

ELETRÓLISE APLICADA AO TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS: ESTUDO DE CASO

Itamar Gili*
Débora Crisntine Hammes**
Humberto Gracher Riella***

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo de caso para o tratamento de efluentes têxteis a uma vazão de 70 m³/h utilizando-se exclusivamente a técnica de eletrólise, também conhecida como eletrofloculação e eletrocoagulação com eletrodos de sacrifício de ferro. O sistema foi avaliado através de laudos e análises de monitoramento efetuados por laboratório especializado e testes de bancada demonstram que alguns ajustes operacionais devem ser feitos a fim de maximizar a eficiência do sistema. A técnica demonstra grande eficiência e baixo investimento financeiro, sendo indicada para efluentes de difícil trato, condições de espaço reduzido e impossibilidade de instalação de estações convencionais do tipo lodo ativado, para áreas centrais ou densamente povoadas.

Palavras-chave: eletrólise, eletrofloculação, efluentes têxteis.

*Graduação em Engenharia Química, Especialista e Perícia e Auditoria Ambiental, Mestrando em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: itamar.gili@posgrad.ufsc.br

**Graduanda em Ciências Biológicas pela Universidade Regional de Blumenau – E-mail: deborahammes@hotmail.com

***Professor titular do programa de Pós Graduação em Engenharia Química e Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina.

1 INTRODUÇÃO

A indústria têxtil apresenta como característica a produção de poluentes nos três estados físicos da matéria. No entanto, o efluente líquido gerado por esse ramo industrial, em virtude do grande volume, requer maior atenção por apresentar grande potencial de danos ao meio ambiente (COLLINS, 1989).

As águas residuais provenientes das indústrias têxteis impõem sérios problemas ambientais e correspondem a uma das principais fontes de contaminação da água dos rios. O tingimento e as operações de acabamento da indústria têxtil produzem grandes quantidades de resíduos com elevadas cargas orgânica e inorgânica, além de elevada coloração. Estes resíduos possuem também grande quantidade de surfactantes e agentes quelantes que podem provocar a eutrofização, além de perturbações no ambiente aquático. Em vista da escassez dos recursos hídricos disponíveis, diversas alternativas e novas tecnologias têm sido desenvolvidas para o tratamento destes compostos poluentes (AQUINO NETO, 2011).

O sistema de tratamento convencional utilizado na indústria têxtil, baseado em lodos ativados, requer alto investimento inicial e uma grande área para construção dos tanques, além de estar sujeito a alterações devido às condições climáticas e a sensibilidade a substâncias incomuns, que podem ter efeito tóxico ao meio biológico. Também como desvantagem, há o grande consumo de insumos químicos e geração de lodo nos sistemas de tratamento biológico, em virtude das características do efluente têxtil, que necessitam acabamento físico-químico para adequação aos parâmetros de lançamento.

Na impossibilidade da aplicação do tratamento convencional dos efluentes na indústria têxtil, surgem alternativas tecnológicas a fim de adequar os padrões de lançamento a legislação vigente e que também minimizem os investimentos iniciais, comparando-se com as estações convencionais, baseadas em lodos ativados e outros processos biológicos e físico-químicos.

No presente estudo, os dados utilizados foram coletados por um período de 90 dias a fim de obter um panorama geral do sistema, alternando os dias e horários da coleta com o intuito de minimizar as variações pontuais características do efluente têxtil. As análises físico-químicas foram efetuadas e coletadas por laboratório terceirizado, acreditado pelo INMETRO.

2 OBJETIVOS

A tecnologia empregada, e objeto deste trabalho, consiste na aplicação da técnica de eletrólise para tratamento de efluentes têxteis, junto a indústria do município de Brusque, que é a primeira do estado de Santa Catarina a utilizar, exclusivamente, esta tecnologia.

Neste trabalho, serão apresentados os mecanismos eletroquímicos congruentes com os dados e análises físico-químicas da entrada e saída do efluente, antes e após o processo eletrolítico.

3 PARÂMETROS DE PROJETO E CONTROLE

A ETE instalada na indústria compreende as seguintes etapas para o efluente:

- Tanque de recalque;
- Equalização;
- Ajuste da condutividade elétrica;
- Adição de floculante e antiespumante;
- Eletrólise/Eletrofloculação;
- Adição de polímero;
- Ajuste de pH
- Decantação;
- Descarte.

Também há geração de sólidos através das descargas de fundo das células eletrolíticas, de acúmulos no decantador e no tanque de equalização, além do lodo propriamente dito. O lodo gerado no sistema segue para as seguintes operações:

- Tanque de recalque;
- Adensador rotativo;
- Centrifuga;
- Destinação final.

Nesta configuração são utilizadas quatro células eletrolíticas com eletrodos de ferro e de dimensões 1,0 x 0,8 m (A x L). As placas dos eletrodos são espaçadas em 2,5 cm.

A diferença de potencial (DDP) aplicada é de 3 a 5V com corrente variando conforme a condutividade, na média em 1.500A por cada célula, que equivale a uma potência máxima de 7,5 kW para uma DDP de 5V.

O efluente é eletrofloculado em pH 12,0 com intuito de aumentar a condutividade elétrica, que já é significativa (1200 mS/cm), e desta forma evitar que seja necessário a adição de salmoura.

O tempo de detenção hidráulica nas células é de 4,25 min e o fluxo é paralelo à disposição das placas dos eletrodos, que são dispostos dois a dois.

A correção do pH é efetuada após a eletrólise com adição de ácido sulfúrico 98% (comercial).

Os sólidos são removidos por decantação e o lodo gerado apresenta-se de aspecto fluido, com excesso de umidade. São necessárias intervenções bimestrais para remoção de material sedimentado em todos os tanques utilizados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O método de monitoramento consistiu em análises periódicas dos principais parâmetros de controle ambiental, além de alguns relevantes para o processo específico.

As coletas e análises foram realizadas por laboratório externo, a cada 7 dias, e foram efetuadas

medições horárias de sólidos, Demanda Química de Oxigênio (DQO), condutividade, pH, vazão e temperatura na própria indústria.

Para as análises externas, os parâmetros monitorados foram: pH, Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV), Sólidos Totais Fixos (STF), Demanda Biológica de Oxigênio (DBO), DQO, turbidez, cor, alumínio (Al), ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu), surfactantes, óleos e graxas minerais e totais, cromo (Cr), nitrogênio total (N), fósforo (P), *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. e coliformes fecais e totais. Os patógenos foram considerados já que os efluentes sanitários, após passarem por um sistema fossa/filtro, também são direcionados para estação junto ao tanque de recalque.

Os valores obtidos pelas séries de análises efetuadas pelo laboratório especializado também foram tabelados e a média aritmética dos parâmetros de entrada e saída são mostradas abaixo.

O efluente bruto foi coletado no tanque de equalização e o efluente tratado foi coletado em um tanque de agitação existente, logo após a célula eletrolítica, afim de caracterizar a quantidade de sólidos presente.

Tabela 1 - Valores médios para os parâmetros analisados pelo laboratório externo.

Parâmetros	Entrada	Saída	% Rem.
Alumínio (mg/L)	3,12	1,96	37,18%
Colif. F. (UFC/100mL)	nd	nd	nd
Colif. T. (UFC/100mL)	155,83	<1	99,36%
Cor (Pt Co)	3.422,67	1.510,33	55,87%
Cromo (mg/L)	0,02	0,01	50,00%
DBO (mg/L O ₂)	236,27	106,33	55,00%
DQO (mg/L O ₂)	825,83	419,50	49,20%
<i>E. Coli</i>	0,83	nd	nd
Fenol (mg/L)	0,02	0,01	50,00%
Ferro Total (mg/L)	24,73	27,22	-10,07%
Fósforo (mg/L P)	5,62	0,54	90,39%
Nitrogênio (mg/L N)	57,65	22,72	60,59%
Óleos e G. (mg/L)	19,22	11,25	41,47%
Óleos e G. Minerais (mg/L)	10,12	6,14	39,38%
pH	11,05	6,06	45,16%
Salmonela (PA/170 mL)	nd	nd	nd
Sólidos totais (mg/L)	3.612,67	6.701,69	-85,51%
STF (mg/L)	2.956,00	6.340,67	-114,50%
STV (mg/L)	656,67	361,00	45,03%
Surfactantes (mg/L)	2,69	2,55	5,20%
Zinco (mg/L)	2,78	1,96	29,50%

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DEMANDA DE OXIGÊNIO

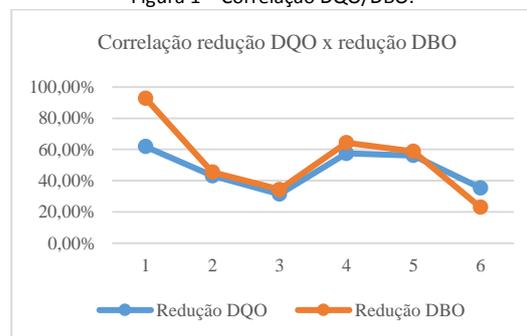
A demanda de oxigênio foi analisada através da DQO e DBO, com metodologia de amostragem de acordo com o SMWW (Standart Methods for the Examination Of Water and Wastewater – 22 th Edition), método 1060 B e C. A análise de DBO foi efetuada conforme método SMWW 5210D e DQO através de colorímetro 800 Hach.

A DQO e a DBO foram correlacionadas e apresentam forte correlação ($\rho > 0,90$). O percentual de redução dos parâmetros após a passagem pelas células eletrolíticas é apresentado abaixo:

Tabela 2- Redução da demanda de oxigênio.

Laudo	Redução DQO	Redução DBO
1	61,89%	92,91%
2	43,10%	45,56%
3	31,37%	34,32%
4	57,54%	64,29%
5	56,17%	58,78%
6	35,41%	22,95%

Figura 1 – Correlação DQO/DBO.



Grande parte da demanda de oxigênio dos efluentes está relacionada com a presença de sólidos. Sanin (1997) demonstra que sólidos suspensos presentes em pequenas quantidades, como coliformes fecais, turbidez, óleos e graxas e emulsões (como o leite), não são problemas para a eletrocoagulação e são facilmente removidos.

O efluente em questão apresenta altos índice de sólidos, principalmente oriundos do processo de desgumagem. A alta taxa de remoção para algumas análises sugere que alguns compostos do efluente reagem com ferro (II ou III), liberados pelo processo eletrolítico, formando compostos insolúveis. É de se considerar também a formação dos radicais OH, que possuem alto poder oxidante e que, quando reagem com o efluente bruto, tendem a oxidar os compostos orgânicos e inorgânicos, reduzindo assim a demanda de oxigênio.

Os resultados das análises apresentam grandes variações. Uma explicação para este fato é que

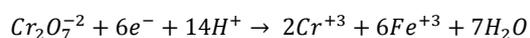
durante as análises, o sistema estava em constante adequação e instalação, sendo o efluente tratado direcionado para um tanque pulmão até a certificação dos laudos ambientais antes do descarte.

5.2 METAIS

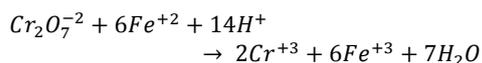
Os efluentes das indústrias têxteis podem apresentar metais em sua composição, advindos de resíduos existentes nos insumos e de ligantes metálicos existentes em alguns pigmentos ou corantes.

Sanin (1997) cita cromo, cobalto, cobre e níquel como os principais metais existentes nas águas residuárias da indústria têxtil.

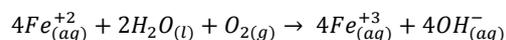
A remoção de Cr(VI) foi avaliada por Aber et al. (2011), para eletrodos de ferro e alumínio. As correspondentes semi-reações propostas por Aber et al. (2011) são a redução da água e a redução eletroquímica direta do metal:



Além destas, várias outras reações ocorrem. O Fe(II) que é produzido no ânodo reduz o Cr(VI) a Cr(III):



Se oxigênio é formado no ânodo, é capaz de oxidar o Fe(II) dissolvido para Fe(III):



Subsequentemente, os íons hidróxido formados no cátodo aumentam o pH da solução e podem provocar a precipitação do Cr(III) e os cátions, liberados no ânodo, na forma de seus hidróxidos correspondentes.

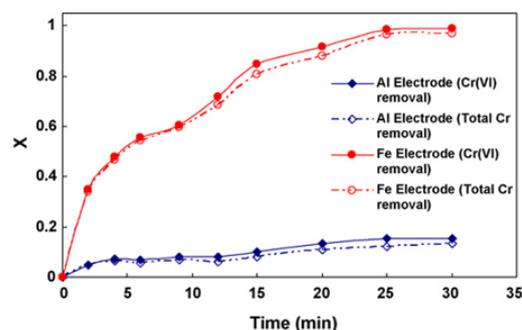
Com isso percebe-se que a redução do Cr(VI) pode ter dois caminhos:

Redução eletroquímica na superfície do cátodo;
Redução eletroquímica produzida pelos íons de Fe(II) produzidos no ânodo.

No caso de eletrodos de alumínio, sabe-se que seus íons produzidos no ânodo não podem reduzir o Cr(VI) a Cr(III), assim conclui-se que a redução dos Cr(VI) a partir dos íons Fe(II) é um passo importante no caminho da redução do cromo pelo processo de eletrocoagulação.

Aber et al. (2009) concluem que a eletrocoagulação, utilizando-se ânodo de ferro, remove acima de 97% do cromo total das soluções poluentes e que, no intervalo de pH de 5 a 8, a maioria do Cr(VI) é precipitada na forma de hidróxido, o que justifica a remoção de cromo total.

Figura 2 – Efeito do material do eletrodo na remoção de cromo VI e cromo total.



Fonte: adaptado de Aber et al. (2009).

Heidmann e Calmano (2008) avaliaram a remoção de zinco, cobre, níquel, prata e cromo pelo processo de eletrocoagulação com eletrodos de alumínio e verificaram que as taxas de remoção de zinco, cobre e níquel são reduzidas na presença de outros metais, devido a competição pelos íons OH- produzidos no cátodo. Concluem então que a remoção de zinco, cobre, níquel e prata é feita por redução direta na superfície do cátodo, onde coprecipitam na forma de hidróxido do metal correspondente.

Balasubramanian et al. (2009), realizaram experimentos para remover arsênio por eletrocoagulação, cobrindo ampla gama de condições de funcionamento. O percentual de remoção do arsênio mostra influência significativa com carga aplicada e o pH da solução inicial. A eletrocoagulação foi modelada utilizando modelos de adsorção e segue o modelo de isotermas de Langmuir de forma satisfatória.

Gomes et al. (2007) mostram que a eficiência de remoção de arsênio é maior que 99,6%, quando utilizados eletrodos de ferro, e não excede 97,8% quando utilizados eletrodos de alumínio. Também propõem a combinação de eletrodos Fe-Al, onde a remoção do arsênio varia de 78,9 a 99,6%, dependendo das concentrações iniciais (1,42 a 1230 ppm).

Os metais analisados para o caso específico da indústria consistem em alumínio, cromo total e ferro total, já que em estudo prévio não foi verificado a presença de outros metais relevantes em níveis detectáveis pelos métodos utilizados ou que pudessem causar quaisquer sinais de contaminação ambiental. Os resultados são apresentados abaixo.

Tabela 3 - Remoção de alumínio e ferro.

Laudo	Alumínio	Ferro	Cromo Total
1	62,16%	13,38%	>50%
2	21,47%	-120,55%	>50%
3	43,18%	88,59%	>50%
4	65,48%	69,59%	>80%
5	96,32%	-131,81%	>80%
6	95,92%	-40,66%	>80%

Observa-se uma grande variação nos níveis de ferro nos três primeiros laudos. Nestas análises era adicionado cloreto férrico ao efluente para auxiliar a

floculação. Verificou-se que a eficiência do sistema para remoção de metais fica prejudicada com esta operação. Os laudos 5 e 6 ocorreram quando a estação passava por um acúmulo de material sólido no fundo das células eletrolíticas, o que acarretava arraste deste material e contaminação do efluente devido à grande concentração de sólidos, ricos em ferro.

O alumínio atende a legislação ambiental e o processo, mesmo nas condições de operação não ideais, mostrou-se bastante eficaz na remoção deste metal. Também pode-se atribuir a remoção do alumínio ao alto pH inicial, que forma o hidróxido correspondente, removido através do processo físico de decantação.

Os níveis de cromo total apresentados no efluente bruto encontram-se no limiar do método de detecção, não sendo detectados na saída do efluente. Uma análise do efluente a jusante e a montante da eletrólise demonstra que o metal é completamente removido, ou, no mínimo, sua concentração fica abaixo de 0,01 mg/L, o que é perfeitamente adequado no quesito ambiental, já que os limites para águas residuárias são de 5,0 mg/L pela legislação Catarinense.

Os dados obtidos são compatíveis com os de Aber et al. (2009), que alcançaram 97% de remoção do cromo total através da eletrocoagulação utilizando ânodo de ferro.

5.3 NITROGÊNIO E FÓSFORO

Considerados de grande impacto sobre o corpo receptor devido ao fornecimento de nutrientes e consequente proliferação de algas que causam a eutrofização e esgotamento dos níveis de oxigênio dissolvido, o nitrogênio e o fósforo são de difícil remoção em estações biológicas e de alto custo operacional para estações físico-químicas.

Vários métodos têm sido utilizados para remoção de fosfatos das águas residuárias, incluindo adsorção, precipitação química, troca iônica, eletrodialise, filtração por membrana e tratamento biológico, sendo o último de baixa eficiência (30%), necessitando de técnicas complementares (BETKAS et al, 2004).

A precipitação química apresenta grande eficiência, no entanto possui desvantagens, como custos operacionais e de capital elevado, alta produção de lodo volumoso e aplicação de compostos químicos coagulantes em condições alcalinas (D. OBAJA et al, 2003).

O nitrogênio pode ser tratado através da remoção do nitrogênio biológico (BNR – Biological Nitrogen Removal), mas este processo é ineficaz em altas concentrações, pois a amônia presente inibe o processo (CHIMENOS, et al, 2003).

Nos últimos anos, aumentou-se o interesse na aplicação de tecnologias eletroquímicas para tratamento de águas residuárias para remoção de compostos orgânicos e metais pesados (VASUDEVAN, 2009).

A eletrocoagulação tem sido usada com sucesso na remoção de fosfato de efluentes de águas residuais (S. IRDEMEZ, 2006). Além disso, a remoção de amoníaco da água residual foi muito satisfatória através de um processo de eletro-oxidação (LI, 2009).

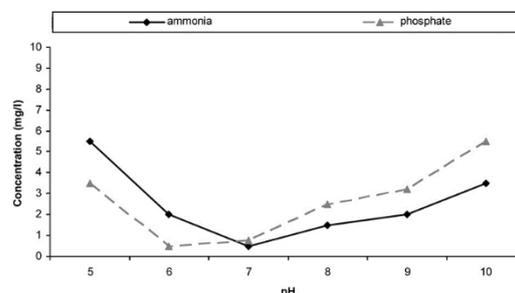
Com base nestes estudos, verifica-se que a remoção de fósforo e nitrogênio pode ser alcançada através de eletrocoagulação ou eletro-oxidação.

A remoção de fosfato atinge a máxima eficiência com pH próximo a neutralidade (7,0) com densidade de corrente de 3A/m² e tempo de detenção de 20 min. Tempos superiores não são operacionalmente interessantes.

Para as condições descritas acima, Mahvi et al. (2011), conseguiram uma eficiência de remoção acima de 85% com uma concentração inicial de 100 mg/l de fosfato, em pH 7,0. Para um tempo de residência de 60 min, a remoção situa-se em torno de 90% nas mesmas condições.

Para a amônia, também obtiveram a máxima eficiência em pH próximo a neutralidade, mas em contraste com o fosfato, um alto tempo de residência é necessário. Para 20 min, a remoção em pH 6,0 foi em torno de 55% e para 60 min em torno de 95%. Também ressaltam a alta influência do pH das condições do efluente na remoção de fosfato e amônia, demonstrados na figura abaixo.

Figura 3 – Efeito do pH na remoção de fosfato e amônia.



Fonte: adaptado de MAHVI et al. (2011).

Mahvi et al. (2011) concluem que o reator eletrolítico é capaz de remover tanto fosfato quanto amônia, que acreditam ser dois dos poluentes mais importantes presentes em águas residuais. O desempenho do reator foi ótimo em pH neutro. O aumento da densidade de corrente e tempo de detenção tiveram impactos positivos sobre o desempenho geral do reator. Além disso, verificaram que o reator apresentava alto desempenho, mesmo quando altas concentrações de fosfato e de amoníaco estavam presentes no efluente.

Lacasa et al. (2011) compararam a remoção de nitrato via coagulação e eletrocoagulação e chegaram as seguintes conclusões:

A eletrocoagulação é uma tecnologia eficaz na remoção de nitratos de águas residuárias. A adsorção do nitrato no crescimento dos precipitados

de hidróxido do íon metálico parece ser o principal mecanismo por trás da grande eficiência observada;

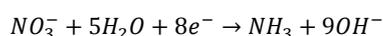
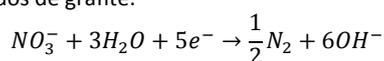
Para uma igual dose de reagentes, a mesma quantidade de nitrato foi removida, utilizando ânodos de alumínio ou ferro. Ambas as isotermas de adsorção preveem a adsorção do íon nitrato na coagulação como mecanismo primário. No entanto, o potencial zeta, em termos de carga superficial, é diferente para os eletrodos de ferro e alumínio, o que pode ser explicado pelas diferentes especialidades dos dois tipos de coagulantes;

Pequena quantidade de íons amônio são produzidos durante a eletrocoagulação com íons de alumínio. Estes íons são adsorvidos durante o crescimento dos flocos e completamente removidos;

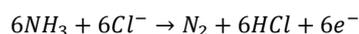
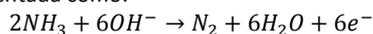
A densidade da corrente não afeta a eficiência na remoção de nitratos, mas afeta os custos operacionais;

A coagulação não pode competir com a eletrocoagulação na remoção de nitratos. O aumento significativo da condutividade parece ser a causa desta situação, o que pode ser explicado pelo aumento da competição entre os ânions de adsorção no crescimento dos precipitados de hidróxidos metálicos e por uma redução nas camadas duplas de partículas precipitadas.

Raju et al. (2008) propõem o mecanismo diferente para remoção de nitrogênio utilizando eletrodos de grafite:



Na presença de íons Cl^- e OH^- a reação direta e indireta da oxidação da amônia pode ser representada como:



Através da eletrólise, obtêm-se bons resultados, com custo relativamente reduzido e sem a necessidade de polimento ou acabamento final para estes poluentes, como demonstram os resultados abaixo.

Tabela 4- Remoção de nitrogênio e fósforo totais, em mg/L de N e P.

Laudos	Nitrogênio	Fósforo
1	78,74%	80,44%
2	12,56%	80,99%
3	-3,60%	91,16%
4	36,14%	88,74%
5	80,14%	98,05%
6	83,36%	90,90%

Os laudos 2, 3 e 4 apresentam inconformidade para os níveis de remoção de nitrogênio que não foi identificada, mas verifica-se um percentual elevado de remoção tanto para nitrogênio quanto para

fósforo. Os resultados são compatíveis com o apresentado na literatura.

5.4 COR

Um dos principais impactos visuais do fluente têxtil é sua cor. Apesar da legislação brasileira não regulamentar os níveis seguros ou adequados deste parâmetro, ele pode ser interpretado como um indicativo da ineficiência do sistema de tratamento.

As principais técnicas para descoloração de rejeitos envolvem processos de adsorção, precipitação, degradação química, eletroquímica e fotoquímica, biodegradação, floculação, etc. Os corantes têxteis são produzidos para resistir à exposição ao suor, sabão, água, luz ou agentes oxidantes. Esta alta estabilidade torna-os menos receptivos à biodegradação que, potencialmente, é o processo mais barato de degradação. O tratamento biológico é o mais utilizado pela indústria têxtil. Este método baseia-se na degradação do corante pela ação enzimática de microorganismos através de processos bioquímicos (PASCHOAL e TREMILIOSI-FILHO, 2005).

A técnica fotoquímica, empregando a radiação UV, não se mostrou eficiente na degradação do índigo. Adicionalmente, o efeito isolado do peróxido de hidrogênio para tratamento deste corante foi desprezível. Entretanto, um tratamento combinado de UV/H₂O₂ decompôs o índigo (GALINDO et al., 2001).

Além disso, pulsos de laser também apresentaram a capacidade de remover a cor do índigo em águas residuais (DASCALU et al., 2000).

Pesquisas realizadas utilizando eletrodo recoberto por filme de diamante dopado com boro mostraram a grande eficiência deste material na degradação dos corantes *sandocril* (amarelo, azul, verde e vermelho) e *sandolam* (alaranjado). Uma possível fragmentação e um rearranjo das moléculas foram propostos como um resultado do tratamento eletroquímico (DÁVILA et al., 2000)

Já Szpyrkowicz (2001) e colaboradores aplicaram a oxidação eletroquímica para um efluente contendo uma mistura de corantes ácidos e reativos e obtiveram uma remoção da coloração do efluente final em torno de 90%. Bertazzoli e Pelegrini (2002) mostraram que, após 1 h de tratamento eletroquímico combinado, 90% do corante havia sido degradado. Por outro lado, a degradação fotocatalítica eletroquimicamente assistida, sobre ânodo do tipo dimensionalmente estável Ti/Ru_{0,3}Ti_{0,7}O₂, reduziu o teor do corante *azul reativo 19* da ordem de 50% após 2 h de tratamento. A degradação fotoeletroquímica dos corantes laranja-brilhante de *remazol* e *laranja 16*, sobre ânodos de Ti/TiO₂, mostrou-se altamente eficiente, descolorindo a solução e provocando significativa desmineralização dos orgânicos depois do tratamento.

Em geral, apesar de efetivas, as técnicas de adsorção são lentas, não viáveis financeiramente e aplicáveis apenas em pequena escala. Por outro

lado, apesar da nanofiltração e da osmose reversa serem empregadas em grandes volumes de efluentes de modo rápido e satisfatório, apresentam alto custo e a limpeza das membranas é problemática (GUARATINI e ZANONI, 2000).

A oxidação com oxidantes clorados pode formar produtos tóxicos ou não-biodegradáveis. O uso de ozônio pode ser eficiente porque age rapidamente nos centros nucleofílicos do corante, destruindo sua estrutura ressonante responsável pela cor, porém, apresenta alto custo (CIARDELLI e RANIERI, 2001).

Os processos oxidativos avançados, baseados na geração do radical reativo $\bullet\text{OH}$, podem promover a degradação de corantes em poucos minutos, sendo um método potencialmente interessante (VINODGOPAL *et al.*, 1989).

Para corantes como o índigo e outros semelhantes, que apresentam-se na forma de moléculas altamente estáveis, insolúveis em meio aquoso e recalcitrantes, sua floculação deverá envolver uma etapa de pré-tratamento, usando coagulantes/floculantes como alumínio, sulfato ferroso ou polieletrólitos. A desvantagem deste método está na formação de grandes quantidades de lodo, cuja posterior degradação apresenta sérios problemas (MANU e CHAUDHARI, 2003).

Já na eletroflotação, não há necessidade da etapa de adição de floculantes. Adicionalmente, a formação do lodo residual indesejável pode ser evitada através de um processo eletroquímico baseado na geração de bolhas de gás (geralmente, O_2 ou H_2), as quais substituem os aditivos floculantes. O processo consiste, ao todo, em quatro etapas: (1) geração de pequenas bolhas de gás; (2) contato entre as bolhas e as partículas em suspensão; (3) adsorção das pequenas bolhas de gás na superfície das partículas e (4) ascensão do conjunto partículas/bolhas para a superfície. Assim, toda a matéria em suspensão é eletroflotada, provocando o clareamento do líquido tratado e na superfície, forma-se uma camada de espuma contendo as partículas flotadas, que são facilmente removidas.

Ciardelli e Ranieri (2001) mostraram que a eletrofloculação pode ser um método promissor no processo de reciclagem da água, uma vez que combina a oxidação parcial do poluente, por via eletrolítica, com a precipitação físico-química ou eletroquímica do lodo. No caso específico de efluentes contendo o índigo blue, este método, em princípio, poderá adequar-se perfeitamente, uma vez que combina a etapa de eletro-oxidação em que o leucoíndigo (solúvel) se transforma no corante índigo blue, que é insolúvel, e este se precipita como partícula emulsificada.

Verifica-se, em ensaios de bancada, que a cor é completamente removida, mas nos ensaios laboratoriais da indústria algumas inconformidades são apresentadas, conforme pode-se observar nos laudos 3 e 6 da tabela abaixo:

Tabela 5 - Remoção de cor (Pt Co).

Laudo	Cor
1	45,82%
2	65,16%
3	1,55%
4	88,83%
5	62,72%
6	-2,09%

Uma explicação pode ser atribuída aos procedimentos operacionais da estação, que estavam sendo ajustados e, no momento das coletas, a ETE poderia estar operando de forma não regular. Adicionalmente, o método colorimétrico baseado no padrão Pt/Co pode sofrer interferência para o padrão marrom, típico do ferro que está presente no efluente, o que explicaria as inconformidades apresentadas pelos laudos 3 e 6.

5.5 SÓLIDOS

A grande dificuldade do sistema atualmente instalado na indústria consiste na remoção de sólidos, que são forçados a decantar, quando tendem a flotar. Intervenções periódicas no sistema são necessárias a fim de remover os sólidos depositados nos containers, mas são dispendiosas financeiramente, além de requererem uma parada trimestral do processo produtivo para a operação.

A tabela 16 apresenta uma análise dos sólidos totais presentes no efluente para a entrada (equalizador) e saída, logo após os decantadores e antes da passagem pelos filtros. Verifica-se que o nível de sólidos ainda é grande, o que sobrecarrega o sistema de filtração, requerendo intervenções constantes dos operadores.

Tabela 6 - Análises de sólidos totais no efluente bruto e antes dos filtros (mg/L).

Laudo	ST	STF	STV
1	-35,60%	-53,35%	38,57%
2	2,15%	-6,28%	36,90%
3	1,73%	-2,86%	14,71%
4	43,23%	40,46%	59,31%
5	2,93%	-8,33%	46,85%
6	42,43%	40,42%	52,48%

O incremento na quantidade de sólidos é facilmente explicado pelo processo eletrolítico, que conforme equação de Faraday, pode prever a quantidade de ferro ionizada através da corrente elétrica utilizada, mas observa-se que as análises apresentam valores muito diferentes e grandes variações tanto para entrada quanto para saída.

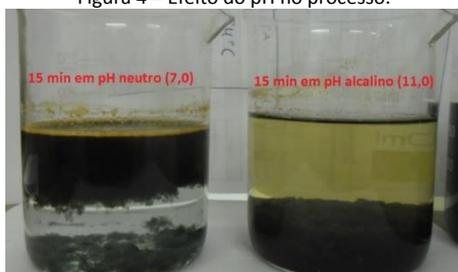
É esperado que o nível de sólidos totais aumente após a célula eletrolítica, já que há desgaste dos eletrodos, como observado em bancada. Os sólidos totais fixos, constituídos de sais solúveis, tendem a diminuir devido a precipitação pela formação dos hidróxidos correspondentes ou então pela oxidação

eletrolítica, e conseqüente formação de óxidos estáveis.

No processo atualmente instalado, há acúmulo em diversas operações unitárias do sistema. A retirada periódica dos sólidos dever ser feita por sucção, já que o sistema instalado não dispõe de descarga de fundo e os tanques não possuem fundo cônico. Uma alteração da etapa de remoção de sólidos através da instalação de flutuadores de ar dissolvido e filtro de areia para polimento final está sendo implantada, a fim de corrigir esta inadequação.

Outro fator que pode contribuir para as grandes oscilações nos resultados é atribuído ao pH inicial do processo. Na indústria foram instalados decantadores para a remoção dos sólidos, que tendem a flotar. Para evitar a flotação, o pH inicial é elevado (11,0), e então é feita a eletrólise. Testes de bancada efetuados com pH 11,0 e pH 7,0 (neutro) demonstram resultados diferentes, com pode ser observado na figura abaixo.

Figura 4 – Efeito do pH no processo.



Observa-se a flotação em pH neutro e a decantação em pH alcalino, mas a remoção da cor do efluente é prejudicada neste último, principalmente pela presença de sólidos residuais, o que pode explicar a diferença da eficiência da remoção da DQO, que foi de 98% para o primeiro e 56% para o segundo ensaio.

5.6 SURFACTANTES

Pelas análises, verifica-se a baixa eficiência na remoção de surfactantes não fosforados, e, ao contrário dos outros parâmetros, verifica-se um incremento na maioria dos resultados.

Tabela 7 - Remoção de surfactantes (mg/L).

Laudo	Surfactantes
1	-12,14%
2	-10,74%
3	10,96%
4	55,80%
5	-18,09%
6	-39,53%

Uma explicação para o incremento da quantidade de surfactantes decorre da adição hidróxido de sódio e cloreto férrico ao sistema, a fim

de melhorar a decantação dos sólidos. O hidróxido pode saponificar alguns compostos orgânicos, enquanto que o cloreto de ferro é proveniente de efluente recuperado da indústria galvânica, com altos teores de desengraxantes e zinco.

Após instalado, o sistema de flotação passará a não utilizar mais hidróxido de sódio para elevar o pH do meio e é esperada melhora significativa para estes parâmetros.

5.7 ÓLEOS E GRAXAS

Uma das maiores eficiências, dos sistemas eletrolíticos é a remoção de óleos e graxas e soluções altamente emulsificadas. No processo instalado, verifica-se que a eficiência está tendendo para seu máximo, mas ocorreram inconformidades não identificadas que alteraram os resultados. Neste caso, também é considerado que o cloreto férrico, utilizado como auxiliar, esteja contaminado com óleos e graxas.

Tabela 8 - Remoção de óleos e graxas totais (mg/L).

Laudo	Óleos e graxas totais
1	46,78%
2	35,79%
3	-292,32%
4	60,68%
5	88,46%
6	91,67%

Tabela 9 - Remoção de óleos e graxas minerais(mg/L).

Laudo	Óleos e graxas
1	75,00%
2	88,89%
3	9,91%
4	83,33%
5	-101,62%
6	75,00%

Em face destas e outras constatações observadas durante a operação do sistema, verifica-se que o controle de pH de entrada deverá ser rigidamente controlado e mantido a neutralidade;

O tempo de residência (4,25 min) é menor que o tempo de projeto (8 min);

O sólido gerado tende a flotar, mas é forçado a decantar pela adição de adensadores químicos;

Os tanques não possuem formato adequado para descarga de fundo e o lodo gerado sai com excesso de umidade.

6 CONCLUSÃO

Através deste trabalho, verifica-se que o tratamento de efluentes por eletrólise, também conhecido como eletrofloculação, é eficiente, apresentando excelentes resultados para fósforo,

nitrogênio, metais, óleos e graxas, fenóis, patógenos e cor.

A remoção de patógenos se dá através da oxidação causada pelos radicais *OH, formados durante a eletrólise, com poder de oxidação superior ao do cloro e também pela aglutinação destes, junto aos flocos de hidróxido de ferro.

Constata-se, através das análises de monitoramento, uma baixa eficiência na remoção de surfactantes ou até seu incremento, que aliados aos resultados para óleos e graxas, leva a crer na possibilidade destes estarem sendo adicionados ao sistema através do cloreto férrico, utilizado como auxiliar químico, que é proveniente de efluente recuperado da indústria galvânica.

A abrangência do método não é restrita a efluentes têxteis, mas possui relevância e excelência principalmente para efluentes de difícil trato, onde por meios biológicos ou físico-químicos tradicionais são impossibilitados, seja pelas características químicas ou pela restrição de custo operacional.

O processo de tratamento de efluentes via eletrólise pode ser muito interessante também para tratamento de efluentes sanitários, devido ao seu poder sanitizante, por não gerar odores e exigir um sistema compacto e de fácil operação.

Ambientalmente, verifica-se que este tipo de sistema não sofre restrições quanto a sua instalação em regiões residenciais ou densamente habitadas, e que a possibilidade de produzir águas de reuso é muito viável.

O sistema instalado na indústria, estudo deste trabalho, apesar de possuir algumas operações unitárias que necessitem revisão, como a remoção dos sólidos, é extremamente funcional e seu verdadeiro potencial poderá ser demonstrado após a execução dos ajustes necessários.

ABER, S.; AMANI-GHADIM, A. R.; MIRZAJANI, V. Removal of Cr(VI) from polluted solutions by electrocoagulation: modeling of experimental results using artificial neural network. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.171, p.484–490, 2009.

ANDRADE, F. de. **Remoção de cor de efluentes têxteis com tratamento de lodos ativados e um polieletrólito orgânico**. 2003. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ANDRADE, L. S.; LUÍS AUGUSTO M. RUOTOLO L. A. M.; ROCHA-FILHO, R. C.; BOCCHI, N.; BIAGGIO, S. R.; INIESTA, J.; GARCÍA-GARCIA, V.; MONTIEL, V. On the performance of Fe and Fe, F doped Ti–Pt/PbO₂ electrodes in the electrooxidation of the Blue Reactive 19 dye in simulated textile wastewater. **Chemosphere**. [S. l.] v.66, p.2035–2043, 2007.

ANDRADE, R. C. B. de; SOUZA, M. F. L. de; COUTO, E. da C. G. Influência de efluentes têxteis e alimentícios sobre o metabolismo e propriedades físicas e

químicas do rio Piauitinga (Sergipe). **Quím. Nova**. [S. l.], v.21, n.4, p.424–427, 1998.

ANGELIS, D. F. de; CORSO, C. R.; BIDOIA, E. D.; MORAES, P. B.; DOMINGOS, R. N.; ROCHA-FILHO, R. C. Eletrólise de resíduos poluidores: I - efluente de uma indústria liofilizadora de condimentos. **Quím. Nova**. [S. l.], v.21, n.1, p.20–24, 1998.

AOUJ, S.; KHELIFA, A.; DROUICHE, N.; HECINI, M.; HAMITOUCHE, H. Electrocoagulation process applied to wastewater containing dyes from textile industry. **Chemical Engineering and Processing**. [S. l.] v.49, p.1176–1182, 2010.

AOUNI, A.; FERSI, C.; ALI, M. B. S.; DHAHBI, M. Treatment of textile wastewater by a hybrid electrocoagulation/nanofiltration process. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.168, p.868–874, 2009.

AQUINO NETO, S. de; MAGRI, T. C.; SILVA, G. M. da; ANDRADE, A. R. de. Tratamento de resíduos de corante por eletrofloculação: um experimento para cursos de graduação em química. **Quím. Nova**. [S. l.], v.34, n.8, p.1468–1471, 2011.

ARAUJO, F. V. F.; YOKOYAMA, L.; TEIXEIRA, L. A. C. Remoção de cor em soluções de corantes reativos por oxidação com H₂O₂/UV. **Quím. Nova**. [S. l.] v.29, n.1, p.11–14, 2006.

ARROYO, M. G.; PÉREZ-HERRANZ, V.; MONTAÑÉS, M. T.; GARCÍA-ANTÓN, J.; GUIÑÓN, J. L. Effect of pH and chloride concentration on the removal of hexavalent chromium in a batch electrocoagulation reactor. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.169, p.1127–1133, 2009.

ARSLAN-ALATON, I.; KABDASLI, I.; VARDAR, B.; TÜNAY, O. Electrocoagulation of simulated reactive dyebath effluent with aluminum and stainless steel electrodes. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.164, p.1586–1594, 2009.

BALASUBRAMANIAN, N.; KOJIMA, T.; SRINIVASAKANNAN, C. Arsenic removal through electrocoagulation: kinetic and statistical modeling. **Chemical Engineering Journal** [S. l.] v.155, p.76–82, 2009.

BARBOSA, I. M.; TERAN, F. J. C. Eletrocoagulação-flotação aplicada ao tratamento de efluentes gerados na indústria de reciclagem de plásticos. **Holos Environment**. [S. l.], v.9, n.1, p.93–112, 2009.

BAYRAMOGLU, M.; EYVAZ, M.; KOBYA, M. Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation economical evaluation. **Chemical Engineering Journal** [S. l.] v.128, p.155–161, 2007.

BAYRAMOGLU, M.; KOBYA, M.; CAN, O. T.; SOZBIR, M. Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. **Separation and Purification**

Technology. [S. l.] v.37, p.117-125, 2004.

BERTAZZOLI, R.; PELEGRINI, R. Descoloração e degradação de poluentes orgânicos em soluções aquosas através do processo fotoeletroquímico. **Quím. Nova.** [S. l.], v.25, n.3, p.470-476, 2002.

BRITO, J. F. de; FERREIRA, L. de O.; SILVA, J. P. da; RAMALHO, T. C. Treatment for purification water of biodiesel using electroflocculation. **Quím. Nova.** [S. l.] v.35, n.4, p.728-732, 2012.

BRUNELLI, T. F. T.; GUARALDO, T. T.; PASCHOAL, F. M. M.; ZANONI, M. V. B. Degradação fotoeletroquímica de corantes dispersos em efluente têxtil utilizando fotoanodos de Ti/TiO₂. **Quím. Nova.** [S. l.], v.32, n.1, p.67-71, 2009.

BUKHARI, A. A. Investigation of the electrocoagulation treatment process for the removal of total suspended solids and turbidity from municipal wastewater. **Bioresource Technology.** [S. l.] v.99, p.914-921, 2008.

CAN, O. T.; KOBYA, M.; DEMIRBAS, E.; BAYRAMOGLU, M. Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. **Chemosphere.** [S. l.] v.62, p.181-187, 2006.

CAÑIZARES, P.; JIMÉNEZ, C.; MARTÍNEZ, F.; RODRIGO, M. A.; SÁEZ, C. The pH as a key parameter in the choice between coagulation and electrocoagulation for the treatment of wastewaters. **Journal of Hazardous Materials.** [S. l.] v.163, p.158-164, 2009.

CATANHO, M.; MALPASS, G. R. P.; MOTHEO, A. de J. Avaliação dos tratamentos eletroquímico e fotoeletroquímico na degradação de corantes têxteis. **Quím. Nova.** [S. l.], v.29, n.5, p.983-989, 2006.

CERQUEIRA, A. A. **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis.** 2006. 111 p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CHAFI, M.; GOURICH, B.; ESSADKI, A. H.; VIAL, C.; FABREGAT, A. Comparison of electrocoagulation using iron and aluminium electrodes with chemical coagulation for the removal of a highly soluble acid dye. **Desalination.** [S. l.] v.281, p.285-292, 2011.

CHAVALPARIT, O. ONGWANDEE, M. **J. Environ. Sci.** v.21, p.1491, 2009.

CHEN, X.; CHEN, C.; YUE, P. I. **Sep Purif. Technol.** v.19, p.65, 2000.

CHOU, W.; WANG, C.; CHANG, C. Comparison of removal of Acid Orange 7 by electrooxidation using various anode materials. **Desalination.** [S. l.] v.266, p.201-207, 2011.

COUTO JUNIOR, O. M.; STRÖHER, A. P.; DE BARROS, M. A. S. D.; PEREIRA, N. C. Caracterização e otimização do tratamento de efluente têxtil por coagulação-floculação, utilizando coagulante natural tanino. **Ciências Exatas e Naturais.** [S. l.] v.14, n.1, 2012.

DALVAND, A.; GHOLAMI, M.; JONEIDI, A.; MAHMOODI, N. M. Dye removal, energy consumption and operating cost of electrocoagulation of textile wastewater as a clean process. **Clean – Soil, Air, Water.** [S. l.] v.39, n.7, p.665-672, 2011.

DANESHVAR, N.; KHATAEE, A. R.; DJAFARZADEH, N. The use of artificial neural networks (ANN) for modeling of decolorization of textile dye solution containing C. I. Basic Yellow 28 by electrocoagulation process. **Journal of Hazardous Materials.** [S. l.] v.B137, p.1788-1795, 2006.

DANESHVAR, N.; OLADGARAGOZE, A.; DJAFARZADEH, N. Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: an investigation of the effect of operational parameters. **Journal of Hazardous Materials.** [S. l.] v.B129, p.116-122, 2006.

DASCALU, T.; ACOSTA-ORTIZ, S. E.; MORALES, M. O.; COPEAN, J.; **Opt. Lasers Eng.** v.34, p.179, 2000.

DÁVILA-JIMÉNEZ, M. M.; ELIZALDE-GONZÁLEZ, M. P.; GUTIÉRREZ-GONZÁLES, A.; PELÁEZ-CID, A. A.; J. **Chromatography.** v.889, p.253, 2000.

EMAMJOMEH, M. M.; SIVAKUMAR, M. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. **Journal of Environmental Management.** [S. l.] v.90, p.1663-1679, 2009.

ERTUGAY, N.; ACAR, F. N. Removal of COD and color from Direct Blue 71 azo dye wastewater by Fenton's oxidation: kinetic study. **Arabian Journal of Chemistry.** [S. l.] 2013.

ESPINOZA-QUIÑONES, F. R.; FORNARI, M. M. T.; MÓDENES, A. N.; PALÁCIO, S. M.; SILVA JR., F. G. da; SZYMANSKI, N.; KROUMOV, A. D.; TRIGUEROS, D. E. G. Pollutant removal from tannery effluent by electrocoagulation. **Chemical Engineering Journal** [S. l.] v.151, p.59-65, 2009.

EYVAZ, M.; KIRLAROGLU, M.; AKTAS, T. S.; YUKSEL, E. The effects of alternating current electrocoagulation on dye removal from aqueous solutions. **Chemical Engineering Journal** [S. l.] v.153, p.16-22, 2009.

FAN, L.; ZHOU, Y.; YANG, W.; CHEN, G.; YANG, F. Electrochemical degradation of aqueous solution of Amaranth azo dye on ACF under potentiostatic model. **Dyes and Pigments.** [S. l.] v.76, p.440-446, 2008.

FENG, C.; SUGIURA, N.; SHIMADA, S.; MAEKAWA, T. Development of a high performance electrochemical wastewater treatment system. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.B103, p.65-78, 2003.

FREITAS, K. R. de. **Caracterização e reuso de efluentes do processo de beneficiamento da indústria têxtil**. 2002. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

GALINDO, C.; JACQUES, P.; KALT, A.; J. **Photochem. Photobiol**, v.141, p.47, 2001.

GOMES, J. A. G.; DAIDA, P.; KESMEZ, M.; WEIR, M.; MORENO, H.; PARGA, J. R.; IRWIN, G.; MCWHINNEY, H.; GRADY, T.; PETERSON, E.; COCKE, D. L. Arsenic removal by electrocoagulation using combined Al-Fe electrode system and characterization of products. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.B139, p.220-231, 2007.

H. CHENIK, H.; ELHAFDI, M.; DASSAA, A.; ESSADKI, A. H.; AZZI, M. Removal of real textile dyes by electrocoagulation/electroflotation in a pilot external-loop airlift reactor. **Journal of Water Resource and Protection**. [S. l.] v.5, p.1000-1006, 2013.

HANAY, Ö.; HASAR, H. Effect of anions on removing Cu²⁺, Mn²⁺ and Zn²⁺ in electrocoagulation process using aluminum electrodes. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.189, p.572-576, 2011.

HEIDMANN, I.; CALMANO, W. Removal of Zn(II), Cu(II), Ni(II), Ag(I) and Cr(VI) present in aqueous solutions by aluminium electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.152, p.934-941, 2008.

KAMIDA, H. M.; DURRANT, L. R.; MONTEIRO, R. T. R.; ARMAS, E. D. de. Biodegradação de efluente têxtil por *Pleurotus sajor-caju*. **Quím. Nova**. [S. l.], v.28, n.4, p.629-632, 2005.

KHATAEE, A. R.; VATANPOUR, V.; AMANI GHADIM, A. R. Decolorization of C.I. Acid Blue 9 solution by UV/Nano-TiO₂, Fenton, Fenton-like, electro-Fenton and electrocoagulation processes: a comparative study. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.161, p.1225-1233, 2009.

KOBYA, M.; BAYRAMOGLU, M.; EYVAZ, M. Techno-economical evaluation of electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.148, p.311-318, 2007.

KOBYA, M.; DEMIRBAS, E.; CAN, O. T.; BAYRAMOGLU, M. Treatment of levafix orange textile dye solution by electrocoagulation. **Journal of**

Hazardous Materials. [S. l.] v.B132, p.183-188, 2006.

KÖRBAHTI, B. K.; TANYOLAÇ, A. Continuous electrochemical treatment of simulated industrial textile wastewater from industrial components in a tubular reactor. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.170, p.771-778, 2009.

KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P.; MORAES, S. G. de; DURAN, N. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Quím. Nova**. [S. l.], v.25, n.1, p.78-82, 2002.

LACASA, E.; CAÑIZARES, P.; SÁEZ, C.; FERNÁNDEZ, F. J.; RODRIGO, M. A. Removal of nitrates from ground water by electrocoagulation. **Chemical Engineering Journal** [S. l.] v.171, p.1012-1017, 2011.

LINARES-HERNÁNDEZ, I.; BARRERA-DÍAZ, C.; BILYEU, B.; JUÁREZ-GARCÍARAJAS, P.; CAMPOS-MEDINA, E. A combined electrocoagulation-electrooxidation treatment for industrial wastewater. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.175, p.688-694, 2010.

LINARES-HERNÁNDEZ, I.; BARRERA-DÍAZ, C.; ROA-MORALES G.; BILYEU, B.; UREÑA-NÚÑEZ, F. *Influence of the anodic material on electrocoagulation performance*. **Chemical Engineering Journal** [S. l.] v.148, p.95-105, 2009.

MAHVI, A. H.; EBRAHIMI, S. J. A.; MESDAGHINIA, A.; GHARIBI, H.; SOWLAT, M. H. Performance evaluation of a continuous bipolar electrocoagulation/electrooxidation-electroflotation (ECEO-EF) reactor designed for simultaneous removal of ammonia and phosphate from wastewater effluent. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.192, p.1267-1274, 2011.

MENESES, J. M. de; VASCONCELOS, R. de F.; FERNANDES, T. de F.; ARAUJO, G. T. de. Tratamento do efluente do biodiesel utilizando a eletrocoagulação/flotação: investigação dos parâmetros operacionais. **Quím. Nova**. [S. l.], v.35, n.2, p.235-240, 2011.

MERZOUK, B.; GOURICH, B.; SEKKI, A.; MADANI, K.; VIAL, C.; BARKAOUI, M. Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process. **Chemical Engineering Journal** [S. l.] v.149, p.207-214, 2009.

MERZOUK, B.; YAKOUBI, M.; ZONGO, I.; LECLERC, J.; PATERNOTTE, G.; PONTVIANNE, S.; LAPICQUE, F. Effect of modification of textile wastewater composition on electrocoagulation efficiency. **Desalination**. [S. l.] v.275, p.181-186, 2011.

MOISÉS, T.; PATRICIA, B.; BARRERA-DÍAZ, C. E.; GABRIELA, R.; NATIVIDAD-RANGEL, R. Treatment of industrial effluents by a continuous system: electrocoagulation - activated sludge. **Bioresource Technology**. [S. l.] v.101, p.7761-7766, 2010.

- MORENO-CASILLAS, H. A.; COCKE, D. L.; GOMES, J. A. G.; MORKOVSKY, P.; PARGA, J. R.; PETERSON, E. Electrocoagulation mechanism for COD removal. **Separation and Purification Technology**. [S. l.] v.56, p.204-211, 2007.
- NIGAM, P.; BANAT, I. M.; SINGH, D.; MARCHAN, R. Microbial process for the decolorization of textile effluent containing azo, diazo and reactive dyes. **Process Biochemistry**. Grã Bretanha, v.31, n.5, p.435-442, 1996.
- OLIVEIRA, D. M.; LEAO, M. M. D. Avaliação da biodegradabilidade de efluentes têxteis do beneficiamento secundário de malhas de poliéster tratados com reagente de Fenton. **Quím. Nova**. [S. l.], v.32, n.9, p.2282-2286, 2009.
- PASCHOAL, F. M. M.; TREMILIOSI-FILHO, G. Aplicação da tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais. **Quím. Nova**. [S. l.], v.28, n.5, p.766-772, 2005.
- PHALAKORNKULE, C.; POLGUMHANG, S.; TONGDAUNG, W.; KARAKAT, B.; NUYUT, T. Electrocoagulation of blue reactive, red disperse and mixed dyes, and application in treating textile effluent. **Journal of Environmental Management**. [S. l.] v.91, p.918-926, 2010.
- PHALAKORNKULE, C.; SUKKASEM, P.; MUTCHIMSATTHA, C. Hydrogen recovery from the electrocoagulation treatment of dye-containing wastewater. **International Journal of Hydrogen Energy**. [S. l.] v.35, p.10934-10943, 2010.
- PIYA-AREETHAM, P.; SHENCHUNTHICHA, K.; HUNSOM, M. Application of electrooxidation process for treating concentrated wastewater from distillery industry with a voluminous electrode. **Water Research**. [S. l.] v.40, p.2857-2864, 2006.
- QUADROS, S. S. de. **Tratamento e reutilização de efluentes têxteis gerados nos tingimentos de tecidos de algodão**. 2005. 110 p. Dissertação (Mestrado em Química). Centro de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2005.
- RAGHU, S.; LEE, C.; CHELLAMMAL, S.; PALANICHAMY, S.; BASHA, C. A. Evaluation of electrochemical oxidation techniques for degradation of dye effluents— a comparative approach. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.171, p.748-754, 2009.
- RAJU, G. B.; KARUPPIAH, M. T.; LATHA, S. S.; PARVATHY, S.; PRABHAKAR, S. Treatment of wastewater from synthetic textile industry by electrocoagulation–electrooxidation. **Chemical Engineering Journal** [S. l.] v.144, p.51-58, 2008.
- RAJU, G. B.; KARUPPIAH, M. T.; LATHA, S. S.; PRIYA, D. L.; PARVATHY, S.; PRABHAKAR, S. Electrochemical pretreatment of textile effluents and effect of electrode materials on the removal of organics. **Desalination**. [S. l.] v.249, p.167-174, 2009.
- SALVADOR, T.; MARCOLINO JR., L. H.; PERALTA-ZAMORA, P. Degradação de corantes têxteis e remediação de resíduos de tingimento por processos Fenton, foto-Fenton e eletro-Fenton. **Quím. Nova**. [S. l.], v.35, n.5, p.932-938, 2012.
- SECULA, M. S.; CAGNON, B.; OLIVEIR, T. F.; CHEDEVILLE, O.; FAUDUET, H. Removal of acid dye from aqueous solutions by electrocoagulation/GAC adsorption coupling: kinetics and electrical operating costs. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. [S. l.] v.43, p.767-775, 2012.
- SENGIL, I. A.; ÖZACAR, M. The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.161, p.1369-1376, 2009.
- SILES, J. A.; MARTÍN, M. A.; CHICA, A. F.; MARTIN, A. **Bioresour. Technol.** v.101, p.6315, 2010.
- SILVA, K. K. de O. S. **Caracterização do efluente líquido no processo de beneficiamento do índigo têxtil**. 2007. 156 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.
- SONG, S.; HE, Z.; QIU, J.; XU, L.; CHEN, J. Ozone assisted electrocoagulation for decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution: an investigation of the effect of operational parameters. **Separation and Purification Technology**. [S. l.] v.55, p.238-245, 2007.
- TCHAMANGO, S.; NANSEU-NJIKI, C. P.; NGAMENI, E.; HADJIEV, D.; DARCHEN, A. Treatment of dairy effluents by electrocoagulation using aluminium electrodes. **Science of the Total Environment**. [S. l.] v.408, p.947-952, 2010.
- THAKUR, C.; SRIVASTAVA, V. C.; MALL, I. D. Electrochemical treatment of a distillery wastewater: parametric and residue disposal study. **Chemical Engineering Journal** [S. l.] v.148, p.496-505, 2009.
- UN, U. T.; ALTAY, U.; KOPARAL, A. S.; OGUTVEREN, U. B. Complete treatment of olive mill wastewaters by electrooxidation. **Chemical Engineering Journal** [S. l.] v.139, p.445-452, 2008.
- UN, U. T.; AYTAC, E. Electrocoagulation in a packed bed reactor-complete treatment of color and cod from real textile wastewater. **Journal of Environmental Management**. [S. l.] v.123, p.113-119, 2013.
- URTIAGA, A.; RUEDA, A.; ANGLADA, A.; ORTIZ, I. Integrated treatment of landfill leachates including

electrooxidation at pilot plant scale. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.166, p.1530-1534, 2009.

WANG, A.; QU, J.; LIU, H.; GE, J. Degradation of azo dye Acid Red 14 in aqueous solution by electro kinetic and electrooxidation process. **Chemosphere**. [S. l.] v.55, p.1189-1196, 2004.

ZAIED, M.; BELLAKHAL, N. Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.163, p.995-1000, 2009.

ZANELLA, G.; SCHARF, M.; VIEIRA, G. A.; PERALTA-ZAMORA, P. Tratamento de banhos de tingimento têxtil por processos foto-Fenton e avaliação da potencialidade de reuso. **Quím. Nova**. [S. l.], v.33, n.5, p.1039-1043, 2010.

ZHANG, X. D.; HAO, J. D.; LI, W. S.; JIN, H. J.; YANG, J.; HUANG, Q. M.; LU, D. S.; XU, H. K. Synergistic effect in treatment of C.I. Acid Red 2 by electrocoagulation and electrooxidation. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.170, p.883-887, 2009.

ZHAO, X.; ZHANG, B.; LIU, H.; QU, J. Removal of arsenite by simultaneous electro-oxidation and electro-coagulation process. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.184, p.472-476, 2010.

ZIDANE, F.; DROGUI, P.; LEKHLIF, B.; BENSAID, J.; BLAIS, J.; BELCADI, S.; EL KACEMI, K. Decolourization of dye-containing effluent using mineral coagulants produced by electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.155, p.153-163, 2008.

ZODI, S.; POTIER, O.; LAPICQUE, F.; LECLERC, J. Treatment of the textile wastewaters by electrocoagulation: effect of operating parameters on the sludge settling characteristics. **Separation and Purification Technology**. [S. l.] v.69, p.29-36, 2009.

ZONGO, I.; MAIGA, A. H.; WÉTHÉ, J.; VALENTIN, G.; LECLERC, J.; PATERNOTTE, G.; LAPICQUE, F. Electrocoagulation for the treatment of textile wastewaters with Al or Fe electrodes: compared variations of COD levels, turbidity and absorbance. **Journal of Hazardous Materials**. [S. l.] v.169, p.70-76, 2009.