



## **Performance de processos aplicados em sistemas unitários e integrados no tratamento de lixiviado de aterro sanitário (LAS).**

**Francine Bueno<sup>1</sup>, Danilo Epaminondas Martins e Martins<sup>1</sup>, Emanoélle Maurer<sup>1</sup>, Juliana Felden<sup>1</sup>, Letícia Cariolatto<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Federal da Fronteira Sul ([francine.bueno@hotmail.com](mailto:francine.bueno@hotmail.com))

Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis (PPGATS)

### **Resumo**

Este trabalho teve como objetivo avaliar as configurações unitárias dos processos foto-Fenton (FF), Eletro-Coagulação (EC) e Coagulação química (CQ), bem como apresentar um método combinado eficaz para o tratamento de Lixiviado de aterro sanitário (LAS). Foram monitorados como parâmetros resposta os compostos aromáticos ( $\lambda$  254 nm) e a cor (mg Pt-Co L<sup>-1</sup>). O processo FF foi baseado nas condições experimentais de pH (2,8), 9000 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> e 100 mg Fe L<sup>-1</sup>, e o processo EC foi utilizado pH bruto de 7,8 em uma intensidade de corrente contínua de 3 A. Para o processo de CQ foram testadas concentrações de Al<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 18H<sub>2</sub>O de 1600, 2000 e 3000 mg L<sup>-1</sup>. O processo FF combinado com a CQ (CQ→FF) apresentou uma eficiência satisfatória de remoção dos  $\lambda$  254 nm ~60% e 97% da cor. Para tanto sugere-se um sistema combinado CQ→FF, auxiliando na minimização dos impactos ambientais ocasionados pelo descarte de LAS.

Palavras-chave: Lixiviado. Processos Oxidativos avançados. Sistemas integrados.

Área Temática: Águas Residuárias.

## **Performance of applied processes in unitary and integrated systems in the treatment of landfill leachate (LAS)**

### **Abstract**

*This work aimed to evaluate the unit configurations of the photo-Fenton (FF), Electro-Coagulation (EC) and Chemical Coagulation (CQ) processes, as well as to present an effective combined method for the treatment of landfill leachate (LAS). The aromatic compounds ( $\lambda$  254 nm) and color (mg Pt-Co L<sup>-1</sup>) were monitored as response parameters. The FF process was based on the experimental conditions of pH (2.8), 9000 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> and 100 mg Fe L<sup>-1</sup>, and the EC process was used crude pH of 7.8 at a continuous current of 3 A. For the QC process, concentrations of Al<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 18H<sub>2</sub>O of 1600, 2000 and 3000 mg L<sup>-1</sup> were tested. The FF process combined with the CQ (CQ→FF) showed satisfactory removal efficiency of  $\lambda$  254 nm ~60% and 97% of the LAS color. For this, a combined system QC→FF is suggested, helping to minimize the environmental impacts caused by LAS disposal.*

*Keywords: Landfill leachate; Advanced Oxidative Processes; Integrated systems.*

*Theme Area: Wastewater*



## 1 Introdução

A disposição dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterro sanitário é atualmente o método convencional de tratamento mais eficaz e pertinente utilizado no Brasil. Sua estrutura consiste em obras de engenharia projetadas para receber RSU, minimizando os danos à saúde pública e ao meio ambiente (CASTILHOS JUNIOR et al., 2010).

O processo de decomposição dos RSU em células de aterros sanitários promove a geração de um percolato com características, tóxicas, recalcitrantes e de baixa biodegradabilidade, sendo este denominado lixiviado de aterro sanitário (LAS). O LAS apresenta em suas características uma coloração escura, odor desagradável, elevados teores de turbidez, e uma gama de compostos orgânicos e inorgânicos, perfazendo com isso uma complexidade de tratamento ou degradação (SEIBERT et al., 2017; PAULI et al., 2018).

Usualmente os processos aplicados no tratamento de LAS são processos convencionais físicos, químicos e biológicos. No entanto, estudos apontam limitações destes processos, relacionados com os procedimentos operacionais, viabilidade econômica e principalmente eficiência na degradação dos compostos encontrados nos LAS (CAMPOS et al., 2013). A comunidade científica vem investigando a aplicação de processos oxidativos avançados (POAs) e Eletro-Coagulação (EC), assim com a combinação integrada destes processos aplicados como método eficaz na descontaminação/purificação de LAS (SILVA et al., 2017; PAULI et al., 2017; PAULI et al., 2018).

Os POAs têm por finalidade a degradação dos contaminantes orgânicos, via produção do radical hidroxila ( $\cdot\text{OH}$ ), transformando compostos tóxicos, recalcitrantes em subprodutos, como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e íons inorgânicos (PIGNATELO et al., 2006). Dentre os POAs destaca-se o processo foto-Fenton, baseado na aplicação simultânea de uma agente catalizador ( $\text{Fe}^{2+}$ ) e um oxidante ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) em condições de pH da solução  $\leq 3,5$  (MAEZONO et al., 2011). O processo da EC perfaz na aplicação de uma intensidade de corrente contínua dissipada na solução através de um cátodo e ânodo, acarretando na desestabilização dos colóides, ocasionando com isso a aglutinação e formação de flocos, proporcionando a flotação e/ou sedimentação de compostos (CRESPILHO E REZENDE, 2004).

Com intuito de desenvolver um método eficaz aplicado no tratamento de LAS, este trabalho teve como objetivo avaliar as configurações unitárias dos processos foto-Fenton (FF), Eletro-Coagulação (EC) e Coagulação química (CQ), assim como, apresentar o melhor arranjo combinado destes processos de tratamento. No entanto, foram testadas duas configurações aplicando estes processos como pré e pós-tratamento do LAS. Para verificar a eficiência destes processos (FF, EC, CQ e processos integrados) foram determinados como parâmetros resposta os compostos aromáticos ( $\lambda$  254 nm) e a cor ( $\text{mg Pt-Co L}^{-1}$ ).

## 2 Materiais e Métodos

### 2.1 Coleta e Caracterização do LAS

O LAS utilizado nesta pesquisa foi coletado na Central de tratamento de resíduos (CTRs) do município de Giruá-RS. O lixiviado proveniente da decomposição da matéria orgânica é conduzido para sistemas alternativos de tratamento de efluentes baseados em sistemas de ultrafiltração (UF) e de osmose reversa (OR).

Foi coletado um volume de 10L do LAS concentrado, e as amostras do LAS bruto foram armazenadas e preservadas de acordo com as metodologias descritas no *Standard methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). Para as determinações analíticas foram utilizados um espectrofotômetro UV-Vis (Shimadzu, modelo UV-1610PC) para identificar os compostos aromáticos em  $\lambda$  254 nm. A cor foi

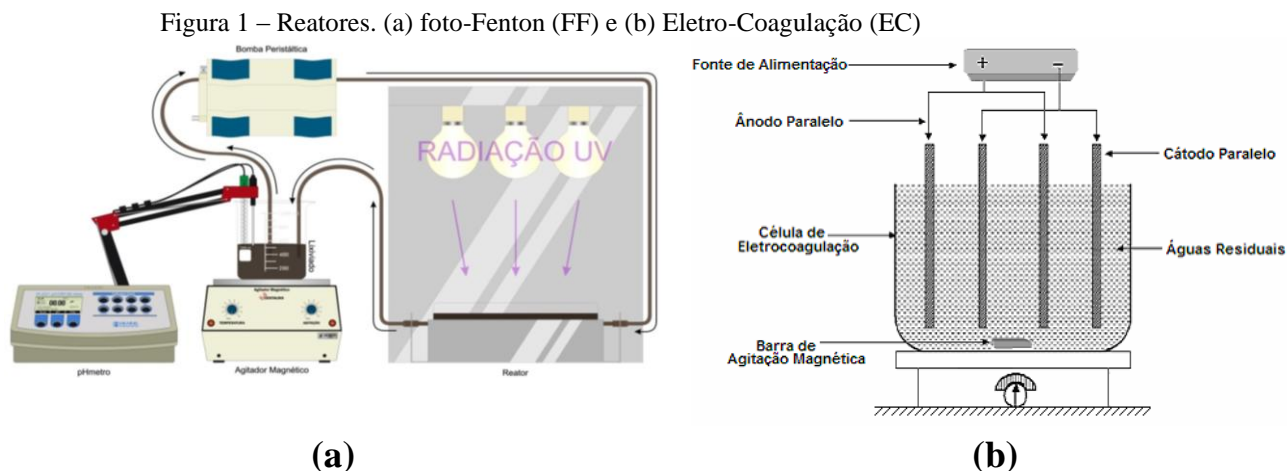


determinada através do método de Platina-Cobalto ( $\text{mg Pt-Co L}^{-1}$ ) e o pH da solução foi medido utilizando um pHmetro digital (Tecnal, TEC-2).

## 2.2 Reatores dos processos FF, EC e CQ

Um foto-reator de escala laboratorial, desenvolvido com base em um protótipo comercial (ATLAS, modelo SUNTEST XLS+), denominado SUNTEST, descrito por (SEIBERT et al., 2017), foi utilizado nesta pesquisa. A este módulo foi acoplado três lâmpadas mistas de alta pressão de mercúrio (Hg) para simular a fonte de radiação solar (UV-Vis). A luz artificial foi direcionada em um tubo (foto-reator) cilíndrico em borossilicato (Schott-Duran 3.3, Alemão, *cut off* 280 nm, diâmetro interno de 46.4 mm, 180 mm de comprimento, e espessura de 1.8 mm) e um coletor parabólico concentrador (CPC) com refletores em alumínio anodizado eletropolido. Para garantir a homogeneização do LAS foi utilizado um béquer de borossilicato (1 L) e um agitador magnético (Centauro, CAMA-15), para a recirculação do LAS foi utilizado uma bomba peristáltica (MS TECNOPON, DMC 100), conforme apresentado na Figura 1a.

O reator da EC foi configurado a partir de um béquer de borossilicato com volume de 1000 mL, um par de placas de alumínio e aço inoxidável, perfazendo um eletrodo híbrido. Foram instalados em paralelo com distância entre placas de 1,5 cm e área efetiva entre placas de  $152,22 \text{ cm}^2$ . Foi acoplado uma fonte de corrente contínua (BK PRECISION / 1687B (20 V/10 A) para dissipar uma intensidade de corrente de 3 A na solução de LAS. Os eletrodos foram conectados de forma bipolar em terminais positivos e negativos, a descrição detalhada esta apresentada em Módenes et al., (2012), conforme apresentado na Figura 1b.



Fonte: Figura (b) Mollah et al., 2001

O reator da CQ foi baseado em um modelo comercial Jar-test (Poli Control, FlocControl IV) equipado com 6 jarros de polietileno (Vol. 2L). Para manter a agitação foram acoplados agitadores mecânicos, com controlador de gradiente de velocidade. Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de águas e efluentes, localizado na Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), *campus* Cerro Largo/RS.

## 2.3 Procedimentos Experimentais da FF, EC e CQ

Para realizar o processo FF, adicionou-se um volume de 1000 mL de LAS bruto em um béquer de borossilicato. Um agitador magnético e uma bomba peristáltica auxiliaram na homogeneização e na manutenção de uma taxa de fluxo de  $0,63 \text{ L min}^{-1}$ . Em sequência o LAS foi acidificado a pH 2,8, e adicionado uma concentração de  $\text{H}_2\text{O}_2$  de 9000 e Fe de 100



mg L<sup>-1</sup>. Por último, foram ligadas as lâmpadas UV-vis, e em intervalos de tempo de irradiação de 5, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150 e 180 minutos foram retiradas alíquotas para determinar os compostos aromáticos ( $\lambda$  254 nm) e a cor (mg Pt Co L<sup>-1</sup>).

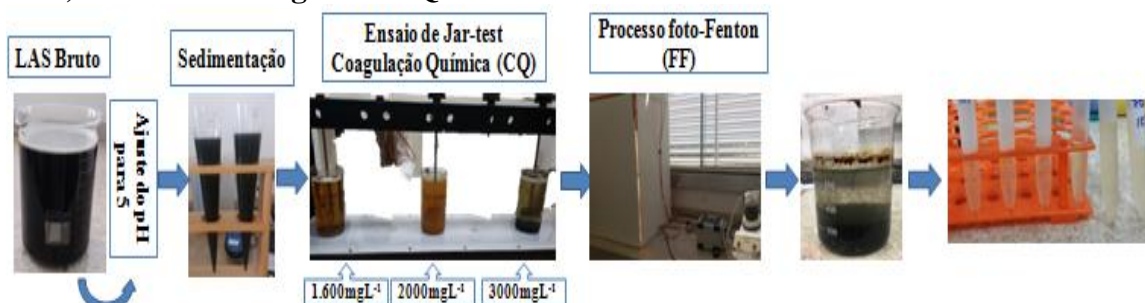
Para os experimentos de EC adicionou-se 800 mL do LAS em pH bruto (7,8) no reator, imergindo o eletrodo na solução, e aplicando uma intensidade de corrente contínua de 3 A, retirando alíquotas de 7 mL em intervalos de tempos de eletrólise de 0 a 180 min para determinações analíticas. Realizou-se a inversão de polaridade dos eletrodos, com efetivo para minimizar a passivação das placas e a redução da eficiência do processo EC a cada 15 min de eletrólise.

O pH do LAS foi ajustado para 5, posteriormente 1L da amostra acidificada foi submetida a sedimentação em cone inhoff por um período de 60 min, em seguida submeteu-se 0,8 (L) de sobrenadante ao Jar-test. Utilizou-se diferentes concentrações do coagulante sulfato de alumínio 1600, 2000 e 3000 mg L<sup>-1</sup> (Merck. Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 18H<sub>2</sub>O. 666,42 g/mol) para o processo de CQ, com tempo de mistura rápida (TMR) de 8 min em um gradiente de velocidade rápido (GRV) de 300 rpm após um tempo de mistura lenta (TML) de 40 min em um gradiente de velocidade lento (GVL) de 40 rpm, completando o processo da CQ.

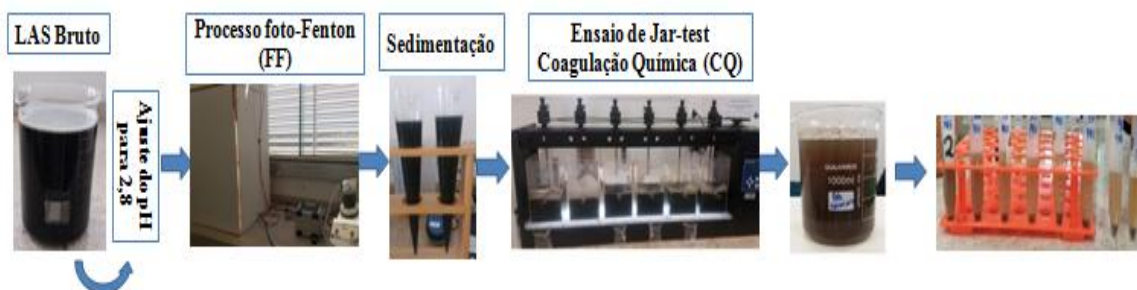
Foram avaliadas duas configurações de processos combinados aplicados no tratamento do LAS. A primeira foi baseada na utilização do processo CQ como pré-tratamento seguido de um pós-tratamento de FF (ver Figura 2 I). A segunda configuração foi a aplicação do processo FF como pré-tratamento seguido do processo CQ como pós-tratamento (ver Figura 2 II).

Figura 1 – Processos integrados aplicados no tratamento de LAS

**I) Processos integrados CQ → FF no tratamento do LAS**



**II) Processos integrados FF → CQ no tratamento do LAS**



Todas as amostras coletadas nos intervalos de tempo dos respectivos processos aplicados no tratamento de LAS foram previamente centrifugadas (CELM, LS-3 Plus) a condições de 3000 rpm pelo tempo de 1 min, posteriormente foram realizadas as determinações analíticas dos compostos aromáticos ( $\lambda$  254 nm) e Cor (mg Pt-Co L<sup>-1</sup>) para avaliar a respectiva eficiência dos processos em sistemas unitários e integrados.



### 3 Resultados e Discussões

#### 3.1 Caracterização do LAS

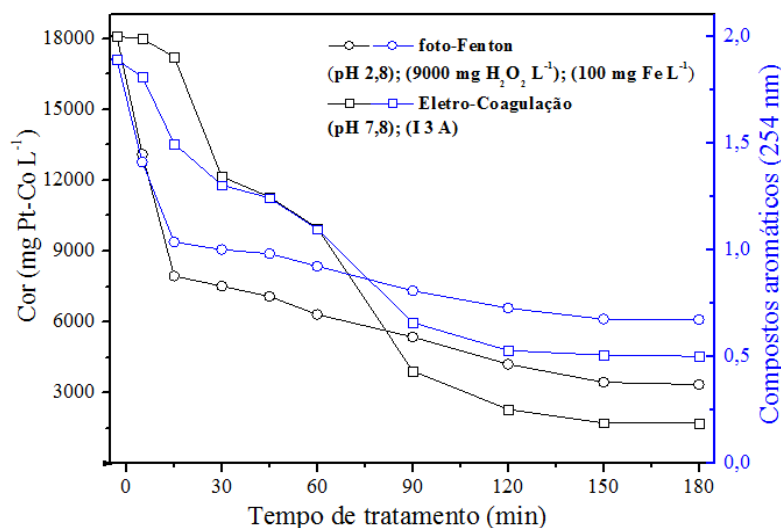
Seibert et al. (2017), reporta que o LAS bruto apresenta características recalcitrantes, compostos tóxicos e elevadas cargas orgânicas, expressas por altos valores de DBO<sub>5</sub>, DQO, compostos nitrogenados, assim como uma gama de compostos inorgânicos coloidais. Valores elevados de absorvância em ( $\lambda$  254 nm) tem relação diretas com os compostos aromáticos de cadeia simples e conjugadas. A caracterização do LAS bruto foi de uma cor contendo alta concentração de 18089 mg Pt-Co L<sup>-1</sup> e absorvância inicial de 1,89 u.a (compostos aromáticos,  $\lambda$  254 nm).

#### 3.2 Performance dos processos FF, EC e CQ

A reprodutibilidade das melhores condições experimentais dos processos FF, EC e CQ foram baseados em estudos reportados por (SEIBERT et al., 2017, PAULI et al., 2017 e DEUSCHELE, 2016), aplicados no tratamento de LAS concentrado. Estas condições foram aplicadas novamente no LAS de maneira unitária (ver Fig. 3) e integrada (ver Fig. 4).

Na Figura 3, foi possível verificar um melhor desempenho do processo de EC alcançando uma absorvância dos compostos aromáticos ( $\lambda$  254 nm) de 0,66 u.a e uma concentração residual da cor de 3924 mg Pt-Co L<sup>-1</sup>, enquanto que para o processo FF obteve-se apenas uma absorvância dos compostos aromáticos ( $\lambda$  254 nm) de 0,81 u.a e uma concentração residual da cor de 5369 mg Pt-Co L<sup>-1</sup>, em 90 minutos de tempo de tratamento.

Figura 3. Performance preliminar dos processos FF e EC para o tratamento de LAS



Embora o processo EC apresente melhores resultados, existe a possibilidade de ocorrer em escala de aplicação alguns inconvenientes, tais como, uma possível maior geração de massa de lodo, alto consumo de energia elétrica, a possibilidade de passivação dos eletrodos, uma maior liberação de íons metálicos para a solução e a necessidade de uma maior condutividade elétrica para passagem de uma corrente contínua (MOLLAH, 2001). Além disso, o processo de EC baseia-se na fundamentação da transferência do contaminante da fase líquida para o lodo residual, através da aplicação de uma intensidade de corrente, necessária para desestabilizar e coagular os contaminantes presentes no LAS, tornando-se um problema ambiental e econômico.





Para tanto, sugere-se a aplicação do processo FF, sendo caracterizados pela geração de radicais hidroxila ( $\cdot\text{OH}$ ), perfazendo espécies altamente reativas, oxidativas e pouco seletivas, capazes de degradar e/ou mineralizar compostos orgânicos e inorgânicos, de elevada complexidade, tais como o LAS.

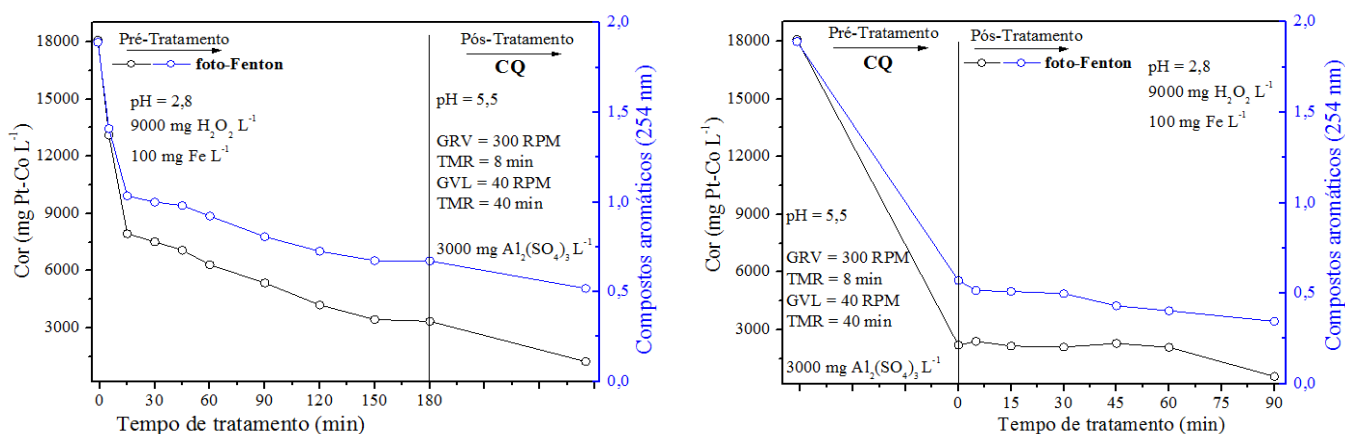
Na Tabela 1, esta apresentado a eficiência do processo físico-químico de CQ em concentrações de 1600, 2000 e 3000 mg  $\text{Al}_2\text{SO}_4 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$   $\text{L}^{-1}$ . A melhor condição foi verificada em concentração de 3000 mg  $\text{Al}_2\text{SO}_4 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$   $\text{L}^{-1}$ , alcançado uma absorbância dos compostos aromáticos ( $\lambda$  254 nm) de 0,57 u.a (69,8%) e uma concentração residual da cor de 2201 mg Pt-Co  $\text{L}^{-1}$  (87,8%).

Tabela 1 - Avaliação da eficiência do processo de CQ em pH de 5,5 aplicado no tratamento de LAS

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	Compostos aromáticos		Cor	
(mg $\text{L}^{-1}$ )	( $\lambda$ 254 nm)	% Remoção	(mg Pt-Co $\text{L}^{-1}$ )	% Remoção
Bruto	1,89	-	18089	-
1600	0,65	65,6	3828	78,8
2000	0,76	59,8	3637	79,9
3000	0,57	69,8	2201	87,8

Na Figura 4, verificam-se resultados semelhantes no final do processo para remoção dos compostos aromáticos quando utilizado o processo de FF aplicado como pós (CQ→FF) e pré-tratamento (FF→CQ), alcançando uma absorbância de 0,34 e 0,52 u.a dos compostos aromáticos ( $\lambda$  254 nm), respectivamente. Entretanto, uma maior diferença pode ser verificada para uma concentração residual da cor de 574 e 1244 mg Pt-Co  $\text{L}^{-1}$  para CQ→FF e FF→CQ, respectivamente.

Figura 4. Performance da aplicação do processo FF integrado com CQ no tratamento de LAS



Através disso, ressalta-se que o sistema integrado da CQ→FF alcança resultados satisfatórios e significativos para a redução dos compostos aromáticos ( $\lambda$  254 nm) e da coloração, auxiliando na descontaminação de poluentes altamente tóxicos, recalcitrantes e de baixa biodegradabilidade contidos no LAS. Cabe salientar que nesta configuração integrada de CQ→FF perfaz a necessidade de um menor tempo de tratamento, auxiliando contudo, a reprodutibilidade e aplicabilidade deste processo em escala real.



#### 4 Conclusão

O sistema integrado de tratamento aplicado em LAS de CQ→FF apresentou a melhor performance na redução dos compostos aromáticos ( $\lambda$  254 nm) e da coloração. Dentro desse contexto, é possível verificar que os processos unitários, tais como, FF, EC e CQ, não são capazes de remover ou degradar compostos de LAS e que a aplicação de POA's integrados a processos convencionais (físico-químicos) vem despontando como uma alternativa eficaz para minimização dos impactos ambientais no descarte final do LAS em corpos receptores, além de se tornar um método alternativo e inovador para aplicação de sistemas de tratamento em escala real.

#### Referências

APHA (American Public Health Association); AWWA (American Water Works Association); WEF (Water Environment Federation). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21ª Ed. Washington – DC: APHA, 2005.

CAMPOS, J. C.; MOURA, D.; COSTA, A. P.; YOKOYAMA, L.; ARAUJO, F. V. D. F.; CAMMAROTA, M. C.; CARDILLO, L. *Evaluation of pH, alkalinity and temperature during air stripping process for ammonia removal from landfill leachate*. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 48, n. 9, 2013, pg. 1105-1113.

CASTILHOS JUNIOR, A. B. D.; DALSASSO, R. L.; ROHERS, F. *Pré-tratamento de lixiviados de aterros sanitários por filtração direta ascendente e coluna de carvão ativado*. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, 2010, pg. 385-392.

CRESPILHO, F.; RESENDE, M. *Eletroflotação. Princípios e Aplicações*. **RiMa Editora**. São Paulo. 2004.

DEUSCHLE, J. **Otimização e comparação do coagulante Sulfato de Alumínio com coagulantes orgânicos para o tratamento de lixiviado de aterro sanitário bruto**. 2016. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental. Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2016.

MAEZONO, T.; TOKUMURA, M.; SEKINE, M.; KAWASE, Y. *Hydroxyl radical concentration profile in photo-Fenton oxidation process: generation and consumption of hydroxyl radicals during the discoloration of azo-dye Orange II*. **Chemosphere**, v. 82, n. 10, 2011, pg. 1422-1430.

MÓDENES, A. N.; ESPINOZA-QUIÑONES, F.R.; BORBA, F. H.; MANENTI, D. R. *“Performance evaluation of an integrated photo-Fenton – Electrocoagulation process applied to pollutant removal from tannery effluent in batch system”*. **Chemical Engineering Journal**, v. 179, Julho de 2012, pg. 1-9.

MOLLAH, M. Y. A.; SCHENNACH, R.; PARGA, J. R.; COCKE, D. L. *Electrocoagulation (EC)—science and applications*. **Journal of hazardous materials**, v. 84, n. 1, 2001, p. 29-41.

PAULI, A. R.; ESPINOZA-QUIÑONES, F. R.; DALL’OGLIO, I. C.; TRIGUEROS, D. E. G. et al. *“New insights on abatement of organic matter and reduction of toxicity from*



*landfill leachate treated by the electrocoagulation process*". **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, n. 2, Dezembro de 2017, pg. 5448-5459.

PAULI, A. R.; ESPINOZA-QUIÑONES, F. R.; TRIGUEROS, A. E. G.; MÓDENES, A. N. et al. *"Integrated two-phase purification procedure for abatement of pollutants from sanitary landfill leachates"*. **Chemical Engineering Journal**, v. 334, Fevereiro de 2018, pg. 19-29.

PIGNATELLO, J. J.; OLIVEROS, E.; MACKAY, A. *Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry*. **Critical reviews in environmental science and technology**, v. 36, n. 1, 2006, pg. 1-84.

SEIBERT, D.; DIEL, T.; WELTER, J. B.; SOUZA, A. L. et al. *"Performance of photo-Fenton process mediated by Fe (III)-carboxylate complexes applied to degradation of landfill leachate"*. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, n. 5, Outubro de 2017, pg. 4462-4470.

SILVA, T. F.; SOARES, P. A.; MANENTI, D. R.; FONSECA, A.; SARAIVA, I.; BOAVENTURA, R. A.; VILAR, V. J. *An innovative multistage treatment system for sanitary landfill leachate depuration: Studies at pilot-scale*. **Science of the Total Environment**, v. 576, 2017, pg. 99-117.