 2015.

SOARES, Paulo Sérgio M.; BORMA, Laura de Simone. Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/>>. Acesso em 12 set. 2014.

SOARES, Evaldo Rodrigues. Cinza e carbonato de cálcio na mitigação de drenagem ácida em estéril de mineração de carvão. Rev. Bras. Ciênc. Solo, v.30, n.1. Viçosa, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/>>. Acesso em 12 set. 2014.

SOARES, E. R. Efeitos da compactação e CaCO_3 na oxidação da pirita em estéril de mineração de carvão. R. Bras. Ci. Solo, 2002. Disponível em: <<http://www.sbc.solos.ufv.br/>>. Acesso em 12 set. 2014.

SOARES, E.R.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. & CORRÊA, M.L.T. Drenagem ácida em materiais provenientes da mineração de Candiota (RS). Instituto de geociências – UFMG. Geonomos, 5:67-72, 1997.

STROSNIDER, William H.J. et al. Passive co-treatment of Zn-rich acid mine drainage and raw municipal wastewater. Journal of Geochemical Exploration, 2012.

SUBTIL, Eduardo Lucas; MIERZWA, José Carlos; HESPANHOL, Ivanildo. Avaliação do desempenho do sistema UV/ H_2O_2 no tratamento de efluentes provenientes do processo de tratamento térmico de emulsões de água e óleo. Revista Ambiente & Água, v.4, no.3, 2009. Disponível em: < <http://www.ambi-agua.net/>>. Acesso em 01 out. 2014.

RUAS, Diego Botelho. Aplicação do processo oxidativo avançado H_2O_2 /UV como pós-tratamento de reator anaeróbico em efluentes de indústrias de celulose kraft branqueada. Dissertação (Escola de

Engenharia de São Carlos) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

TEIXEIRA, Cláudia Poli de Almeida Barêa; JARDIM, Wilson de Figueiredo. Processos Oxidativos Avançados – Conceitos teóricos. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

VENDRUSCOLO, Geovana. Avaliação do processo Foto-Fenton aplicado ao efluente têxtil com alta concentração de sólidos. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

VIGÂNICO, Eunice M. Et al. Biohydrometallurgical/UV production of ferrous sulphate heptahydrate crystals from pyrite present in coal tailings. *Minerals Engineering*, v. 24, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em 01 out. 2014.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Ultraviolet Radiation and Health. Disponível em: < <http://www.who.int/>>. Acesso em 01 out. 2014.