

# Análise do desempenho de um sistema eletroquímico no tratamento de esgoto doméstico

Gustavo Holz Bracher<sup>1</sup>, Andressa Gabriela Glusczak<sup>1</sup>, Émilie Scheunemann Lovato<sup>1</sup>, Rafaela De Maman<sup>2</sup>, Elvis Carissimi<sup>1\*</sup>

## Resumo

Para prevenir a degradação da qualidade de corpos hídricos, o lançamento de esgotos domésticos tem padrões limitados por legislação vigente, ficando condicionado a realização de um tratamento prévio. Dentre as alternativas de tratamento, a eletrocoagulação-flotação, processo eletroquímico que combina os mecanismos de oxidação, coagulação, floculação e flotação, têm se demonstrado capaz de promover um tratamento adequado para águas residuárias, além de apresentar aspectos positivos nas perspectivas operacional, econômica e sustentável. O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de um sistema de tratamento de esgoto doméstico composto por um reator de eletrocoagulação-flotação. O estudo foi realizado em um reator cilíndrico, com 1 L de capacidade, equipado com um par eletrodos de alumínio, conectados a uma fonte de alimentação de corrente contínua. As condições experimentais de distância entre os eletrodos, corrente elétrica, tempo de eletrólise e agitação foram de 1 cm, 1,5 A, 20 min e 262,5 rpm, respectivamente. O desempenho do sistema foi verificado através da análise de parâmetros físico-químicos do esgoto antes e após o tratamento. Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que o sistema de eletrocoagulação-flotação apresentou um desempenho satisfatório no tratamento de esgoto doméstico, sendo verificadas eficiências de remoção médias de 78,9% de demanda química de oxigênio, 97,3% de cor aparente e 90,1% de turbidez. A qualidade do esgoto, verificada após o tratamento no sistema, esteve em conformidade com a legislação vigente de despejo em corpos hídricos receptores, com exceção do pH, que se manteve na faixa de 9,1, indicando a necessidade de uma etapa adicional de correção de pH ao tratamento.

## Palavras-chave

Eletrocoagulação-flotação, eletrodos de alumínio, esgoto doméstico.

# Analysys of the performance of an electrochemical system for the domestic wastewater treatment

## Abstract

In order to prevent the degradation of the water bodies quality, the domestic wastewater discharge has standards limited by prevailing legislation, which is conditioned by accomplishment of a previous treatment. Among the treatment alternatives, the electrocoagulation-flotation, an electrochemical process that combines the mechanisms of oxidation, coagulation, flocculation and flotation, has been shown capable to promote an adequate treatment for wastewater, showing positive aspects in the operational, economic and sustainable perspectives. The objective of this study was to evaluate the performance of a domestic wastewater treatment system composed of an electrocoagulation-flotation reactor. The study was carried out in a cylindrical reactor, with 1 L of capacity, equipped with a pair of aluminum electrodes, connected to a direct-current power supply. The experimental conditions of distance between the electrodes, electrical current, electrolysis time and agitation were 1 cm, 1.5 A, 20 min and 262.5 rpm, respectively. The performance of the system was verified through the analysis of physical and chemical parameters of the wastewater before and after the treatment. Based on the results obtained, it was possible to conclude that the electrocoagulation-flotation system presented a satisfactory performance in the domestic wastewater treatment, with average removal efficiencies of 78.9% of chemical oxygen demand, 97.3% of apparent color and 90.1% of turbidity. The quality of the wastewater, verified after the treatment in the system, was in compliance with the standard legislation of effluent discharge in water bodies, with the exception of the pH, which remained in the range of 9.1, indicating the need for an additional step of pH correction to the treatment.

## Keywords

Electrocoagulation-flotation, aluminium electrodes, domestic wastewater.

## I. INTRODUÇÃO

O esgoto doméstico pode ser definido como os despejos líquidos originados do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas, abrangendo os efluentes gerados em residências, conjuntos habitacionais,

estabelecimentos comerciais, edificações públicas, dentre outras fontes antrópicas não industriais [1], [2]. Assim, os padrões de lançamento de esgotos são regidos pela Resolução nº 430/11 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que visa assegurar a qualidade da água dos corpos hídricos quanto à carga poluidora dos efluentes

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Maria-Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal da Fronteira Sul-Brasil

\*Email: ecarissimi@gmail.com

Received: 29/08/2018

Accepted: 29/12/2018

despejados nestes, que, por vezes, ficam condicionados ao tratamento.

Os tratamentos convencionais de esgoto doméstico normalmente são baseados em processos biológicos, os quais podem ser demorados, necessitar de grande área operacional e não ser eficazes para remoção de contaminantes como nutrientes, compostos orgânicos persistentes, patógenos e micropoluentes [3], [4], [5], [6]. Tal fato tem levado ao surgimento de tecnologias alternativas e sistemas de tratamento integrados. Tratamentos prévios ou posteriores, de naturezas distintas, são integrados para se aumentar a eficiência global do sistema, reduzir a área de instalação e os custos, ou transformar quimicamente os poluentes em substâncias biologicamente degradáveis ou mais facilmente elimináveis pelos processos convencionais [7]. Uma das alternativas são os processos eletroquímicos, que tem demonstrado potencial de aplicação para o tratamento de esgotos, devido a possibilidade de serem eficazes na remoção de contaminantes (como nutrientes, compostos orgânicos, patógenos e micropoluentes [8]), além de apresentarem vantagens como fácil operação, pequeno espaço físico requerido, baixos custos e geração de baixas quantidades de lodo [9], [10], [11], [12].

Segundo [13], a eletrocoagulação-flotação (ECF) é um processo eletroquímico regido principalmente por três

mecanismos: a liberação de íons coagulantes (ânodo), a geração de microbolhas de gás oxigênio e predominantemente hidrogênio (ânodo e cátodo) e a flotação dos flocos formados. Estes mecanismos estão apresentados na Figura 1. Através do estabelecimento de uma corrente elétrica no meio aquoso, entre os eletrodos (metais, principalmente Al e Fe), ocorre a oxidação do ânodo (dissolução anódica) e geração de espécies coagulantes, que atuam na neutralização e agregação das partículas suspensas e adsorção de contaminantes dissolvidos [13], [14]. O coagulante gerado in situ pela oxidação do material do ânodo e, a exemplo de eletrodos de Al, pela liberação de cátions de Al, tem o mesmo efeito da adição de sais desse metal [15], [16]. Esta técnica de tratamento é versátil e competitiva para instalações em tanques que requerem grandes volumes de água a ser tratado. Suas unidades são pequenas e compactas, podendo ser de 6 a 36 vezes menor do que unidades baseadas na oxidação biológica [17], requerem pouca manutenção e os custos operacionais podem ser mais baixos do que os processos de coagulação química convencionais [18].

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de um sistema de tratamento de esgoto doméstico composto por um reator de ECF, com base na qualidade do esgoto antes e após o tratamento.

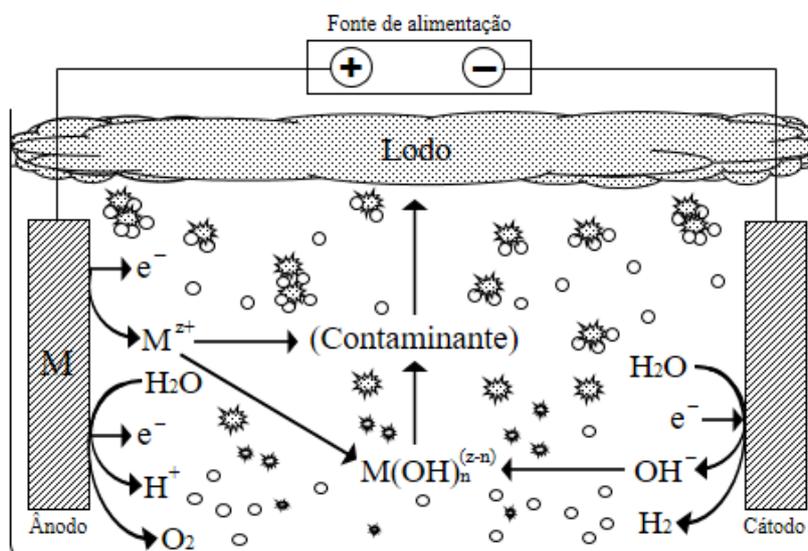


Fig. 1: Principais mecanismos da eletrocoagulação-flotação.

## II. MATERIALE MÉTODOS

### A. Água residuária

A amostra de esgoto doméstico utilizada no estudo foi coletada no tanque de equalização de uma Estação de Tratamento de Efluentes Experimental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), que recebe parte dos efluentes gerados na Casa do Estudante Universitário II. Após a coleta, a amostra foi encaminhada ao Laboratório de Engenharia de Meio Ambiente, do Centro de Tecnologia da UFSM, onde foram realizadas as análises qualitativas e conduzidos os estudos de ECF.

### B. Sistema de eletrocoagulação-flotação

O reator utilizado nos estudos de ECF foi constituído por um recipiente cilíndrico de acrílico (22,20 x 10,80 cm), com volume útil de 1 L, equipado com dois eletrodos de alumínio (9,10 x 7,50 x 0,05 cm), com conexão monopolar, ligados à uma fonte de alimentação de corrente contínua (0 - 30 V, 0 - 2,5 A), como representado na Figura 2. Os eletrodos foram completamente submersos na amostra a ser tratada, resultando em uma área superficial ativa de 67,50 cm<sup>2</sup>.

C. Procedimentos experimentais

As condições experimentais adotadas no estudo foram determinadas com base em estudos preliminares. Foram mantidas, durante o experimento, uma distância entre os eletrodos de 1,00 cm, corrente elétrica de 1,50 A, tempo de eletrólise de 20 min e agitação de 262,5 rpm. Após o tempo de eletrólise, o fornecimento de energia ao sistema foi cessado e a amostra deixada em repouso durante 5 min, para flotação dos precipitados remanescentes. O experimento foi realizado em triplicata, com o objetivo de verificar a reprodutibilidade e variação dos resultados obtidos.

D. Métodos analíticos

Para avaliação da qualidade do esgoto antes e após o tratamento, foram analisados os parâmetros de condutividade, pH, oxigênio dissolvido, temperatura, demanda química de oxigênio (DQO), cor aparente, turbidez e sólidos totais. Os parâmetros foram determinados conforme as metodologias indicadas por [19]. A eficiência de remoção de DQO, cor aparente, turbidez e sólidos totais, do tratamento eletroquímico, foram determinadas a partir da equação (1).

$$E = \left(1 - \frac{C_B}{C_A}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

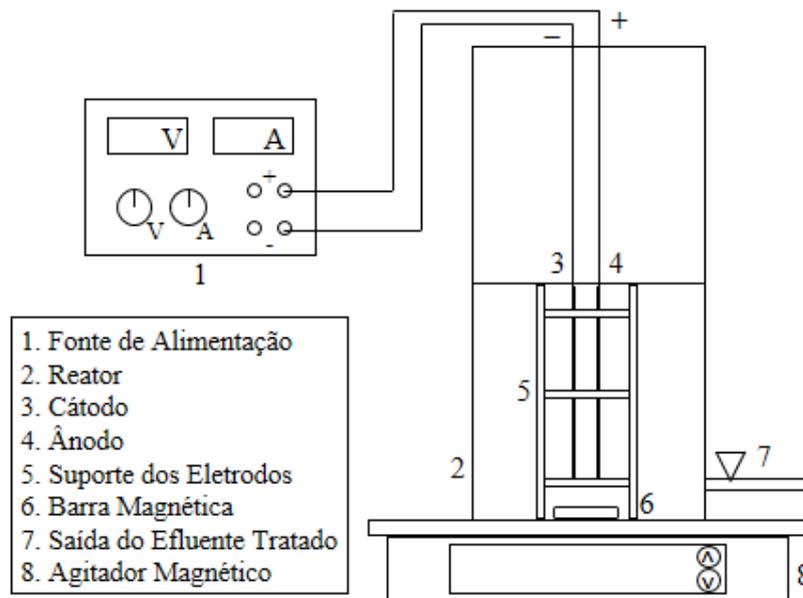


Fig. 2: Representação esquemática do reator de eletrocoagulação-flotação.

III. RESULTADOS

Os valores obtidos durante o estudo estão apresentados na Tabela 1, a qual demonstra a caracterização do esgoto doméstico antes e após o tratamento por ECF, bem como as eficiências de remoção observadas.

Durante o tratamento foram observados aumentos dos valores de pH, oxigênio dissolvido e temperatura do esgoto. Outros autores verificaram aumento de pH no tratamento de

efluentes por eletrocoagulação com eletrodos de alumínio [20], [21]. Barrera-Díaz et al. [20] atribuiu este aumento no pH às reações catódicas de geração de íons OH<sup>-</sup>, a partir da eletrólise da água, e de gás H<sub>2</sub>, a partir do consumo de íons H<sup>+</sup>. De acordo com Chen et al. [21], o aumento do pH também pode ser consequência da interação entre o alumínio liberado com outros ânions presentes no esgoto doméstico, como Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, deixando livre na solução parte dos íons OH<sup>-</sup> produzidos no tratamento.

Tabela 1: Características do esgoto doméstico antes e após o tratamento eletroquímico.

Parâmetro	Valor Médio (± Desvio Padrão)		
	Esgoto sem tratamento	Esgoto tratado	Eficiência de Remoção (%)
Condutividade (µS·cm <sup>-1</sup> )	1.056,0	1.087,6 (± 38,0)	-
pH	7,6	9,1 (± 0,0)	-
Oxigênio Dissolvido (mg·L <sup>-1</sup> )	0,0	1,4 (± 0,6)	-
Temperatura (°C)	19,0	27,7 (± 0,6)	-
Demanda Química de Oxigênio (mg·L <sup>-1</sup> )	1.029,3	217,6 (± 5,6)	78,9 (± 0,5)
Cor Aparente (uC)	4.316,3	118,3 (± 10,1)	97,3 (± 0,2)
Turbidez (NTU)	136,3	13,6 (± 0,9)	90,1 (± 0,7)
Sólidos Totais (mg·L <sup>-1</sup> )	985,0	484,4 (± 43,8)	50,8 (± 4,4)

Romero [22] também observou aumento de oxigênio dissolvido no tratamento de esgoto doméstico por ECF, atribuindo este efeito à liberação de microbolhas de oxigênio durante o tratamento. O aumento na temperatura observado está ligado à perda de energia empregada durante o tratamento na forma de calor, seja pelo efeito de Joule, decorrente do choque de elétrons em átomos da solução [23], ou pela ativação das reações de transferência de elétrons na solução [24], [25].

Além disso, foram registradas elevadas eficiências de remoção de DQO (78,9%), cor aparente (97,3%) e turbidez (90,1%), o que evidencia o potencial do tratamento quanto a clarificação e remoção de matéria orgânica do esgoto doméstico. As remoções observadas são consequência principalmente da separação dos contaminantes do meio aquoso pelos processos de coagulação, floculação e flotação [12]. A eficiência de remoção de sólidos totais observada (50,8%) foi menor que as eficiências de remoção de DQO e turbidez, parâmetros que indicam a presença de matéria orgânica e sólidos suspensos, respectivamente. Assim, a menor eficiência de remoção de sólidos totais indica a predominância de sólidos inorgânicos dissolvidos no esgoto tratado, o que pode ser resultado de uma limitação do tratamento na remoção de constituintes inorgânicos dissolvidos ou da presença de alumínio residual após o tratamento por ECF.

A remoção de DQO observada no tratamento encontrou-se dentro das faixas de remoção esperadas em sistemas de tratamento convencionais, compostos de diferentes combinações de lagoas e reatores biológicos [26]. No entanto, cabe ressaltar que o tratamento por ECF foi realizado em uma única unidade e em curto tempo de operação.

A legislação considerada a respeito do lançamento de efluentes em corpos hídricos foi a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 430/11 [27], a nível nacional, e do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) nº 355/17 [28], a nível estadual. Em ambas resoluções a condição de lançamento para o parâmetro de pH é na faixa de 6 a 9, porém, como apresentado na Tabela 1, o pH do esgoto tratado permaneceu ligeiramente acima deste limite. Além disso, em pH alcalino ocorre a formação de espécies solúveis de hidróxidos de alumínio [29], o que, além de prejudicar a eficiência do tratamento por ECF [30], contribui para a presença de alumínio residual no esgoto tratado, podendo inviabilizar o seu lançamento em corpos hídricos, visto que a concentração de alumínio é limitada pela CONSEMA nº 355/2017 [28]. Portanto, foi constatada a necessidade de uma etapa adicional de correção de pH no tratamento.

Se tratando da temperatura, o efluente pode apresentar até 40 °C, de acordo com ambas as resoluções [27], [28], porém a CONAMA nº 430/11 [27] ressalta que a variação na temperatura do corpo receptor não poderá ultrapassar 3 °C na zona de mistura. Considerando que a temperatura média de águas naturais varia entre 20 a 25 °C em países tropicais [31], como o Brasil, e que a temperatura média do esgoto após o tratamento foi de 27,7 °C, pode-se dizer que o efluente encontra-se de acordo com o exigido.

A Resolução CONAMA nº 430/11 não traz valores de referência de DQO [27], mas a CONSEMA nº 355/17 sim, os quais diferem de acordo com a vazão a ser lançada em corpo receptor, variando de 150 mg·L<sup>-1</sup> (10.000 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup> ≤ Q) à 330 mg·L<sup>-1</sup> (Q < 200 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>) [28]. O esgoto tratado esteve dentro dos limites para vazões de lançamento menores que 10.000 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>.

A cor aparente não tem limite definido, porém, segundo a CONSEMA nº 355/17 [28], o efluente lançado não deve modificar a cor verdadeira do corpo hídrico receptor. De acordo com [31], as águas naturais de corpos hídricos apresentam, geralmente, cor verdadeira na faixa de 15 a 100 uC, podendo o valor de 118,3 uC de cor aparente, encontrado no esgoto após tratamento, ser considerado satisfatório.

#### IV. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que o sistema de ECF apresentou um desempenho satisfatório na remoção de matéria orgânica, cor e turbidez do esgoto doméstico, apresentando eficiências de remoção de 78,9% de DQO, 97,3% de cor aparente e 90,1% de turbidez. Além disso, o esgoto, após o tratamento no sistema de ECF, apresentou parâmetros de qualidade em conformidade com a legislação de despejo em corpos hídricos receptores, vigente nos âmbitos estadual e nacional, com exceção do pH, que se manteve ligeiramente acima dos limites estabelecidos nesta, indicando a necessidade de uma etapa adicional de correção de pH ao tratamento.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro.

#### V. BIBLIOGRAFIA

- [1] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 9.648: Estudos de Concepção de Sistemas de Esgoto Sanitário*. ABNT, 1986.
- [2] BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. *Introdução à engenharia ambiental – O desafio do desenvolvimento sustentável*. Editora Pearson, 2 ed., 2005.
- [3] MOTA, F. S. B.; VON SPERLING, M. (Coord.). *Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção*. ABES, 2009.
- [4] LEITE, G. S.; AFONSO, R. J. C. F.; AQUINO, S. F. “Caracterização de contaminantes presentes em sistemas de tratamento de esgotos, por cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas tandem em alta resolução”. *Química Nova*, vol. 33, n. 3, pg. 734-738, 2010.
- [5] VERLICCHI, P.; AL AUKIDY, M.; GALLETI, A.; PETROVIC, M.; BARCELÓ, D. “Hospital effluent: investigation of the concentrations and distribution of pharmaceuticals and environmental risk assessment”. *Science of the Total Environment*, vol. 430, pg. 109-118, 2012.
- [6] MAYER, R. E.; BOFILL-MAS, S.; EGGLE, L.; REISCHER, G. H.; SCHADE, M.; FERNANDEZ-CASSI, X.; FUCHS, W.; MACH, R. L.; LINDNER, G.; KIRSCHNER, A.; GAISBAUER, M.; PIRINGER, H.; BLASCHKE, A. P.; GIRONES, R.; ZEISSNER, M.; SOMMER, R.; FARNLEITNER, A. H. “Occurrence of human-associated Bacteroidetes genetic source tracking markers in raw and treated wastewater of municipal and domestic origin and comparison to standard and alternative indicators of faecal pollution”. *Water Research*, vol. 90, pg. 265-276, 2016.
- [7] MANENTI, D. R.; BORBA, F. H.; MÓDENES, A. N.; ESPINOZA-QUIÑONES, F. R.; PALÁCIO, S. M.; VILAR, V. J. P.; BERGAMASCO, R. “Avaliação do desempenho de um sistema de tratamento utilizando os processos eletrocoagulação e foto-fenton integrados no tratamento de um efluente têxtil”. *Engvista*, vol. 16, n. 3, pg. 420-431, 2014.
- [8] SYMONDS, E. M.; COOK, M. M.; MCQUAIG, S. M.; ULRICH, R. M.; SCHENCK, R. O.; LUKASIK, J. O.; VAN VLEET, E. S.;

- BREITBART, M. “Reduction of nutrients, microbes, and personal care products in domestic wastewater by a benchtop electrocoagulation unit”. *Scientific reports*, vol. 5, pg. 1-8, 2015
- [9] EMAMJOMEH, M. M.; SIVAKUMAR, M.; VARYANI, A. S. “Analysis and the understanding of fluoride removal mechanisms by an electrocoagulation/flotation (ECF) process”. *Desalination*, vol. 275, n. 1-3, pg. 102-106, 2011.
- [10] FORMENTINI, D. *Tratamento eletroquímico de esgotos sanitários*. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2012.
- [11] COTILLAS, S.; LLANOS, J.; CAÑIZARES, P.; MATEO, S.; RODRIGO, M. A. “Optimization of an integrated electrodisinfection/electrocoagulation process with Al bipolar electrodes for urban wastewater reclamation”. *Water research*, vol. 47, n. 5, pg. 1741-1750, 2013.
- [12] ELAZZOULI, M.; HABOUBI, K.; ELYOUBI, M. S. “Electrocoagulation flocculation as a low-cost process for pollutants removal from urban wastewater”. *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 117, pg. 614-626, 2017.
- [13] EMAMJOMEH, M. M.; SIVAKUMAR, M. “Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes”. *Journal of environmental management*, vol. 90, n. 5, pg. 1663-1679, 2009.
- [14] JIANG, J. Q.; GRAHAM, N.; ANDRÉ, C.; KELSALL, G. H.; BRANDON, N. “Laboratory study of electro-coagulation–flotation for water treatment”. *Water research*, vol. 36, n. 16, pg. 4064-4078, 2002.
- [15] MOLLAH, M. Y. A.; SCHENNACH, R.; PARGA, J. R.; COCKE, D. L. “Electrocoagulation (EC)—science and applications”. *Journal of hazardous materials*, vol. 84, n. 1, pg. 29-41, 2001.
- [16] HAN, M.; SONG, J.; KWON, A. “Preliminary investigation of electrocoagulation as a substitute for chemical coagulation”. *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 2, n. 5–6, pg. 73–76, 2002.
- [17] LIN, C.; LO, S.; KUO, C.; WU, C. “Effectiveness of electrochemical treatment of municipal sewage”. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 131, n. 3, pg. 491-495, 2005.
- [18] HIRZALLAH, W. *Effectiveness of Electrochemical Treatment of Municipal Sewage*. Dissertação (Master degree in Applied Science – Civil Engineering) – Concordia University, 2011.
- [19] APHA (American Public Health Association). *Standard methods for examination of water and wastewater*. APHA, 2012.
- [20] BARRERA-DÍAZ, C.; BERNAL-MARTÍNEZ, L. A.; NATIVIDAD, R.; PERALTA-HERNÁNDEZ, J. M. “Synergy of electrochemical/O<sub>3</sub> process with aluminum electrodes in industrial wastewater treatment”. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 51, n. 27, pg. 9335-9342, 2012.
- [21] CHEN, X.; CHEN, G.; YUE, P. L. “Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation”. *Separation and Purification Technology*, vol. 19, pg. 65-76, 2000.
- [22] ROMERO, J. A. P. *Eletroflotação aplicada ao tratamento de esgoto sanitário*. Tese (Doutorado em Ciências – Química Analítica) – Universidade de São Paulo, 2009.
- [23] RICORDEL, C.; DARCHEN, A.; DIMITER, H. “Electrocoagulation-electroflotation as a surface water treatment for industrial uses”. *Separation and Purification Technology*, vol. 74, pg. 342-347, 2010.
- [24] ILHAN, F.; KURT, U.; APAYDIN, O.; GONULLU, M. T. “Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes”. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 154, pg. 381-389, 2008.
- [25] SANTHOSH, P.; REVATHI, D.; SARAVANAN, K. “Treatment of sullage wastewater by electrocoagulation using stainless steel electrodes”. *International Journal of Chemical Science*, vol. 13, n. 3, pg. 1173-1186, 2015.
- [26] VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Vol. 1: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Editora UFMG, 4 ed., 2014.
- [27] CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). *Resolução nº 430, de 13 de Maio de 2011*. Diário Oficial da União, 2011.
- [28] CONSEMA (Conselho Estadual do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul). *Resolução CONSEMA nº 355/2017*. Diário Oficial do Estado, 2017.
- [29] JIMÉNEZ, C.; SÁEZ, C.; MARTÍNEZ, F.; CAÑIZARES, P.; RODRIGO, M. A. “Electrochemical dosing of iron and aluminum in continuous processes: a key step to explain electro-coagulation processes”. *Separation and purification technology*, vol. 98, pg. 102-108, 2012.
- [30] BENSADOK, K.; BENAMMAR, S.; LAPICQUE, F.; NEZZAL, G. “Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes”. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 152, pg. 423-430, 2008.
- [31] LIBÂNIO, M. *Fundamentos de qualidade e tratamento de água*. Editora Átomo, 4 ed., 2016.