



III-068 - UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO SIDERÚRGICO COMO CATALISADOR NA REAÇÃO DE FENTON PARA REMOÇÃO DE CORANTE TÊXTIL

Camila Costa de Amorim⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos na EE-UFGM/DESA.

Paula Regina Dutra

Graduanda em Engenharia Metalúrgica na Universidade Federal de Minas Gerais. Bolsista de Iniciação Científica pela FAPEMIG.

Mônica Maria Diniz Leão

Engenheira Química. Doutora em Engenharia Ambiental (INSA – França), Professora Associada, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais.

Regina F.P.M. Moreira

Engenheira Química. Doutora em Química, Professora Associada, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina.

Rubia Gomes Flores

Engenheira Ambiental. Mestre do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Hidráulica e Saneamento pela Universidade de Santa Maria. Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Laboratório de Energia e Meio Ambiente pela Universidade Federal de Santa Catarina.

Endereço⁽¹⁾: Avenida do Contorno, 842 – Centro, Belo Horizonte – MG. CEP 30110-060. Fone (31) 3409-1887, e-mail: camilacamorim@yahoo.com.br

RESUMO

A aplicabilidade do resíduo siderúrgico, o pó do desempoeiramento da ala de corrida do Alto-Forno, como fonte de ferro na reação de Fenton, para degradação do corante Reactive Red 195, foi investigada neste trabalho. O efeito das concentrações de H_2O_2 e corante na cinética de descoloração e na remoção da DQO foram estudados. As reações de descolorização e remoção de DQO através do Fenton, utilizando o resíduo siderúrgico, apresentaram-se dependente da concentração de peróxido de hidrogênio, e ocorreram sob a cinética de pseudo-primeira ordem. O tratamento apresentou eficiências de remoção de cor, DQO e COT maiores que 96% para as condições experimentais empregadas. A utilização do resíduo siderúrgico como fonte de ferro mostrou-se bastante promissor, uma vez que elimina a necessidade da utilização de reagente, além de aliar o reúso de resíduos ao tratamento de efluentes.

PALAVRAS-CHAVE: Processos Oxidativos Avançados, Reagente de Fenton, Resíduo Siderúrgico, Indústria Têxtil, Reactive Red 195.

INTRODUÇÃO

Existem cerca de 10.000 diferentes corantes e pigmentos comerciais, sendo que mais de 700.000 toneladas são produzidas anualmente em todo o mundo.. Os corantes reativos representam atualmente cerca de 20 a 30% do total de corantes produzidos no mercado, uma vez que são usados no tingimento das fibras de algodão que constitui cerca de metade do consumo de fibras do mundo (Papic et.al., 2004).

A água é utilizada na indústria têxtil como meio de transporte para os produtos químicos que entram no processo, bem como para a remoção dos excessos daqueles produtos considerados indesejáveis para o fio ou para o tecido. A geração de efluentes líquidos é o principal problema ambiental da atividade de acabamento primário e secundário de produtos têxteis. Estima-se que cerca de 10-15% dos corantes têxteis utilizados sejam liberados nos efluentes durante a etapa de tingimento. Esses efluentes caracterizam-se pela elevada carga orgânica, com parcela significativa resistente ao tratamento biológico e concentrações residuais de corantes muitas vezes elevadas, especialmente no caso de corantes reativos, cuja fixação ao tecido é da ordem de 70% do total aplicado nas fibras.



A descoloração de corantes é dificultada pela complexidade da estrutura molecular e sua origem sintética. Corantes azóicos compreendem uma importante classe de compostos orgânicos sintéticos, que se caracterizam pela presença de uma ou mais ligações azo ($-N=N-$). Eles representam cerca de 50% da produção mundial corantes e são amplamente utilizados em uma série de indústrias, tais como têxteis, curtumes, alimentícias, cosméticos e de papel de impressão, sendo a indústria têxtil o maior consumidor (Sleiman et al., 2007).

O lançamento desses efluentes em ambientes naturais é bastante problemático tanto para a vida aquática, uma vez que, além de ser esteticamente desagradável, dificulta a penetração da luz nesses ambientes, perturbando os processos biológicos; quanto para os humanos, devido ao fato de que alguns corantes azóicos e seus subprodutos, como as aminas aromáticas, são altamente cancerígenos (Cicek et al., 2007). As aminas aromáticas são formadas como metabólitos da clivagem redutiva das ligações azo, e são, muitas vezes, mais tóxicas do que as moléculas intactas dos corantes (Azbar et al., 2007).

O tratamento biológico não apresenta uma solução completa para o problema devido à baixa biodegradabilidade de muitos corantes (Lucas & Peres, 2006). Em geral, as indústrias têxteis no Brasil tratam seus efluentes através da tecnologia de lodos ativados, sendo necessária a aplicação de tratamentos adicionais para completa eliminação da cor. Outras formas de eliminação dos corantes baseiam-se na utilização de processos integrados que envolvem combinações entre sistemas biológicos, físicos e químicos (Galindo et al., 2001; Robinson et al., 2001). Entretanto, as técnicas de tratamento tradicionalmente aplicadas para remoção desses contaminantes, como a coagulação/floculação, ultrafiltração, osmose reversa ou eliminação por adsorção em carvão ativado, além de serem mais dispendiosas, somente fazem uma transferência de fase do poluente, não resolvendo essencialmente o problema, e necessitam de pós-tratamento dos resíduos sólidos gerados ou a regeneração do material adsorvente.

A biodegradabilidade de compostos refratários pode ser consideravelmente elevada através de processos químicos de tratamento. Novas tecnologias agrupadas sob a denominação Processos Oxidativos Avançados (POA), têm se mostrado capaz de converter poluentes orgânicos em espécies químicas menos agressivas. Os POAs se baseiam em processos físico-químicos capazes de produzir alterações profundas na estrutura química dos poluentes e são definidos como processos envolvendo a geração e uso de agentes oxidantes fortes, principalmente radicais hidroxila (HO^\bullet) (Tarr, 2003).

A descoloração e mineralização de corantes é objeto de inúmeros estudos, com intensa utilização do reagente de Fenton, em sistemas homogêneos e heterogêneos, com ou sem irradiação de luz ultravioleta. Em efluentes têxteis, os radicais hidroxilas gerados através dos POA atacam as ligações a insaturadas azóicas presentes no cromóforo promovendo a descolorização do efluente (Hsueh, 2005).

O termo “reagente de Fenton” se refere a misturas aquosas de $Fe(II)$ e peróxido de hidrogênio. O processo global da reação pode ser representado pela seguinte equação (Tarr, 2003):



onde Fe^{2+} e Fe^{3+} representam as espécies hidratadas, $Fe(H_2O)_6^{2+}$ e $Fe(H_2O)_6^{3+}$, respectivamente. A reação da equação (1) é conhecida como a reação de Fenton, embora muitas outras reações ocorram nos sistemas Fenton. A utilidade básica do reagente de Fenton na degradação de poluentes é a formação do radical hidroxila, um oxidante muito forte e não seletivo, capaz de degradar uma grande variedade de poluentes.

A utilização de óxidos de ferro como catalisadores no processo Fenton é denominado de Fenton heterogêneo, e diversas pesquisas têm sido relatadas nessa área, inclusive para remoção de corantes (Andreozzi et al., 2002, Chou et al., 2001, Centi et al., 2000, Dantas et al., 2006). Resíduos sólidos com alto teor de ferro podem ser boas fontes de catalisadores em sistemas heterogêneos, diminuindo o consumo de sais de ferro, além da possibilidade de regeneração e reutilização do catalisador. No entanto, tem sido demonstrado que os catalisadores a base de óxido de ferro perdem a sua atividade, devido aos efeitos da lixiviação desses catalisadores metálicos em meio ácido.

O pó do desempoeiramento da ala de corrida do alto-forno é uma mistura de óxidos, cujos principais elementos são os óxidos de ferro e finos de carvão ou coque. Ele também contém silício, cálcio, magnésio e outros óxidos elementares menores em menor quantidade. A reutilização direta desse resíduo geralmente não é possível, uma vez que contém alguns elementos indesejáveis como zinco, chumbo e metais alcalinos, o que



pode causar dificuldades operacionais no alto-forno. Além disso, a disposição adequada desses resíduos exige procedimentos especiais, devido às suas características ambientais, acima de tudo dos metais presentes (Das et al., 2007). Sendo assim, a recuperação do resíduo e sua valorização são soluções mais nobres.

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a aplicabilidade do pó do desempoeiramento da ala de corrida do alto-forno como catalisador na peroxidação do corante têxtil Reactive Red 195, um corante azo da classe reativa, extensivamente usado pelas indústrias têxteis, cuja estrutura complexa e origem sintética dificultam a sua descolorização nos sistemas de tratamento convencionais, e determinar a cinética de descolorização e remoção de DQO através do processo Fenton.

MATERIAIS E MÉTODOS

O corante utilizado foi o Reactive Red 195 (RR195), obtido junto a uma indústria têxtil e utilizado sem nenhum tipo de tratamento prévio. Apesar de apresentar baixa DQO (aprox. 500mg/g), o RR195 de difícil degradação em sistemas de tratamento convencionais. A Figura 1 apresenta a fórmula estrutural do corante em estudo.

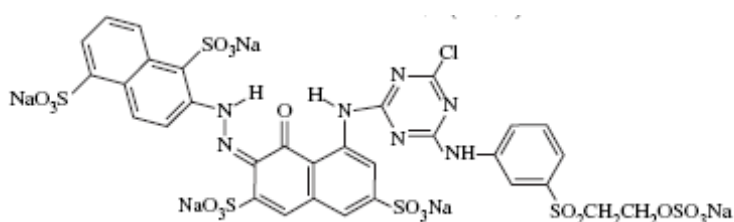


Figura 1 – Fórmula estrutural do corante Reactive Red 195.

A solução aquosa do corante RR195 foi preparada através da sua dissolução, na concentração desejada, em água destilada. Todos os ensaios foram conduzidos em béqueres de 1 litro, protegidos da luz, colocados sob agitação a 120 rpm no equipamento de Jar Test, com pH = 3,0 ajustado com NaOH, 1N, e H₂SO₄, 1N. Foi utilizado peróxido de hidrogênio P.A. 30% (m/v), marca Merck. Todos os reagentes utilizados eram de pureza analítica.

O catalisador utilizado foi o pó do desempoeiramento da ala de corrida do Alto-Forno, cordialmente cedido pela Gerda Aço Minas – Unidade Ouro Branco. A Tabela 1 apresenta uma caracterização das partículas do resíduo e da solução corante utilizada. Os minerais presentes no resíduo foram identificados por Difração de raios-X (Philips X'PERT), e a composição química por via úmida.

Tabela 1 – Características do resíduo e da solução aquosa de corante utilizados

Resíduo da siderurgia		Solução Corante Reactive Red 195	
Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
Área BET (m ² /g)	3,4	pH	5,80
Volume total do poro (cm ³ /g)	1,11x10 ⁻³	λ _{máx} (nm)	517
Diâmetro do poro (nm)	13,2	DQO (mg/L)	60,0
Tamanho das partículas (µm)	< 75	TOC (mg/L)	20,9
pH _{pzc}	10,0		

Pesquisas anteriores sobre a capacidade de adsorção do resíduo, indicaram a necessidade de grandes quantidades de resíduo (> 50 g/L), e elevados tempo de contato (> 30 horas), para este fim (Amorim et al., 2007). Sendo assim, os ensaios de Fenton foram conduzidos com 1g/L do resíduo em contato com a solução corante, em pH = 3,0 por no mínimo 30 horas a fim de garantir o tempo de equilíbrio de adsorção, eliminando assim a interferência da adsorção na descolorização. Além disso, este tempo de contato possibilita a lixiviação do ferro necessário para a reação. Posteriormente a reação era iniciada com a adição do peróxido de hidrogênio. A influência da concentração do corante foi avaliada através de diferentes concentrações da solução corante (20 a 100mg/L) e 40mg/L de peróxido de hidrogênio. Da mesma forma, a influência da concentração de peróxido de hidrogênio foi avaliada para a concentração inicial de corante igual a 100mg/L e diferentes concentrações de peróxido de hidrogênio (20 a 100mg/L).

As reações foram acompanhadas através das análises da concentração do corante, determinada espectrofotometricamente no comprimento de onda de máxima absorção ($\lambda_{\text{máx}} = 517 \text{ nm}$), em espectrofotômetro UV- Visível (UV- 1650 PC, Shimadzu), da variação da DQO da solução corante ao longo do tempo, segundo APHA (2005), e através da variação do COT utilizando-se (TOC-V CPN, Shimadzu). A interferência do peróxido de hidrogênio residual foi eliminada nas análises de DQO e COT através da adição da enzima catalase (460 mg/L, em tampão fosfato - 0.04M, pH 7; Sigma cat. N° C9322) de acordo com o método citado por Poole (2004). Todas as amostras analisadas foram previamente filtradas em membranas GV (durapore) em PVDF com diâmetro do poro de $0,22 \mu\text{m}$ da marca Milipore (GVWP01300).

RESULTADOS

A Figura 2 e a Tabela 2 apresentam os resultados das análises de difração de raio-X e composição química por via úmida, obtidos para o resíduo em estudo.

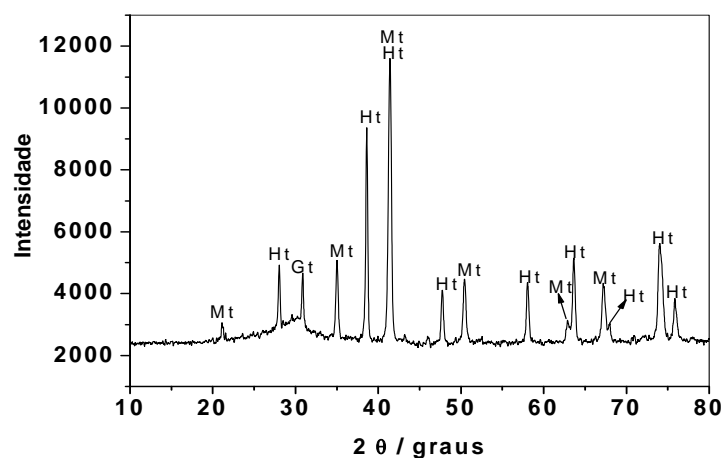


Figura 2 – Análise de difração de raios-X (DRX) do resíduo do desempoeiramento da ala de corrida do Alto-Forno. (Mt – magnetita, Ht – hematita, Gt – grafite).

Os resultados da análise de difração por raios-X (Figura 2) confirmaram a elevada presença de óxidos de ferro, sendo que a hematita e a magnetita estão presentes em grandes quantidades. Há também uma quantidade moderada de quartzo. A análise da composição química (Tabela 2) indicou altas concentrações de ferro e carbono. Os ensaios de lixiviação de ferro solúvel mostraram resultados de teores de Fe total crescente e contínuo ao longo das 41 horas.

Tabela 2 – Resultados da composição química dos principais componentes do resíduo do desempoeiramento da ala de corrida do Alto-Forno.

Constituintes Principais	Composição (%)	Constituintes Principais	Composição (%)
FeT	54,17	MgO	0,28
C	13,94	S	0,25
SiO ₂	4,21	P	0,074
CaO	2,28	ZnO	0,06
Al ₂ O ₃	1,15	Ni	0,051
MnO	0,60	MnT	-
K ₂ O	0,51	TiO ₂	-
Na ₂ O	0,46	Umidade	0,13

Fonte: Gerdau Aço Minas.



Influência da concentração de peróxido de hidrogênio

A Figura 3 apresenta os resultados da influência da concentração do peróxido de hidrogênio na descolorização do corante Reactive Red 195 através da reação de Fenton, utilizando-se o resíduo siderúrgico como fonte de ferro.

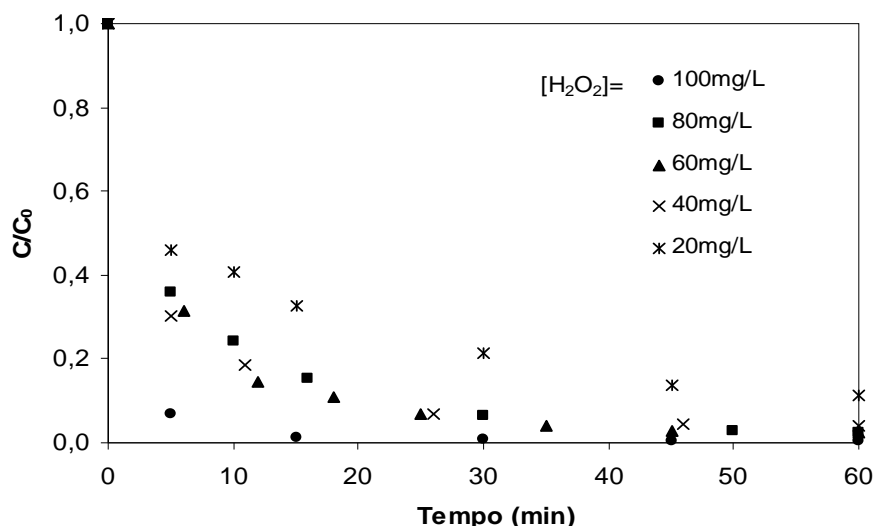


Figura 3 – Efeito da concentração de peróxido de hidrogênio na decomposição do Corante Reactive Red 195 através da reação Fenton. Condições experimentais: concentração do corante: 100 mg/L; concentrações de peróxido de hidrogênio: 20 a 100 mg.L⁻¹; dosagem do resíduo: 1 g.L⁻¹; tempo de adsorção: 31 horas; concentração média de ferro total solúvel: 6,0 mg.L⁻¹; temperatura = 25°C ± 1; agitação = 120 rpm; pH = 3; amostras filtradas em membranas 0,22µm de diâmetro.

De acordo com a Figura 3, a reação de descolorização mostrou-se dependente da concentração de peróxido de hidrogênio através do Fenton utilizando-se o resíduo siderúrgico como catalisador. A velocidade da reação aumenta à medida que se aumenta a concentração de peróxido de hidrogênio, devido à maior produção dos radicais hidroxila. Para concentrações de H₂O₂ entre 40 e 80 mg.L⁻¹ a eficiência na remoção de cor é praticamente a mesma; além disso, para tempos de reação maiores que 45 minutos, com exceção da menor concentração de peróxido de hidrogênio (20 mg.L⁻¹), todas as outras concentrações de peróxido de hidrogênio alcançaram mais de 98% de eficiência de descolorização. Os estudos cinéticos indicaram que a reação de descolorização utilizando-se o reagente de Fenton, com o resíduo siderúrgico, ocorreu segundo uma cinética de pseudo-primeira ordem.

Influência da concentração do corante

A influência da concentração do corante na descoloração através da reação de Fenton com resíduo siderúrgico foi primeiramente estudada para a concentração de peróxido de hidrogênio igual a 100 mg.L⁻¹. Entretanto os resultados (não apresentados) mostraram que para todas as concentrações da solução corante testadas a taxa de descolorização era a mesma, indicando que a alta concentração de peróxido de hidrogênio aplicada influenciou na taxa de descolorização impedindo a percepção da influência da concentração do corante na reação de descolorização. Desse modo, o experimento foi novamente realizado com uma concentração menor de peróxido de hidrogênio (40 mg.L⁻¹) para as mesmas concentrações iniciais das soluções corantes testadas, e os resultados são apresentados na Figura 4.

De acordo com a Figura 4 percebe-se que a concentração do corante apresentou pouca influência na taxa de descolorização utilizando-se o reagente de Fenton com resíduo siderúrgico como catalisador. Para tempos de reação acima de 15 minutos todas as concentrações testadas apresentaram eficiência de mais de 80% de remoção de cor.

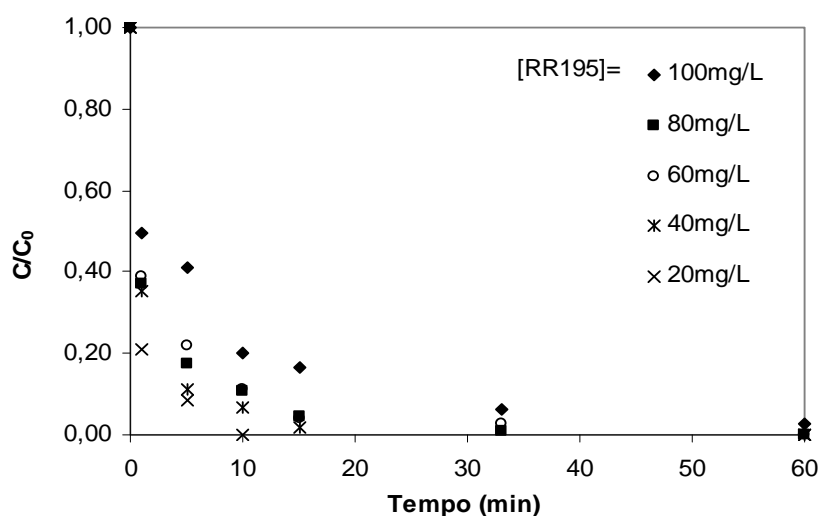


Figura 4 – Efeito da concentração do corante Reactive Red 195 na descolorização através da reação Fenton. Condições experimentais: concentrações do corante: 100, 80, 60, 40, 20 mg.L⁻¹; concentração de peróxido de hidrogênio: 100 mg.L⁻¹; dosagem do resíduo: 1 g.L⁻¹; tempo de adsorção: 41 horas; concentração média de ferro total solúvel: 8 mg.L⁻¹; temperatura = 25°C ± 1; agitação = 120 rpm; pH = 3; amostras filtradas em membranas 0,22 µm de diâmetro

Remoção da carga orgânica

Os resultados da remoção da carga orgânica (DQO), acompanhados ao longo do tempo para diferentes concentrações de peróxido de hidrogênio, encontram-se reportados na Figura 5. Pode-se perceber que, da mesma forma as reações de descolorização, a concentração do peróxido de hidrogênio exerceu influência positiva sobre a taxa de degradação do corante RR195, uma vez que maiores concentrações de peróxido de hidrogênio repercutiram em maiores taxas de remoção de DQO. A Figura 6 compara as eficiências de remoção de cor, DQO e COT, para a concentração de 100 mg.L⁻¹ de peróxido de hidrogênio, e concentração inicial da solução corante de 100 mg.L⁻¹, atingindo eficiências maiores de 95%, comprovando que a reação de Fenton utilizando o resíduo siderúrgico como fonte de ferro é eficiente não só para remoção da cor, mas também para mineralização do corante RR195.

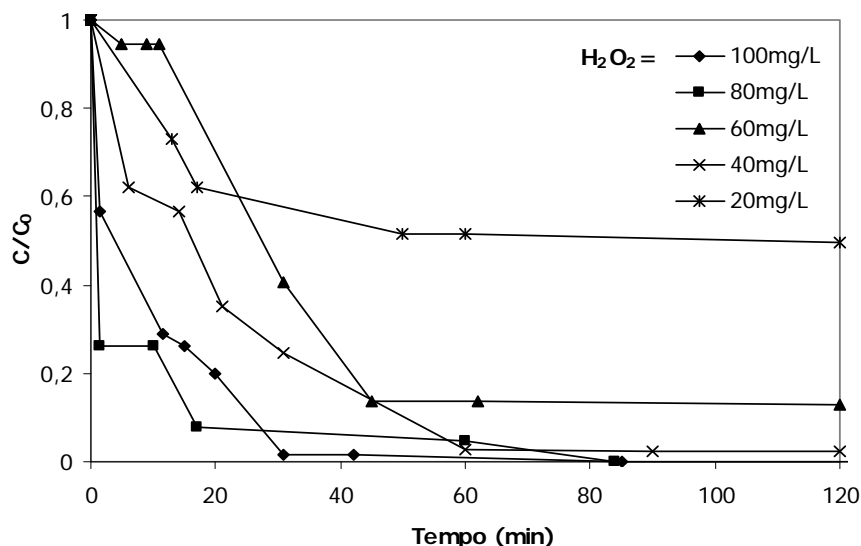


Figura 5 – Efeito da concentração de peróxido de hidrogênio na remoção de DQO da solução do Corante Reactive Red 195 através da reação Fenton. Condições experimentais: concentração do corante: 100 mg/L; concentrações de peróxido de hidrogênio: 20 a 100 mg/L; dosagem do resíduo: 1g/L; tempo de adsorção: 31 horas; concentração média de ferro total solúvel: 6,0 mg/L; temperatura = 25°C ± 1; agitação = 120 rpm; pH = 3; amostras filtradas em membranas 0,22µm de diâmetro.

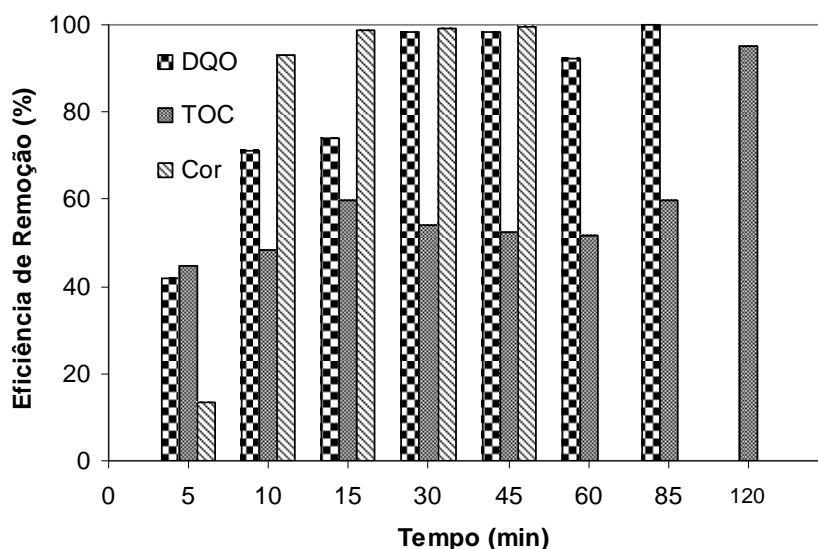


Figura 6 – Eficiências de remoção de cor, DQO e através da reação Fenton, utilizando o resíduo siderúrgico. Condições experimentais: concentração do corante: 100 mg/L; concentrações de peróxido de hidrogênio: 100 mg/L; dosagem do resíduo: 1g/L; tempo de adsorção: 31 horas; concentração média de ferro total solúvel: 6,0 mg/L; temperatura = 25°C ± 1; agitação = 120 rpm; pH = 3,0; amostras filtradas em membranas 0,45µm de diâmetro.

CONCLUSÕES

O presente trabalho mostra que o pó do desempoeiramento da casa de corrida do alto forno, um resíduo da indústria siderúrgica, foi considerado eficiente para utilização como fonte de ferro na reação de Fenton para remoção do corante Reactive Red 195. Os resultados mostraram pouca interferência da concentração de corante na remoção de cor. A influência da concentração do peróxido de hidrogênio na descolorização do corante apresentou uma cinética de pseudo-primeira ordem. O tratamento proposto foi capaz de remover 100% da cor e da DQO e 96% do COT, indicando a mineralização do corante RR195 através da reação de Fenton com resíduo siderúrgico. A utilização prática do resíduo siderúrgico mostrou-se bastante promissora, possibilitando fácil separação sólido-líquido devido à alta densidade do resíduo, além da possibilidade de aliar técnicas de reaproveitamento de resíduos e tratamento de efluentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG (TEC 1123/06) e a CAPES (PROCAD 0064/05-0) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMORIM, C.C., LEÃO, M.M.D., MOREIRA, R.F.P.M., FLORES, R.G., FONSECA, M.A.D.S. (2007). Remoção de corantes têxteis através da adsorção em resíduo do alto forno da indústria siderúrgica. In: XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES. Belo Horizonte-MG.
2. ANDREOZZI, R., D'APUZZO, A., AND MAROTTA, R., (2002). Oxidation of aromatic substrates in water/goethite slurry by means of hydrogen peroxide. Water Research, v. 36, n. 19, p. 4691-4698.
3. APHA. STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER., 21th Edition. American Public Health Association, Whashington, DC, 2005
4. CENTI, G., PERATHONER, S., TORRE, T., AND VERDUNA, M.G., (2000). Catalytic wet oxidation with H₂O₂ of carboxylic acids on homogeneous and heterogeneous Fenton-type catalysts. Catalysis Today, v. 55, n. 1-2, p. 61-69.
5. CHOU, S., HUANG, C., AND HUANG, Y.-H., (2001). Heterogeneous and Homogeneous Catalytic Oxidation by Supported □-FeOOH in a Fluidized-Bed Reactor: Kinetic Approach. Environ. Sci. Technol., v. 35, n. 6, p. 1247 - 1251.



6. ÇIÇEK, F., OZER, D., OZER, A., AND OZER, A., (2007). Low cost removal of reactive dyes using wheat bran. *Journal of Hazardous Materials*, v. 146, n. 1-2, p. 408-416.
7. DANTAS, T.L.P., MENDONÇA, V.P., JOSE, H.J., RODRIGUES, A.E. AND MOREIRA, R.F.P.M., (2006). Treatment of textile wastewater by heterogeneous Fenton process using a new composite Fe₂O₃/carbon. *Chemical Engineering Journal*, v. 118, n. 1-2, p. 77-82.
8. DAS, B., S. PRAKASH, P.S.R. REDDY, AND V.N. MISRA, An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007. 50(1): p. 40-57.
9. GALINDO, C., JACQUES, P., KALT, A., (2001). Photochemical and photocatalytic degradation of an indigolid dye: a case study of acid blue 74 (AB74). *J. Photochemical Photobiology A: Chem.* v. 141, p. 47-56.
10. HSUEH, C.L., HUANG, Y.H., WANG, C.C., AND CHEN, C.Y., (2005). Degradation of azo dyes using low iron concentration of Fenton and Fenton-like system. *Chemosphere*, v. 58, n. 10, p. 1409 - 1414.
11. LUCAS, M.S. AND PERES, J.A., (2006). Decolorization of the azo dye Reactive Black 5 by Fenton and photo-Fenton oxidation. *Dyes and Pigments*, v. 71, n. 3, p. 236-244.
12. PAPIC, S., KOPRIVANAC, N., LONCARIC BOZIC, A., AND METES, A., (2004). Removal of some reactive dyes from synthetic wastewater by combined Al(III) coagulation/carbon adsorption process. *Dyes and Pigments*, v. 62, n. 3, p. 291-298.
13. ROBINSON, T., MCMULLAN, G., MARCHANT, R., AND NIGAM, P., (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, v. 7, n. 3, p. 247-255.
14. Sleiman, M., Vildoza, D., Ferronato, C., and Chovelon, J.-M., (2007). Photocatalytic degradation of azo dye Metanil Yellow: Optimization and kinetic modeling using a chemometric approach. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 77, n. 1-2, p. 1 - 11.
15. TARR, M.A., (2003). *Chemical Degradation Methods for Wastes and Pollutants - Environmental and Industrial Applications*. New York: Marcel Dekker.