

# Inativação Fotocatalítica de *Escherichia coli* em Sistema Semicondutor de Fibra de Vidro/ $\text{TiO}_2$ e Fibra de Vidro/ $\text{TiO}_2$ -Fe

## Photocatalytic Inactivation of *Escherichia coli* in Glass Fiber/ $\text{TiO}_2$ and Glass Fiber/ $\text{TiO}_2$ -Fe Semiconductor System

- **Data de entrada:**  
14/01/2018
- **Data de aprovação:**  
05/02/2018

Rafael de Alencar Neves\*/Fernando Rodrigues da Silva/Wallas Teixeira Menezes/  
Renato Garcia de Freitas Sobrinho/Eduardo Beraldo de Moraes/Rossean Golin

DOI: 10.4322/dae.2019.016

### Resumo

O aumento de aparecimento de bactérias resistentes aos antibióticos demanda novos e mais potentes agentes e materiais antibacterianos, tais como os Processos Oxidativos Avançados (POAs). Nesse sentido, o tratamento fotocatalítico se apresenta como uma alternativa à inativação microbiológica das águas. Sendo assim, o presente trabalho buscou avaliar a eficiência de um sistema fotocatalítico para a inativação da bactéria *Escherichia coli* em água nas temperaturas de 25 e 35 °C. Para isso, desenvolveram-se semicondutores de fibra de vidro revestidos com dióxido de titânio e dopados com composto férrico em concentração de 1% pelo método Pechini, submetido a um reator com radiação de luz UV. Os resultados obtidos para todos os tratamentos realizados demonstraram comportamentos satisfatórios, atingindo 100% de inativação bacteriana em apenas 2 minutos de tempo de detenção hidráulica. De modo geral, os resultados são promissores para a aplicação dessa técnica na desinfecção de águas.

**Palavras-chave:** Processos Oxidativos Avançados. Inativação Microbiana. Dopagem.

### Abstract

*The increased appearance of bacteria resistant to antibiotics demands new and more potent antibacterial agents and materials, such as Advanced Oxidative Processes (AOPs). Accordingly, the photocatalytic treatment presents itself as an alternative to the waters' microbiological inactivation. Therefore, this paper aimed to evaluate the efficiency of a photocatalytic system to the inactivation of *Escherichia coli* bacteria in water at temperatures of 25 and 35 °C. For this, our team developed fiberglass semiconductors coated with titanium dioxide and doped with ferric compound in a concentration of 1% by the Pechini method, which were submitted to UV light radiation's reactor. The results obtained for all treatments were satisfactory, reaching 100% bacterial inactivation in only 2 minutes of hydraulic detention time. Thus, the results are promising to the application of this technique in water disinfection.*

**Keywords:** Advanced Oxidative Processes. Microbial Inactivation. Doping.

**Rafael de Alencar Neves** – Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso. Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil na área de Saneamento e Ambiente pela Universidade Estadual de Campinas.

**Fernando Rodrigues da Silva** – Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso. Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

**Wallas Teixeira Menezes** – Químico pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Química pela UFMT.

**Renato Garcia de Freitas Sobrinho** – Professor-adjunto da Universidade Federal de Mato Grosso. Mestre e Doutor em Físico-Química pela Universidade Federal de São Carlos.

**Eduardo Beraldo de Moraes** – Professor-adjunto da Universidade Federal de Mato Grosso. Mestre e Doutor em Ciências Biológicas na área de Microbiologia Aplicada pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

**Rossean Golin** – Técnica do Laboratório de Microbiologia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Mestre em Recursos Hídricos pela UFMT.

\***Endereço para correspondência:** Rua Saturnino de Brito, 224 - Cidade Universitária Zaferino Vaz - Campinas - São Paulo - CEP: 13083-889. E-mail: rafaalencar\_@hotmail.com.

## 1 INTRODUÇÃO

A Organização Mundial de Saúde reconhece a desinfecção das águas como um dos mais importantes desafios para proteção da saúde humana na atualidade, sendo que a disseminação de infecções microbianas transmitidas pela água é um problema inerente aos países em desenvolvimento e aos países desenvolvidos (Sikong et al., 2011). Nesse sentido também existem preocupações quanto aos possíveis efeitos em longo prazo da exposição sistêmica a determinadas classes de toxinas, como por exemplo, endotoxinas de *Escherichia coli* liberadas após a lise celular (Subrahmanyam et al., 2008). Desse modo, vem se observando necessidade crescente de desenvolvimento e aprimoramento de novas tecnologias para um tratamento mais eficiente da água em termos de inativação microbiana, principalmente aquela destinada ao consumo humano.

Em função do aumento de aparecimento de bactérias resistentes aos antibióticos, novos e mais potentes agentes e materiais antibacterianos têm sido requisitados e, sob essa perspectiva, há grandes expectativas de que os Processos Oxidativos Avançados (POAs) possam oferecer novas possibilidades de aplicação nesta área (Campoccia et al., 2013).

A fotocatalise heterogênea é uma tecnologia avançada de oxidação que utiliza radiação solar e diversos semicondutores, tais como o dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de níquel ( $\text{NiO}$ ), óxido de cobre ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), dentre outros, que surgiram nos últimos anos como um método inovador para o tratamento de águas de abastecimento e residuais (Ashkarran et al., 2014). Dentre estes, observou-se que o semicondutor  $\text{TiO}_2$ , conhecido por sua estabilidade química e sua competência óptica, tem sido amplamente utilizado para inativar diferentes grupos de microrganismos, incluindo bactérias, fungos e vírus (Haghi et al., 2012).

Além disso, a atividade fotocatalítica do  $\text{TiO}_2$  pode ser aprimorada a partir de técnicas de modificações estruturais morfológicas e eletrônicas. Tais modificações resultam em novas estruturas de bandas, que tendem a aumentar o espectro de absorção da radiação do material resultante. Diversos estudos demonstraram que o aumento da fotossensibilidade do  $\text{TiO}_2$  é capaz de provocar a absorção da radiação solar fotocatalítica na região compreendida como visível no espectro eletromagnético. Dessa forma, há métodos que, ao serem empregados na síntese de compostos nanoestruturados de  $\text{TiO}_2$ , são capazes de elevar a sua sensibilidade óptica, como é o caso da inserção de um metal dopante (Nocun et al., 2012).

Tais dopagens podem ser realizadas com metais e não-metais. A dopagem comumente utilizada com  $\text{TiO}_2$  é realizada com metais de transição, já que ele contribui com o melhoramento da fotossensibilidade no comprimento de onda do espectro visível, que ocorre por meio dos defeitos, também conhecidos como armadilhas para absorção de luz, acima da Banda de Valência (BV) e abaixo da Banda de Condução (BC) (Kapilashram et al., 2014). Estudos relataram que a adição de  $\text{Fe}^{3+}$  em  $\text{TiO}_2$  é capaz de aumentar a sua eficiência fotocatalítica (Stoyanova et al., 2013). O íon  $\text{Fe}^{3+}$ , como próprio agente desinfetante, é conhecido por causar a desnaturação das proteínas presentes nas paredes das células bacterianas e retardar o crescimento bacteriano (Sangchay e Ubonchonlakat, 2015).

Dentro deste contexto, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar a eficiência de inativação da bactéria *Escherichia coli* por meio de um sistema de semicondutores de fibra de vidro revestidos por uma camada fina de  $\text{TiO}_2$  e  $\text{TiO}_2$  dopado com composto férrico ( $\text{TiO}_2\text{-Fe}$ ) a concentração de 1%, sintetizados por método sol-gel, e seu comportamento em função da temperatura.

## 2 METODOLOGIA

Os semicondutores de fibra de vidro com  $\text{TiO}_2$  e  $\text{TiO}_2\text{-Fe}$  foram desenvolvidos a partir do método de Pechini, também conhecido como método sol-gel para elaboração de filmes finos. O método consiste na fabricação de uma resina obtida por meio da dissolução de ácido cítrico em etilenoglicol em uma temperatura de cerca de  $60\text{ }^\circ\text{C}$ , sob constante agitação, adicionando-se posteriormente isopropóxido de titânio, em função da relação 32,4379g de ácido cítrico em 37,602 mL de etilenoglicol para 6,282 mL de isopropóxido de titânico, elevando-se a temperatura para  $80\text{ }^\circ\text{C}$ , ainda sob agitação até a sua completa solubilização, que tende a durar cerca de 2 horas. O processo de dopagem com composto férrico foi desenvolvido após a completa solubilização do isopropóxido de titânio, tendo sido adicionado cloreto férrico para dopagem à concentração de 1% até a sua completa solubilização (Pereira et al., 2013).

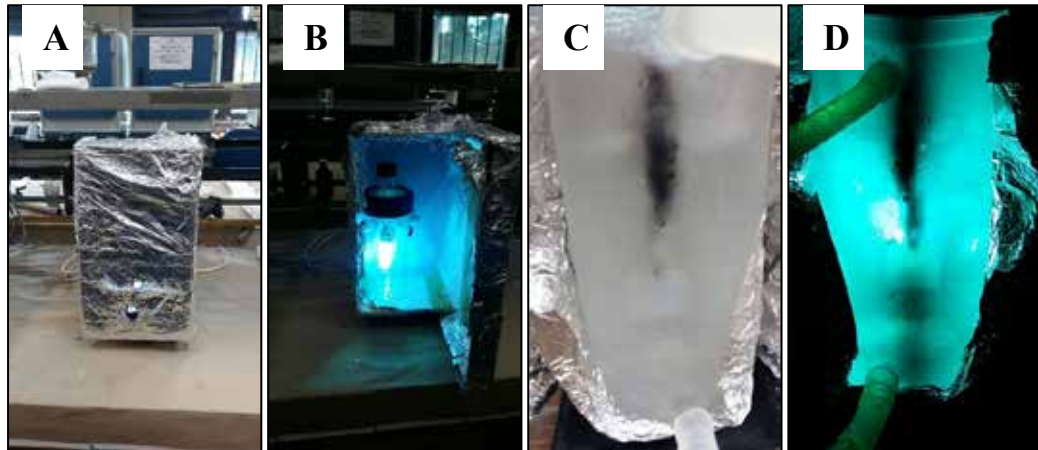
Para que se obtivessem filmes finos sobre a superfície de fibras de vidro, pincelou-se a resina obtida pelo método sol-gel em ciclos de cinco vezes. As superfícies dos semicondutores foram lixadas previamente, para que houvesse maior aderência dos compostos nanoestruturados. Por fim, calcinou-se por 30 minutos em uma temperatura de  $600\text{ }^\circ\text{C}$ , para que toda a matéria orgânica proveniente do etilenoglicol e ácido cítrico fosse evaporada, restando, portanto, apenas os óxidos metálicos.

Para realizar a avaliação do sistema, ressuspendeu-se a linhagem bacteriana *Escherichia coli*

ATCC 25922 em água deionizada, utilizando-se como efluente a ser tratado nesta pesquisa. As células da bactéria foram cultivadas aerobicamente em 50 mL de caldo triptona de soja a  $37\text{ }^\circ\text{C}$  durante 24 horas. Posteriormente as células foram recuperadas por meio de centrifugação em 3.600 rpm por 10 minutos, lavadas e ressuspensas em solução salina estéril à concentração de 0,85%. Após o procedimento ter sido repetido por três vezes, obteve-se uma suspensão bacteriana padronizada a absorbância de 0,2 ao comprimento de onda de 600 nm e utilizada nos experimentos fotocatalíticos do presente trabalho.

Os experimentos de inativação microbiana por ação fotocatalítica ocorreram em um reator com capacidade de 300 mL, envolvido por um banho de água termostabilizada, primeiramente a uma temperatura de  $25\text{ }^\circ\text{C}$  e posteriormente de  $35\text{ }^\circ\text{C}$ . Avaliaram-se os tratamentos estritos sob incidência direta da radiação UV, proveniente de uma lâmpada de vapor de mercúrio com potência de 125 W, além dos testes da catálise sob incidência da mesma fonte luminosidade nos semicondutores de fibras de vidros com  $\text{TiO}_2$  e  $\text{TiO}_2\text{-Fe}$ .

Durante o procedimento experimental, o reator foi alocado em uma caixa de madeira recoberta com papel alumínio para evitar a presença de luz que não fosse proveniente da fonte de radiação UV. O efluente ficou em completa agitação durante os tratamentos desenvolvidos. A Figura 1 apresenta o aparato experimental e seus componentes.



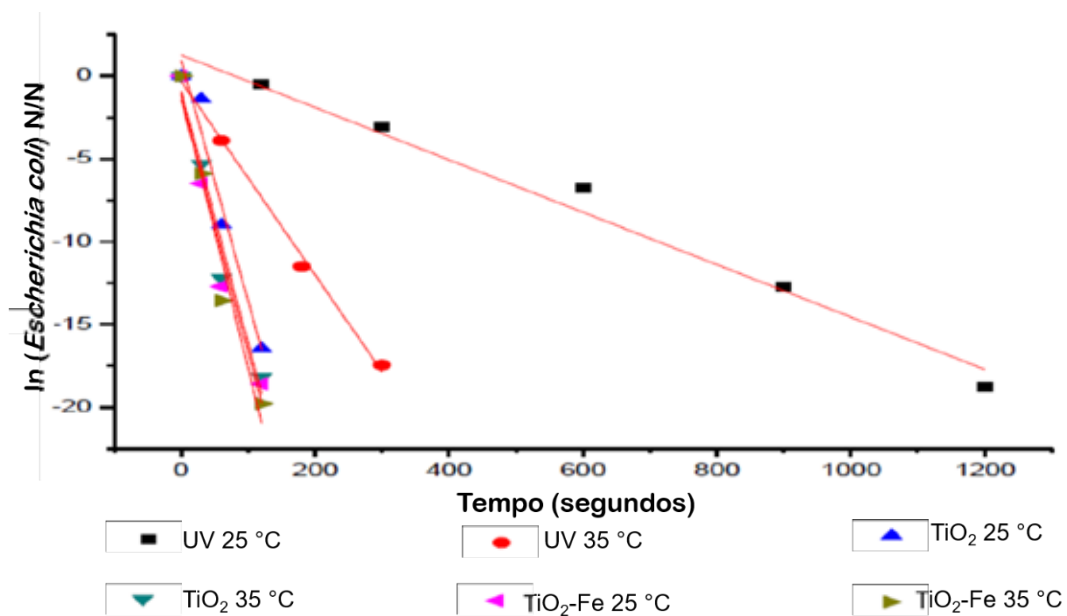
**Figura 1.** Aparato experimental e seus componentes. A, vista geral do reator analítico; B, vista geral do reator ligado; C, vista detalhada do reator termoestabilizado; D, vista detalhada do reator ligado.

Os tratamentos com ação estrita da luz UV tiveram tempo de exposição de 20 minutos, tendo sido retiradas alíquotas para análise a cada 5 minutos, enquanto os tratamentos com os semicondutores tiveram tempo de detenção hidráulica total de 3 minutos, com amostragem entre cada 30 segundos. Para a avaliação da eficiência do tratamento, ou seja, da inativação microbiana, efetuou-se o plaqueamento em superfície com as amostras,

seguindo-se as recomendações apresentadas no Standard Methods (APHA, 2012).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nas diferentes configurações de tratamento fotocatalítico para inativação da bactéria *Escherichia coli* podem ser observados na Figura 2.



**Figura 2.** Decaimento da bactéria *Escherichia coli* em função das diferentes configurações do tratamento fotocatalítico.

A partir dos resultados de decaimento bacteriano e, por conseguinte, a sua inativação microbiana, pôde-se determinar a cinética de reação do processo, que se ajustou a um modelo cinético de primeira ordem. As constantes de inativação bacteriana ( $k$ ) determinadas nesta pesquisa podem ser observadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Cinética de reação das diferentes configurações do tratamento fotocatalítico para inativação da bactéria *Escherichia coli*.

Configuração do Tratamento	K	R <sup>2</sup>
UV 25 °C	0,01581	0,97725
UV 35 °C	0,05846	0,99403
TiO <sub>2</sub> 25 °C	0,14564	0,94400
TiO <sub>2</sub> 35 °C	0,15235	0,94875
TiO <sub>2</sub> -Fe 25 °C	0,15303	0,93682
TiO <sub>2</sub> -Fe 35 °C	0,16563	0,93964

A avaliação da cinética de reação das diferentes configurações do tratamento fotocatalítico é uma variável muito importante e possibilita a comparação entre as eficiências de inativação bacteriana. Observou-se nos resultados obtidos uma constante maior de velocidade de decaimento microbiano nos tratamentos realizados à temperatura de 35 °C, quando comparados com os realizados à de 25 °C. Isso implica que a velocidade de decaimento da bactéria *E. coli* é dependente da temperatura, aumentando-se a produção de radicais hidroxilas (OH<sup>\*</sup>) como principal fator na presente inativação. Corroborando esses resultados, Cho et al. (2004) observaram melhor eficiência de inativação da *E. coli* em função do aumento de temperatura, tendo sido encontrado resultado mais satisfatório em 35 °C.

Foi possível observar que os tratamentos com semicondutores de fibra de vidro com TiO<sub>2</sub>-Fe demonstraram os melhores resultados de inativação microbiana de *E. coli*, ainda melhores quando operado em temperatura de 35 °C. Nesse sentido, pôde-se verificar que a dopagem com compostos férricos à concentração de 1% proporcionou melhores meca-

nismos de inativação. Trabalhos similares, como Liu (2003), também encontraram maior eficiência no decaimento microbiológico com a dopagem com compostos férricos em tratamento fotocatalítico. De modo geral, aumentou-se a eficiência fotocatalítica do material em função da maior produção de radicais livres, que pode ter sido alcançada em virtude de maiores taxas de separação dos pares do buraco de elétron, o que leva a uma diminuição de recombinação desses portadores.

Além disso, corroborando os resultados obtidos, o ferro metálico se caracteriza particularmente interessante para o uso de dopagens no processo de tratamento por fotocatalise, tendo em vista a sua capacidade de atuação como doador e receptor de elétrons, sendo que quando age para atrair foto-geradores de elétrons ele ainda possui a capacidade de promover a separação do buraco de elétrons e previne a recombinação do elétron com o TiO<sub>2</sub> após a foto-adsorção. O ferro também pode modificar o tamanho das partículas de TiO<sub>2</sub>, aumentando a área superficial, que por sua vez pode aumentar a sua capacidade de fotoatividade (Zhang et al., 2011).

A Tabela 2 apresenta as eficiências obtidas nas diferentes configurações do tratamento fotocatalítico com os seus respectivos tempos de detenção hidráulico capazes de alcançar a inativação total da bactéria *E. coli*, ou seja, 100% de eficiência.

**Tabela 2.** Eficiência de inativação da *E. coli* das diferentes configurações do tratamento fotocatalítico.

Configuração do Tratamento	[ <i>E. coli</i> ] Inicial	% Inativação	Tempo
UV 25 °C	1,40 x 10 <sup>8</sup>	100	20
UV 35 °C	3,80 x 10 <sup>7</sup>	100	5
TiO <sub>2</sub> 25 °C	1,40 x 10 <sup>7</sup>	100	2
TiO <sub>2</sub> 35 °C	7,90 x 10 <sup>7</sup>	100	2
TiO <sub>2</sub> -Fe 25 °C	1,20 x 10 <sup>8</sup>	100	2
TiO <sub>2</sub> -Fe 35 °C	3,90 x 10 <sup>8</sup>	100	2

Os resultados em função das diferentes configurações do tratamento fotocatalítico demonstra-

ram completa inativação da bactéria *E. coli* em todas as condições estabelecidas. O tratamento realizado com apenas irradiação dos raios UV demonstrou que à temperatura de 25 °C o tempo de detenção hidráulico necessário para eficiência máxima do sistema é de 20 minutos. Para a temperatura de 35 °C houve um ganho na eficácia de 75%, demonstrando serem necessários apenas 5 minutos de exposição, tendo em vista a sua cinética de reação. Os tratamentos fotocatalíticos em sistema semicondutores de fibras de vidros com  $\text{TiO}_2$  e  $\text{TiO}_2\text{-Fe}$  obtiveram inativação microbiana em tempo de detenção de 2 minutos, tanto à temperatura de 25 °C como à de 35 °C, inferindo no ganho de 10 e 2,5 vezes no tempo necessário para atingir a máxima eficiência, respectivamente.

Os resultados satisfatórios podem ser explicados em função dos mecanismos concomitantes que ocorrem no tratamento com radiação UV e  $\text{TiO}_2$ , o ataque nas células pelos radicais hidroxilas, que são gerados pela degradação na superfície do fotocatalisador e a absorção direta da radiação UV pelas células bacterianas, sendo que ela é absorvida por muitos compostos intracelulares, mas o DNA é o que sofre o maior dano (Cordeiro et al., 2004).

Sangchay e Ubonchonlakit (2015) obtiveram resultados que corroboram a presente pesquisa, tendo sido observado o potencial de inativação da bactéria *E. coli* em função da dopagem com compostos férricos em  $\text{TiO}_2$  em fibras de vidro em diversas concentrações, encontrando-se incremento na fotoatividade. Não obstante, embora este trabalho tenha sido desenvolvido com efluente sintético produzido estritamente com água deionizada e a ressuspensão da bactéria *Escherichia coli*, os resultados encontrados corroboraram a pesquisa similar de Venieri et al. (2015), que utilizaram amostras reais de efluentes provenientes de uma estação de tratamento.

Nesse sentido, deve-se ressaltar que a presença de materiais em suspensão no efluente pode pro-

teger os microrganismos no processo de inativação, pois se cria uma barreira física, interferindo em todo o processo de reação. Além disso, inibe-se a penetração da luz, que é necessária para produzir a reação desejada, portanto infere-se na baixa eficiência da inativação microbiana (Foster et al., 2011).

Entretanto, diversos estudos sobre a desinfecção da água mostraram que  $\text{TiO}_2$  nanoparticulado em suspensão é mais ativo que o imobilizado em superfícies, em função do aumento da extensão do dano oxidativo acarretado pelo contato próximo entre as bactérias e o  $\text{TiO}_2$  (Lee et al., 1997; Otaki et al., 2000; Sun et al., 2003; Gummy et al., 2006b; Marugan et al., 2006; Marugan et al., 2008; Cohen-Yaniv et al., 2008). Vários estudos confirmam a importância desse contato e o aumento de área superficial de reação na inativação microbiana (Horie et al., 1996a, 1996b, 1998; Gummy et al., 2006a; Pratap Reddy et al., 2008; Caballero et al. 2009; Cheng et al., 2009). Apesar disso, o presente estudo, que utiliza  $\text{TiO}_2$  e  $\text{TiO}_2\text{-Fe}$  imobilizado, demonstrou alcance de eficiência e eficácia satisfatória, apresentada por uma completa inativação microbiana em apenas 2 minutos de teste.

Outro aspecto importante sobre a aplicabilidade dessa tecnologia se dá em relação às possíveis dificuldades na implantação em escala real em estações de tratamento de água e esgotos, principalmente as concernentes ao custo com energia elétrica. Apesar disso, grandes avanços tecnológicos nos últimos anos têm permitido o desenvolvimento de vários sistemas comerciais de tratamento, tais como os sistemas UV/ $\text{H}_2\text{O}_2$ , UV/ $\text{O}_3$ , UV/ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ , foto-Fenton e UV/ $\text{TiO}_2$  (Almeida et al., 2004; Carp et al., 2004; Pan et al., 2006; Villa et al., 2006). Além disso, é possível encontrar a aplicação da desinfecção em águas por sistema fotocatalítico em grande escala e nas escalas semipiloto e piloto na Espanha (Jiménez et al., 2015; Philippe et al., 2016; Malato et al., 2016).

#### 4 CONCLUSÃO

O revestimento do dióxido de titânio e dióxido de titânio dopado com compostos férricos em fibras de vidro para atuarem como semicondutores do sistema de tratamento fotocatalíticos de uma água residuária sintética com bactéria *Escherichia coli* se apresentou satisfatório, inferindo em resultados promissores à temática de inativação microbiológica em águas, alcançando-se 100% de eficiência em apenas 2 minutos de tempo de detenção hidráulico.

Sugere-se que estudos futuros investiguem a liberação de endotoxinas, assim como a formação de seus subprodutos mediante o processo de tratamento, além de ser necessário avaliar o processo em efluentes com maiores concentrações de materiais em suspensão, assim como a interação de outros compostos, para melhor compreensão da aplicabilidade de compostos de  $TiO_2$  imobilizados na desinfecção de efluentes domésticos como sistema de tratamento terciário.

#### 5 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E.; ASSALIN, M. R.; ROSA, M. A.; DURÁN, N. Tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos avançados na presença de ozônio. **Química Nova**, v. 27, n. 5, p. 818-824, 2004.

APHA - American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22<sup>nd</sup> ed. Washington: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Pollution Control Federation; 2012.

ASHKARRAN, A. A.; HAMIDINEZHAD, H.; HADDADI, H.; MAHMOUDI, M. Double-doped  $TiO_2$  nanoparticles as an efficient visible-light-active photocatalyst and antibacterial agent under solar simulated light. **Applied Surface Science**, v.301, p.338-345, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.074>.

CABALLERO, L.; WHITEHEAD, K. A.; ALLEN, N. S.; VERRAN, J. Inactivation of *Escherichia coli* on immobilized  $TiO_2$  using fluorescent light. **Journal of Photochemical Photobiology A**, v. 202(2-3), p. 92-98, 2009.

CAMPOCCIA, D.; MONTANARO, L.; ARCIOLA, C. R. A review of the biomaterials Technologies for infection-resistant surfaces. **Biomaterials**, v.34, n.34, p.8533-8554, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biomaterials.2013.07.089>.

CARP, O.; HUISMAN, C. L.; RELLER, A. Photoinduced reactivity of titanium dioxide. **Progress in Solid State Chemistry**, v. 32, n. 1-2, 2004.

CHENG, C. L.; SUN, D. S.; CHU, W. C.; TSENG, Y. H.; HO, H. C.; WANG, J. B.; CHUNG, P. H.; CHEN, J. H.; TSAI, P. J.; LIN, N. T.; YU, M. S.; CHANG, H. H. The effects of the bacterial interaction with visible-light responsive titania photocatalyst on the bactericidal performance. **Journal of Biomedical Science**, v. 16(7), p. 10, 2009.

CHO, M.; CHUNG, H.; CHOI, W.; YOON, J. Linear correlation between inactivation of *E. coli* and OH radical concentration in  $TiO_2$  photocatalytic disinfection. **Water Research**, v.38, n.4, p.1069-1077, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2003.10.029>.

COHEN-YANIV, V.; NARKIS, N.; ARMON, R. Photocatalytic inactivation of *Flavobacterium* and *E. coli* in water by a continuous stirred tank reactor (CSTR) fed with suspended/immobilised  $TiO_2$  medium. **Water Science Technology**, v. 58(1), p. 247-252, 2008.

CORDEIRO, A. C. S.; LEITE, S. G. F.; DEZOTTI, M. Inativação por oxidação fotocatalítica de *Escherichia coli* e *Pseudomonas sp.* **Química Nova**, Vol. 27, No. 5, 689-694, 2004. <http://www.scielo.br/pdf/%0D/qn/v27n5/a02v27n5.pdf>

FOSTER, H. A.; DITTA, I. B.; VARGHESE, S.; STEELE, A. Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: spectrum and mechanism of antimicrobial activity. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 90, n. 6, pp. 1847 -1868, 2011.

GUMY, D.; MORAIS, C.; BOWEN, P.; PULGARIN, C.; GIRALDO, S.; HADJU, R.; KIWI, J. Catalytic activity of commercial  $TiO_2$  powders for the abatement of the bacteria (*E. coli*) under solar simulated light: influence of the isoelectric point. **Applied Catalysis B**, v. 63, p. 76-84, 2006a.

GUMY, D.; RINCON, A. G.; HAJDU, R.; PULGARIN, C. Solar photocatalysis for detoxification and disinfection of water: different types of suspended and fixed  $TiO_2$  catalysts study. **Solar Energy**, v. 80 (10), p. 1376-1381, 2006b.

HAGHI, M.; HEKMATAFSHAR, M.; JANIPOUR, M. B.; GHOLIZADEH, S. S.; FARAZ, M. K.; SAYYADIFAR, F.; GHAEEDI, M. Antibacterial effect of  $TiO_2$  nanoparticles on pathogenic strain of *E. coli*. **International Journal of Advanced Biotechnology and Research**, v.3, n.3, p.621-624, 2012. <http://www.bipublication.com>.

HORIE, Y.; DAVID, D. A.; TAYA, M.; TONE, S. Effects of light intensity and titanium dioxide concentration on photocatalytic sterilization rates of microbial cells. **Industry Engineering Chemical Resources**, v. 35(11), p. 3920-3926, 1996a.

HORIE, Y.; TAYA, M.; TONE, S. Photocatalytic sterilization of microbial cells with titania thin film prepared by sol-gel method. **Kagaku Kogaku Ronbunshu**, v. 22(5), p. 1244-1245, 1996b.

HORIE, Y.; TAYA, M.; TONE, S. Effect of cell adsorption on photosterilization of *Escherichia coli* over titanium dioxide-activated charcoal granules. **Journal of Chemical Engineering Jpn**, v. 31(6), p. 922-929, 1998.

- JIMÉNEZ, M.; MALDONADO, M. I.; RODRÍGUEZ, E. M.; HERNÁNDEZ-RAMÍREZ, A.; SAGGIORO, E.; CARRA, I.; PÉREZ, J. A. S. Supported TiO<sub>2</sub> solar photocatalysis at semi-pilot scale: degradation of pesticides found in citrus processing industry wastewater, reactivity and influence of photogenerated species. **Journal of Chemical Technology Biotechnology**, v. 90, p. 149-157, 2015.
- KAPILASHRAM, M.; ZHANG, Y.; LIU, Y. S.; HAGFELDT, A.; GUO, J. Probing the optical property and electronic structure of TiO<sub>2</sub> nanomaterials for renewable energy applications. **Chemical Review**, v.114, n.19, p.9662-9707, 2014. <http://dx.doi.org/10.1021/cr5000893>.
- LEE S.; NISHIDA, K.; OTAKI, M.; OHGAKI, S. Photocatalytic inactivation of phage Q $\beta$  by immobilized titanium dioxide mediated photocatalyst. **Wat Sci Technol**, v. 35, p. 101-106, 1997.
- LIU, H. L.; YANG, T. C. K. Photocatalytic inactivation of *Escherichia coli* and *Lactobacillus helveticus* by ZnO and TiO<sub>2</sub> activated with ultraviolet light. **Process Biochemistry**, v.39, n.4, p.475-481, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00084-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00084-0).
- MALATO, S.; MALDONADO, M. I.; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, P.; OLLER, I.; POLO, I.; SÁNCHEZ-MORENO, R. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: The pilot plants of the Plataforma Solar de Almería. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 42, p. 15-23, 2016.
- MARUGAN, J.; VAN GRIEKEN, R.; PABLOS, C.; SORDO, C. Analogies and differences between photocatalytic oxidation of chemicals and photocatalytic inactivation of microorganisms. **Water Resources**, v. 44(3), p. 789-796, 2006.
- MARUGAN, J.; VAN GRIEKEN, R.; SORDO, C.; CRUZ, C. Kinetics of the photocatalytic disinfection of *Escherichia coli* suspensions. **Applied Catalysis B**, v. 82 (1-2), p. 27-36, 2008.
- NOCUN, M.; ZONTEK, J.; KWAŚNY, S. Synthesis, chemical characterization and antifungal activity of thin layers prepared by sol-gel method. **Optica Applicata**, v.XLII, n.2, p.315-322, 2012. <http://dx.doi.org/10.5277/oa120209>.
- OTAKI, M.; HIRATA, T.; OHGAKI, S. Aqueous microorganisms' inactivation by photocatalytic reaction. **Water Science Technology**, v. 42, p. 103-108, 2000.
- PAN, S. H.; LO, K. V.; LIAO, P. H.; SCHREIER, H. Microwave pretreatment for enhancement of phosphorus release from dairy manure. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 41, p. 451-458, 2006.
- PEREIRA, R.; MARCHESI, L. F.; FREITAS, R. G.; MATOS, R.; PEREIRA, E. C. A. Low-cost platinum film deposited direct on glass substrate for electrochemical counter electrodes. **Journal of Power Source**, v.232, p.254-257, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.01.040>.
- PHILIPPE, K. K.; TIMMERS, R.; VAN GRIEKEN, R.; MURUGAN, J. Photocatalytic disinfection and removal of emerging pollutants from effluents of biological wastewater treatments, using a newly developed large-scale simulator. **Industry Engineering Chemical Research**, v. 55, p.2952-2958, 2016.
- PRATAP REDDY, M.; PHIL, H. H.; SUBRAHMANYAM, M. Photocatalytic disinfection of *Escherichia coli* over titanium (IV) oxide supported on Zeolite. **Catalysis Letter**, v. 123(1-2), p. 56-64, 2008.
- SANGCHAY, W.; UBONCHONLAKAT, K. Photocatalytic disinfection of water containing *E. coli* using Fe<sup>3+</sup> doped TiO<sub>2</sub> thin films coated on glass fibers. **Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures**, v.10, n.1, p.283-290, 2015.
- SIKONG, L.; KONGSONG, P.; RACHPECH, V. Water Disinfections Using Fe<sup>3+</sup> and N-Doped 3SnO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> Thin Films Coated on Glass Fibers. **Advanced Materials Research**, v.48-149, p.1501-1506, 2011. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.148-149.1501>.
- STOYANOVA, A. M.; HITKOVA, H. Y.; IVANOVA, N. K.; BACHVAROVA-NEDELICHEVA, A. D.; IORDANOVA, R. S.; SREDKOVA, M. P. Photocatalytic and antibacterial activity of Fe-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles prepared by nonhydrolytic sol-gel method. **Bulgarian Chemical Communications**, v.45, n.4, p.497-504, 2013.
- SUBRAHMANYAM, M.; BOULE, P.; KUMARI, V. D.; KUMAR, D. N.; SANCELME, M.; RACHEL, A. Pumice stone supported titanium dioxide for removal of pathogen in drinking water and recalcitrant in wastewater. **Solar Energy**, v.82, p.1099-1106, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.007>.
- SUN, D. D.; TAY, J. H.; TAN, K. M. Photocatalytic degradation of *E. coli* in water. **Water Resources**, v. 37 (14), p. 3452-3462, 2003.
- VENIERI, D.; GOUNAKI, I.; BINAS, V.; ZACHOPOULOS, A.; KIRIAKIDIS, G.; MANTZAVINOS, D. Inactivation of MS2 coliphage in sewage by solar photocatalysis using metal-doped TiO<sub>2</sub>. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 178, p. 54-64, 2015.
- VILLA, R. D.; SILVA, M. R. A.; NOGUEIRA, R. F. P. Potencial de aplicação do processo foto-fenton/solar como pré-tratamento de efluente da indústria de laticínios. **Química Nova**, v. 30, n. 8, p. 1799-1803, 2007.
- ZHANG, J.; CHEN, X.; HEN, Y.; LI, Y.; HU, Z.; CHU, J. **Synthesis, surface morphology, and photoluminescence properties of anatase iron-doped titanium dioxide nano-crystalline films**. Vol. 13, pp. 13096-105, 2011.