

Valor agregado: Inserção da produção mais limpa na indústria têxtil

Marluce Teixeira Andrade Queiroz¹, Millor Godoy Sabará²,
Carolina Andrade Queiroz³, Camila Costa Amorim¹, Mônica Maria Diniz Leão¹.

¹Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG

²Departamento de Pós-Graduação, UEMG

³Departamento de Pós-Graduação, UNILESTE

e-mail: marluce.queiroz@bol.com.br

Submetido em 04/12/2013; Versão revisada em 18/05/2014; Aceito em 21/05/2014

RESUMO

Indústrias têxteis geram grandes volumes de águas residuais contendo compostos recalcitrantes. A gravidade do distúrbio se relaciona diretamente com o incremento na concentração de corantes nos efluentes exigindo ações mitigadoras. Com base na revisão da literatura, foram identificadas as medidas capazes de introduzir os conceitos de Produção Mais Limpa (PL) em uma empresa fabril favorecendo a remoção dos poluentes. Dentre essas, destacou-se a probabilidade da alteração na linha de tratamento incluindo-se o Processo Oxidativo Avançado (POA). A relevância da divulgação dos resultados desse estudo é entendida como um catalisador positivo para apropriação de técnicas que envolvem a proteção dos ecossistemas.

Palavras-Chave: Indústria Têxtil, Processos Oxidativos Avançados, Produção Mais Limpa.

ABSTRACT

Textile industries generate large volumes of wastewater containing recalcitrant compounds. The severity of the disorder is directly related to the increase in the concentration of dyes in effluents. Based on the literature review, the able to introduce the concepts of Cleaner Production (P + L) in a manufacturing company favoring the removal of pollutants measures have been identified. Among these, there is the likelihood of change in the treatment line including the Advanced Oxidative Process (AOP). The importance of disseminating the results of this study is understood as a positive catalyst for appropriation of techniques involving ecosystem protection.

Keywords: Textile Industry Advanced Oxidation Processes, Cleaner Production.

INTRODUÇÃO

Em geral, as águas residuais têxteis têm altas concentrações de substâncias refratárias aos métodos usualmente aplicados na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) para redução da Demanda Biológica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e concentração dos metais pesados. Bertolo *et al.* (2009) pontuam que os contaminantes podem se infiltrar no solo e atingir o lençol freático afetando ainda o padrão sanitário das águas subterrâneas, constituindo-se em risco grave para a saúde pública, particularmente

afetando a comunidade rural. O salto de qualidade em proteção dos ecossistemas cresce quando são estabelecidas medidas que promovem o equilíbrio entre o custo de descontaminação e tratamento, com forte ênfase na remoção de poluentes recalcitrantes e / ou persistentes e sendo assim, o desenvolvimento de técnicas que envolvem a contenção de danos associadas à viabilidade econômica, tem crescido nos anos recentes (BAUTISTA *et al.*, 2008).

No atendimento destes quesitos se destaca a inclusão dos Processos Oxidativos Avançados (POA) na

linha de tratamento. Os POA são considerados como tecnologias limpas, pois não há formação de lodo e transferência de fase dos poluentes, sendo os produtos finais, gás carbônico, água, íons inorgânicos e subprodutos menos tóxicos. Estes processos podem, ainda, ser utilizados para a degradação de compostos orgânicos em fase aquosa ou adsorvidos numa matriz sólida (MOLINARI *et al.*, 2002). Nessa premissa, analisaram-se benefícios pertinentes à inclusão da referida técnica no segmento têxtil com base na revisão da literatura. A relevância deste estudo se traduz na produção de resultados direcionados em ações que contribuam para que o segmento produtivo têxtil se insira no conceito de ecoeficiência em atendimento das necessidades das gerações presentes e futuras.

INDÚSTRIA TÊXTIL

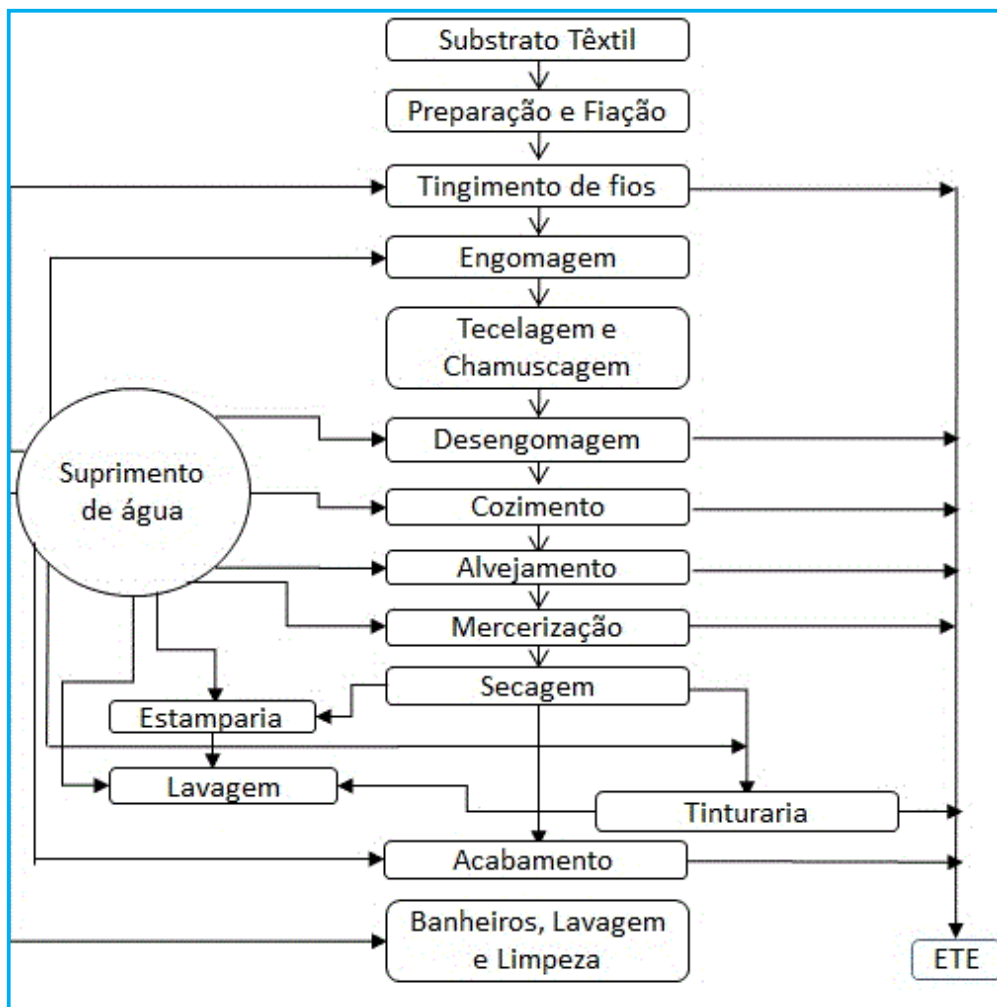
Na indústria têxtil, a matéria-prima é constituída

por fibras provenientes da petroquímica (insumos químicos) ou da agropecuária (insumos naturais). Essas fibras são processadas basicamente através de cinco etapas essenciais: fiação, beneficiamento, tecelagem plana e/ou malharia, enobrecimento (acabamento ou beneficiamentos, confecção e distribuição através das lojas ou revendedores (CETESB: SINDTÊXTIL, 2009).

O beneficiamento consiste na preparação dos fios para o seu uso final ou não, envolvendo tingimento, engomagem, retorção (linhas, barbantes, fio, etc.) e tratamentos especiais. Destaca-se a seleção dos corantes que é priorizada em função da destinação final do tecido (CETESB: SINDTÊXTIL, 2009).

Guaratinini e Zanoni (2000) informam que os corantes são estruturas complexas que diferem quanto à classificação química e forma de fixação na fibra sendo encontrados corantes ácidos, a cuba, azóicos, branqueadores, de enxofre, diretos, dispersivos,

Figura 1 – Etapas da indústria têxtil com geração de efluentes líquidos.
Fonte: Braile e Cavalcanti, 1993 apud Freitas, 2002



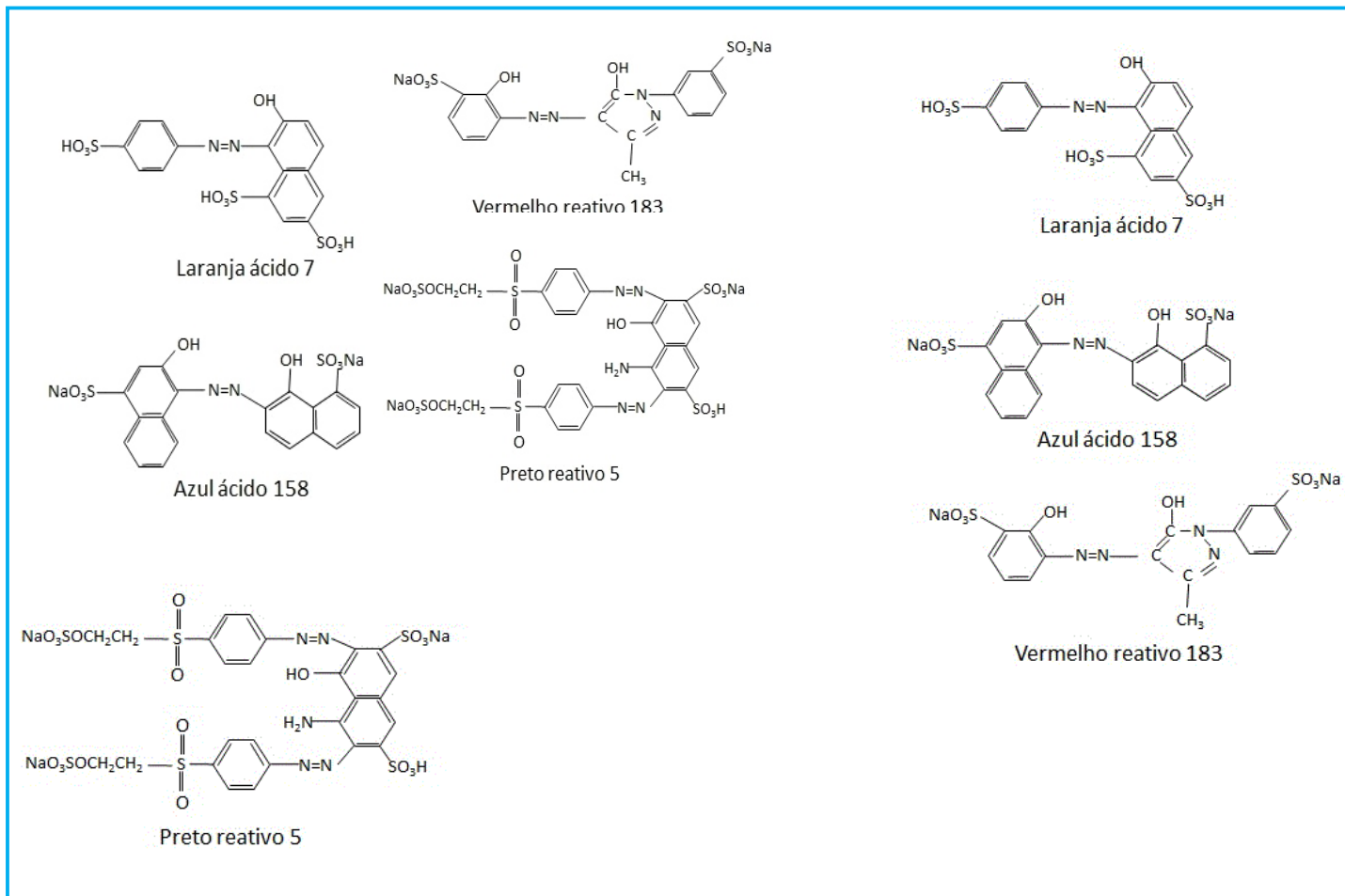


Figura 2 - Estruturas típicas de corantes usados na indústria têxtil. FONTE: ALMEIDA *et. al.*, 2004

reativos e pré-metalizados que são selecionados em conformidade com o processo produtivo e mercado consumidor. Sendo assim a busca por metodologias capazes de otimizar o tratamento de efluentes atrelado à recuperação dos corantes se apresenta, em geral, favorável ao balanço econômico já que promove a redução dos custos em tratamentos terciários que visam atender os requisitos legais da legislação ambiental.

Outra situação preocupante se relaciona com a presença dos metais pesados em diversos corantes usuais (Tabela 1) e sua consequente biodisponibilidade no efluente têxtil demandando medidas de controle. Essas substâncias constituem-se em contaminantes ambientais de elevada nocividade que ao serem lançados nos cursos de água podem

comprometer a biodiversidade. Vale destacar que em função do efeito cumulativo, na camada lipídica de invertebrados e peixes, decorrente da exposição crônica

Tabela 1 - Corantes típicos contendo metais pesados. FONTE: CETESB, 2013

Metal	Nome Comercial do Corante	Efeitos Adversos à População
Cádmio (Cd)	Corante de Cádmio Ômega Vermelho	Anemia e Osteoporose.
Cobalto (Co)	Azul Ingrain 5 Azul Vat 29	Disfunção da glândula tireóide, dermatites, cardiomiopatia, hepatotoxicidade, nefrotoxicidade e policitemia.
Cobre (Cu)	Azul Ácido 249 Azul Direto 86 e 87 Azul Ingrain 1; 13 Azul Pigmento 15;17 Azul Reativo 7	Contribui para esquizofrenia e altera o metabolismo da glicose no cristalino.
Cromo (Cr)	Verde Ingrain 3 Verde Pigmento 7; 37 Ácido Crômico Verde do Óxido Crômico Violeta 1	O cromo na forma hexavalente (Cr ⁺⁶) é tóxico e pode causar lesão renal e hepática.
Níquel (Ni)	Azul Ingrain 14	Lesões hepáticas e pulmonares.

Oxidante	Potencial de Oxidação (eV)
Radical hidroxila ($\cdot\text{OH}$)	2,80
Ozônio (O_3)	2,07
Cloro elementar (Cl_2)	1,36

Fonte: Pera-Titus *et al.*, 2004.

Tabela 2 - Poder oxidante de algumas espécies químicas

térmica e stripping ou extração em função da sua caracterização físico-química em atendimento às exigências da legislação ambiental (MONTALVAO *et al.*, 2006).

O tratamento secundário (Figura 3) favorece a remoção da matéria orgânica, através de reações bioquímicas que podem se utilizar de métodos aeróbios ou anaeróbios apresentando cada um deles as suas especificidades e valores agregados. No método aeróbio busca-se simular o processo natural de degradação dos contaminantes e são utilizados equipamentos do tipo eletro-mecânico para homogeneizar e garantir o contato íntimo entre a matéria orgânica e os microorganismos decompositores. O fornecimento do oxigênio é outro requisito essencial para conduzir a degradação dos compostos biotransformáveis. Em contrapartida, no método anaeróbio, acontece a estabilização de resíduos feita pela ação de microorganismos, na ausência de ar ou de oxigênio elementar produzindo o lodo residual (MORUZZI E REALI, 2010).

Em sequência ocorre o tratamento terciário (Figura 3) visando à remoção de poluentes específicos, sendo obtido um efluente com característica de baixos teores em nutrientes (fósforo e nitrogênio) assim como microorganismos patogênicos (NEUFFER, 2004). Insere-se nessa perspectiva o uso do Processo Oxidativo Avançado (POA) que amplia as perspectivas quanto ao seu reuso direto ou indireto na planta industrial (SODRÉ *et al.*, 2010).

PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO

No tratamento de efluentes a aplicação dos Processos Oxidativos Avançados (POA) constitui-se

preferencialmente em um tratamento terciário que viabiliza o aumento da reativa química do agente oxidante resultando no cracking das substâncias complexas e formação de moléculas menores que são facilmente removidas. Essas vantagens garantem que os Processos Oxidativos Avançados (POA) se constituam em respostas aplicáveis nos diversos processos produtivos com excelentes resultados, entretanto em função dos custos ainda são pouco utilizados (SODRÉ *et al.*, 2010).

Pera-Titus *et al.* (2004) informam que os POA são baseados na geração de radical hidroxila (OH), um forte agente oxidante, capaz de degradar moléculas orgânicas recalcitrantes em função do elevado potencial da espécie química correspondente a 2,80eV, sendo superior ao do cloro (Cl_2) e ao do ozônio (O_3) respectivamente a 1,36eV e 2,07eV (Tabela 2).

Os POA são classificados em sistemas homogêneos, quando utilizam peróxido de hidrogênio (H_2O_2) em combinação com íons de ferro II (Reativo de Fenton), ozônio (O_3), luz ultravioleta (UV) ou ultra-som (US); e sistemas heterogêneos quando utilizam óxidos ou metais fotoativos, como o dióxido de titânio (TiO_2), um dos catalisadores mais empregados nesse tratamento (TEIXEIRA e JARDIM, 2004). Na Tabela 3 são apresentados os principais sistemas por meio dos quais o radical hidroxila ($\cdot\text{OH}$) pode ser gerado.

Nos sistemas homogêneos (Tabela 3), em geral, o uso da radiação UV combinada com oxidantes fortes como o ozônio (O_3) e o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) promove maiores remoções dos compostos recalcitrantes e/ou persistentes (BAHNEMANN, 2004).

Os diversos estudos sobre os sistemas heterogêneos (Tabela 3) também apresentam maior

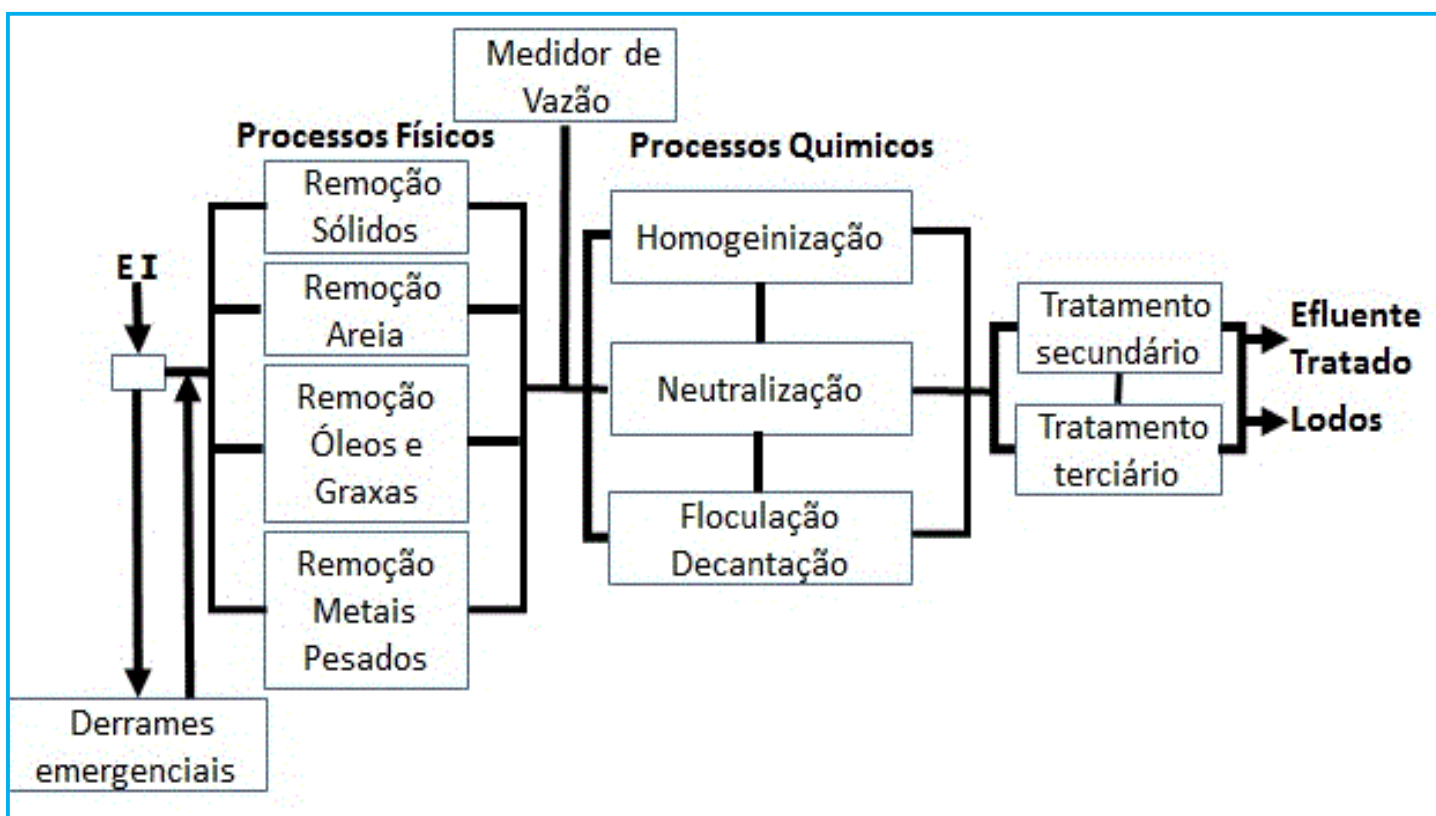
e prolongada poderá ocorrer à extrapolação do Limite de Tolerância Biológico (LTB) causando a morte de vários espécimes. Além disso, a biomagnificação pode afetar a saúde pública, oportunizando a prevalência das patologias, tais como, as lesões incapacitantes, o câncer, distúrbios neurológicos, entre outros (COMNINELLIS *et al.*, 2008).

Essa perspectiva adversa aponta a imperiosa necessidade quanto ao desenvolvimento de estratégias competitivas, fundamentadas nos preceitos da Produção Mais Limpa (P+L) que é entendida como um paradigma essencial permeando a questão do desenvolvimento sustentável através do qual a poluição passou a ser sinônimo de desperdício nas empresas responsáveis (ARGENTA, 2007). Trata-se da busca de sintonia entre os objetivos da produção e decréscimo das disfunções ambientais, já que a metodologia confere maior eficiência ao processamento industrial, redução dos poluentes, uso racional de matérias-primas, água, insumos energéticos, corantes e aplicação de técnicas adequadas no tratamento dos efluentes afirmam Henrique e Quelhas (2007).

TRATAMENTO DAS ÁGUAS RESIDUÁRIAS

As operações unitárias que integram o processamento têxtil apresentam elevado consumo de insumos exigindo grande aporte financeiro e mão de obra especializada. Além disso, absorvem em torno de 15% do total da água para fins industriais ao nível da realidade mundial, ou seja, cerca de $3 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{ano}$ exigindo também a inclusão do planejamento ambiental como estratégia essencial ao empreendimento (MONTALVAO *et al.*, 2006). Freitas (2002) reforça que o suprimento de água deve garantir o desenvolvimento das diversas etapas operacionais com a efetiva recuperação dos resíduos líquidos. Além disso, na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) devem ser submetidos aos processos adequados de descontaminação incluindo processos físicos de remoção de sólidos, areia, óleos, graxas e metais pesados, processos químicos envolvendo as operações de homogeneização, neutralização, floculação e decantação (Figura 3). Finalizando com tratamentos ao nível secundário e terciário sendo possível a aplicação do tratamento biológico, adsorção com carvão ativado, troca iônica, processos de separação

Figura 3 – Esquema do Tratamento de Efluentes Industriais. Fonte: MONTALVAO *et al.*, 2006



Sistemas Homogêneos	Com Irradiação
	O ₃ /UV
	H ₂ O ₂ /UV
	Feixe de Elétrons
	US
	H ₂ O ₂ /US
	US/UV
	Sem Irradiação
Sistemas Heterogêneos	O ₃ /H ₂ O ₂
	O ₃ /HO ⁻
	H ₂ O ₂ /Fe ⁺² (Fenton)
	Com Irradiação
	TiO ₂ /O ₂ /UV
TiO ₂ /H ₂ O ₂ /UV	
Sem Irradiação	
Eletron-Fenton	

Fonte: TEIXEIRA e JARDIM (2004).

Tabela 3 - Sistemas típicos de processos oxidativos avançados

eficiência na remoção em relação às técnicas convencionais indicando que o uso da luz UV sempre melhora o processo de descontaminação das águas residuárias. Quanto maior for essa energia, maior será a quantidade de radicais OH liberados no meio reacional, aumentando as taxas de degradação do poluente (GALINDO *et al.*, 2001).

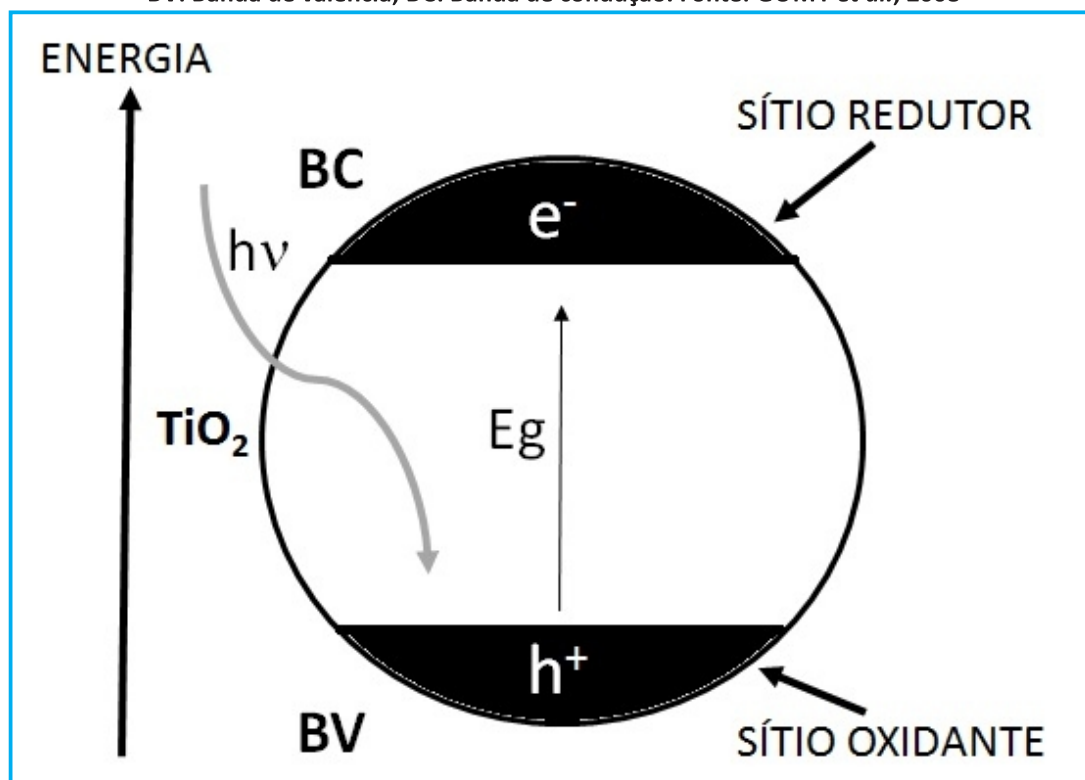
Nos sistemas heterogêneos (Tabela 3) a radiação UV é utilizada

para promover a fotoativação do catalisador (TiO₂), que ocorre quando o semicondutor é iluminado por um fóton de energia maior ou igual que a da diferença entre a banda de valência (BV) e a banda de condução (BC), conhecida como energia de “band-gap”, e então, o elétron anteriormente situado na banda de condução, é promovido para a banda de valência (transição eletrônica), criando assim, o par elétron/lacuna (SELVAM *et al.*, 2006). O fotocatalisador irradiado promove, então, a transição eletrônica de um elétron formando sítios oxidantes e redutores (Figura 4) capazes de catalisar reações de oxidação de diversos compostos orgânicos, podendo atingir elevados níveis de mineralização (SELVAM *et al.*, 2006).

Em geral, tanto nos sistemas homogêneos quanto nos sistemas heterogêneos, a taxa de degradação da matéria orgânica aumenta conforme o

Figura 4 - Esquema representativo da partícula do semicondutor e sua ativação.

BV: Banda de valência; BC: Banda de condução. Fonte: GUMY *et al.*, 2008



Contaminante	Tratamento	Eficiência	Referência
Fenol	Fóton-fenton	95%	Nogueira e Modé, 2002
Fenol	Fotocatálise heterogênea	93%	Silva <i>et. al.</i> , 2013.
Herbicidas	Fóton-fenton	100%	Trovó <i>et al.</i> , 2005
Clorofila a	Fotocatálise heterogênea	76%	Cabral, 2010
M. aeruginosa	Fotocatálise heterogênea	89%	Cabral, 2010
C. recalcitrantes	Fotocatálise heterogênea	53%	Pascoal <i>et al.</i> , 2007
Cromo VI	Fotocatálise heterogênea	52%	Pascoal <i>et al.</i> , 2007
COT	Fóton-Fenton	40%	Rodrigues <i>et.al.</i> , 2002.
COT	Fóton-Fenton	53%	Neamtu <i>et al.</i> , 2002.
C-H-Ar	Reagente Fenton	47%	Silva <i>et al.</i> , 2012.
Cor	Fóton-Fenton	98%	Neamtu <i>et.al.</i> , 2003.
Cor	Fóton-Fenton	65%	Neamtu <i>et.al.</i> , 2003.
Cor	O ₃ /HO ⁻	75%	Neamtu <i>et.al.</i> , 2003.
DQO	Reagente Fenton	92%	Meric <i>et.al.</i> , 2005.
Cor	Fóton-Fenton	92%	Paroliin <i>et.al.</i> , 2013.

Tabela 4 - Eficiência e tipo de POA utilizado

aumento da intensidade da luz, sendo relevante para otimizar o processo à manutenção de um fluxo contínuo. O tempo de operação deve ser determinado experimentalmente, tendo em vista que existem diversas variáveis interferentes, tais como, a concentração inicial do poluente, a temperatura e o pH, dentre outras, que afetam significativamente o rendimento global da descontaminação (GUMY *et al.*, 2008).

O POA contribui para que o segmento têxtil se adeqüe aos paradigmas da produção mais limpa já que diminui a concentração de substâncias complexas à saída da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), aumentando a eficiência quanto à produção de moléculas simples, gás carbônico (CO₂) e água (H₂O), com benefícios econômicos e ambientais sejam em sistemas homogêneos ou heterogêneos. Alguns dos estudos relacionados com essa temática são apresentados na Tabela 4, explicitando as amplas possibilidades pertinentes à inserção do POA na linha de tratamento.

Vale destacar a remoção do contaminante é afetado pela complexidade de sua estrutura química e

das condições físico-químicas, tais como, pH, concentração de ferro e peróxido de hidrogênio e da carga orgânica devendo ser implementados ensaios práticos para definição das condições operacionais ótimas.

CONCLUSÃO

Conclui-se que a inclusão do POA no tratamento de efluentes têxteis contribui significativamente para se alcançar a remoção da cor e das substâncias recalcitrantes e/ou persistentes atuando como mecanismo auxiliar importante junto ao processo convencional.

Entende-se que se torna cada vez mais imperiosa a necessidade de estreitar as relações entre o potencial de inovação tecnológica e o planejamento ambiental incluindo-se o incremento nos recursos financeiros para essa linha de pesquisa no país.

Trata-se de uma medida ajustada aos preceitos da sustentabilidade do planeta e preservação das gerações presentes e futuras.

REFERÊNCIAS

- ARGENTA, D. O. F. Alternativas de melhoria no processo produtivo do setor moveleiro de Santa Maria/RS: Impactos Ambientais. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2007.
- BAHNEMANN, D. Photocatalytic water treatment: solar energy applications. *Solar Energy*, v.77, n.5, pp.445-459, 2004.
- BAUTISTA, P. MOHEDANO, A.F. CASAS, J. A. ZAZO, J. A. RODRIGUES, J.J. Review – Na overview of the application of Fenton oxidation to industrial wastewaters treatment. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology. Society of Chemical Industry*. 2008.
- BERTOLO, R. A.; MARCOLAN, L. N. O; BOUROTTE, C. Relações água-rocha e a hidrogeoquímica do cromo na água subterrânea de poços de monitoramento multiníveis de Urânia, SP, Brasil. *Geologia USP. Série Científica*, v. 9, p. 47-62, 2009.
- COMMINELLIS, C., KAPALKA, A., MALATO, S., PARSON, S. A. POULIOS, I.; MANTZAVINOS, D. Perspective Advanced oxidation processes for water treatment: advances and trends for R&D. *J Chem. Techno Biotechnology* 83:769–776, 2008.
- FREITAS, K. R. Caracterização e reuso de fluentes do processo de beneficiamento da indústria têxtil. UFSC, 2002. Dissertação (Mestre em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- GALINDO, C., JACQUES, P., KALT, A. Photooxidation of the phenylazonaphthol on TiO₂: Kinetic and mechanistic investigations. *Chemosphere*, v.45, pp.997-1005, 2001.
- GUMY, D., GIRALDO, S.A., RENGIFO, J., PULGARIN, C. *Applied Catalysis B: Environmental*. v. 78, p. 19, 2008.
- HENRIQUES, L. P.; QUELHAS, O. L. G. Produção Mais Limpa: Um exemplo para sustentabilidade nas organizações. 2007. Disponível em: <http://www1.sp.senac.br/hotsites/sigas/docs/20071016_CAS_ProducaoMaisLimpa.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2013.
- KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P.; MORAES, S. G. de; DURAN, N. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. *Quím. Nova*, vol. 25, n.1, pp. 78-82. 2002.
- MERIC, S., SELCUK, H., GALLO, M., BELGIORNO, V. Decolourisation and detoxicifying of Remazol Red dye and its mixture using Fenton's reagent, *Desalination*, 173 (3), 239-248, 2005.
- NEUFFER, D. Anaerobe Co-Fermentation von Konzentraten aus der Textilveredlungsindustrie (Co-fermentação anaeróbica de concentrados da indústria de beneficiamento têxtil). 1. ed. München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2004. v. 179. 227p.
- MOLINARI, R., PALMISANO, L.; DRIOLLI, E. Studies on various reactor configurations for coupling photocatalysis and membrane processes in water purification. *Journal of Membrane Science*, v. 206, n. 1-2, pp. 399-415, 2002.
- MONTALVAO, A. F. F.; Sant'Anna Jr, G.,L. ; DEZOTTI, M. ; Lima, A.,A. . Ozonation of a Complex Industrial Effluent: Oxidation of Organic Pollutants and Removal of Toxicity. *Ozone. Science & Engineering*, v. 28, p. 3-8, 2006.
- MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Characterization of Micro-Bubble Size Distribution and flow configuration in DAF Contact Zone by a Non-Intrusive Image Analysis System and Tracer Tests. *Water Science and Technology*, v. 61, p. 253-262, 2010.
- NEAMTU, M.; YEDILER, A.; SIMINICEANU, I.; KETTRUP, A.; J. Photochemical. A. *Photobiology*, v. 161, p. 87, 2003.
- PAROLIIN, F.; NASCIMENTO, U. M.; AZEVEDO, E. B. . Microwave-Enhanced UV/H₂O₂ degradation of an azo dye (tartrazine): Optimization, color removal, mineralization, and ecotoxicity. *Environmental Technology*, v. 34, p. 1247-1253, 2013.
- PERALTA-ZAMORA, P. G.; TIBURTIUS, E. R. L; DURAN, N.; MORAES, S. G.. Degradação enzimática de corantes têxteis. *Calquim*, v. 68, p. 32-37, 2002.
- PERA-TITUS, M.; GARCIA-MOLINA, V.; BAÑOS, M. A.; GIMÉNEZ, J.; ESPLUGAS, S. Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: a general review, *applied catalysis B. Environmental*, v. 47, p. 219– 256, 2004.
- SELVAM, K., MURUGANANDHAM, M., MUTHUVEL, I. The influence of inorganic oxidants and metals ions on semiconductor sensitized photodegradation of 4-fluorophenol. *Chemical Engineering Journal*., 2006.
- SEVIMLI, M. F.; KINACI, C. *Water Sci. Technol.* 2002, 45, 279.
- SILVA, W. L. da; LANSARIN, M. A.; MORO, C. C.. Síntese, caracterização e atividade fotocatalítica de catalisadores nanoestruturados de TiO₂ dopados com metais. *Quím. Nova*, vol.36, n.3, pp. 382-386, 2013.
- SILVA, L.A. da; TEIXEIRA, S. C. G.; PÉREZ, D. V.; AGUIAR, M. R. M. P. Impact of Chemical Oxidation on Brazilian Soils. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 23, p. 367-371, 2012.
- SODRE, F. F.; LOCATELLI, F.F.M.A. F.; JARDIM, W. F. Occurrence of Emerging Contaminants in Brazilian Drinking Waters: A Sewage-To-Tap Issue. *Water, Air and Soil Pollution*, v. 206, p. 57-67, 2010.
- UNEP (United Nations Environment Programma). *Cleaner production status report, 2001*, Disponível em <<http://www.unep.org>>. Acesso em: 02 ago. 2013.