

## Artigo

## Aplicação de Eletrocoagulação na Remoção de Fosfatos em Efluente Doméstico Artificial Preparado a Partir de Bebida Refrigerante - Um Experimento para Graduação

Avellar, I. G. J.;\* Cotta, T. A. P. G.; Neder, A. V. F.

Rev. Virtual Quim., 2015, 7 (6), 2255-2272. Data de publicação na Web: 21 de outubro de 2015

<http://www.uff.br/rvq>

### Electrocoagulation Applied to Removal of Phosphates from Artificial Domestic Effluent Prepared with Cola Beverage - An Undergraduate Experiment

**Abstract:** An undergraduate chemistry experiment on water pollution remediation is presented. It describes the use of electrocoagulation to remove phosphates from an artificial domestic effluent prepared with cola soft drink, using aluminum foil and aluminum metallic plates as electrodes. Phosphate concentrations in the electrolytic solution were determined by a standard spectrophotometric methodology. Results using the artificial effluent were comparable to those observed in an analogous procedure using a sample of urban domestic effluent. Besides, electrodes constructed with aluminum foil gave similar results to those observed with metallic plates, with the advantage of a lower experimental cost. Millimetric corrosion holes at the aluminum paper anode and adsorption of beverage-colored material on the flocs, formed during electrocoagulation, were easily visible at the end of the process. The experiment presents fundamental chemistry techniques for environmental sanitation issues while introducing students to the aspects of Brazilian legislation regarding maximum allowable phosphorus concentration in effluents.

**Keywords:** Electrocoagulation; phosphate; wastewater; undergraduate experiment; green chemistry.

### Resumo

Este artigo descreve um experimento de graduação sobre remediação de águas poluídas, especificamente a remoção de fosfatos em efluente artificial preparado com refrigerante de cola por meio da eletrocoagulação, utilizando eletrodos de papel alumínio e placas metálicas. As concentrações de fosfato na solução eletrolítica foram determinadas por metodologia espectrofotométrica padrão. Os resultados obtidos com o efluente artificial foram comparáveis aos obtidos em procedimento análogo com uma amostra de esgoto doméstico urbano. Além disso, os resultados da eletrocoagulação com eletrodos construídos com papel alumínio foram semelhantes aos obtidos com placas metálicas, reduzindo-se o custo do experimento. Pequenas perfurações decorrentes da corrosão do papel alumínio, que atua como ânodo, e a adsorção do corante da bebida refrigerante nos flocos formados durante a eletrocoagulação são facilmente visíveis ao final do processo. O procedimento experimental alia técnicas fundamentais de Química à solução de questões ambientais, além de apresentar aos estudantes aspectos da legislação brasileira que regulamenta a concentração máxima permitida de fósforo em efluentes.

**Palavras-chave:** Eletrocoagulação; fosfato, esgoto; experimento de graduação; química verde.

\* Universidade de Brasília, Instituto de Química, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília-DF, Brasil.

 [isaavl@unb.br](mailto:isaavl@unb.br)

DOI: [10.5935/1984-6835.20150134](https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150134)

## **Aplicação de Eletrocoagulação na Remoção de Fosfatos em Efluente Doméstico Artificial Preparado a Partir de Bebida Refrigerante - Um Experimento para Graduação**

**Isa G. J. de Avellar, Taís Augusto P. G. Cotta, Amarílis V. F. Neder**

Universidade de Brasília, Instituto de Química, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília-DF, Brasil.

\* [isaavl@unb.br](mailto:isaavl@unb.br)

*Recebido em 10 de fevereiro de 2015. Aceito para publicação em 21 de outubro de 2015*

### **1. Introdução**

### **2. Parte Experimental**

**2.1.** Materiais e métodos

**2.2.** Preparo de soluções

**2.3.** Curva padrão analítica

**2.4.** Construção da célula eletrolítica

**2.5.** Coleta das alíquotas da solução eletrolítica para análise do teor de fósforo e determinação do pH

**2.6.** Eletrocoagulação de solução de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$

**2.7.** Eletrocoagulação de EDP da ETE-Norte-CAESB

**2.8.** Eletrocoagulação de solução de refrigerante de cola

### **3. Resultados e Discussão**

**3.1.** Desenvolvimento da metodologia e eletrocoagulação de EDP da ETE-Norte-CAESB

**3.2.** Eletrocoagulação de solução de refrigerante de cola

### **4. Conclusões**

## **1. Introdução**

Com a criação dos cursos de Ciências Ambientais, Engenharia Ambiental e, mais recentemente, Engenharia Química, na Universidade de Brasília, surgiu uma demanda por experimentos que abordassem conceitos fundamentais de Química em um

contexto relacionado às questões ambientais, compatíveis com a infraestrutura dos nossos laboratórios de ensino de graduação.

O tratamento de efluentes líquidos, de origem doméstica ou industrial, é um tema interdisciplinar que possibilita a discussão de inúmeros tópicos de Química. A compreensão dos diferentes tipos de tratamento de acordo com as características

físicas, químicas e biológicas do efluente, bem como o conhecimento dos parâmetros de qualidade das águas para lançamento do efluente no corpo receptor, conforme estabelecido em legislação, exemplificam aspectos que devem ser apresentados aos estudantes para enriquecer a sua formação profissional.

A eletrocoagulação (EC) é uma técnica eletroquímica para tratamento de efluentes aquosos em que a adequação dos parâmetros operacionais para diferentes tipos de efluentes vem sendo muito pesquisada em escala de laboratório nos últimos anos. Tal interesse deve-se ao menor custo da EC em comparação com tratamentos químicos envolvendo coagulação,<sup>1</sup> facilidade de automação, além de ser uma técnica que atende a muitos dos preceitos da Química Verde, como a diminuição do uso de reagentes químicos e seus eventuais contaminantes, ausência de contra-íons (sulfato e cloreto) presentes nos agentes coagulantes convencionais e redução da quantidade de lodo formada no processo.<sup>2,3</sup> A eventual adoção de energia elétrica na EC proveniente de fontes renováveis alternativas (energias solar e eólica, por exemplo), tornaria a técnica ainda mais afinada com os princípios da Química Verde.<sup>2</sup>

Efluentes contendo substâncias com certas características físico-químicas, toxicológicas ou ecotoxicológicas e que, eventualmente, não são facilmente biodegradáveis ou que inibem a degradação microbiológica, requerem um tratamento diferenciado antes de serem enviados a uma estação de tratamento de esgotos domésticos ou lançados em um corpo receptor. Na literatura é possível encontrar vários exemplos de aplicação da EC no tratamento de águas para abastecimento humano<sup>4</sup> e de efluentes com características ambientalmente inaceitáveis devido à presença de substâncias poluentes, incluindo substâncias que conferem coloração destoante, odores desagradáveis ou alterações extremas de pH.<sup>3</sup>

Na última década, diversos parâmetros

inerentes à técnica de EC, como o material e configuração dos eletrodos, distância intereletrodo, pH inicial, voltagem, densidade de corrente, condutividade e tempo de eletrólise, foram otimizados para o tratamento específico de efluentes provenientes de indústrias têxteis,<sup>1</sup> de processamento de óleo,<sup>5,6</sup> de galvanoplastia,<sup>7</sup> fábricas de papel,<sup>8</sup> indústrias farmacêuticas,<sup>9,10</sup> além de efluentes muito ricos em matéria orgânica, originários de indústrias petrolíferas,<sup>11</sup> de laticínios<sup>12</sup> e de abatedouros.<sup>13,14</sup>

Diversos estudos descrevem as condições ótimas para a EC de efluentes naturais ou artificiais, inclusive solução lixiviada de solo contaminado<sup>3,15,16</sup> e águas poluídas de rios,<sup>17,18</sup> contendo espécies químicas potencialmente danosas ao meio ambiente, como arsênio,<sup>19</sup> fluoreto,<sup>19</sup> fosfato,<sup>19,20</sup> sulfetos,<sup>21</sup> boro,<sup>22</sup> nitrato,<sup>19</sup> zinco, cobre, cromo, níquel, cádmio, e chumbo.<sup>3,4,19,23,24</sup> Além da eficiência na remoção de substâncias dissolvidas ou emulsionadas, a EC vem sendo empregada na remoção de sólidos em suspensão ou de partículas coloidais, como argilas em geral,<sup>25</sup> encontradas em efluentes de mineradoras, ou em efluentes originários de indústrias de processamento de mármore.<sup>26</sup>

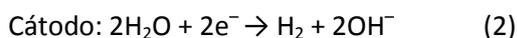
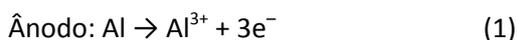
A EC é muitas vezes referida na literatura como sinônimo de eletrofloculação<sup>14</sup> ou eletroflotação,<sup>6,21</sup> alternativamente, alguns autores empregam a expressão EC/flotação<sup>5,19</sup> com os termos associados. As diversas designações mencionadas remetem aos fenômenos físicos e químicos envolvidos no processo, que se inicia em uma célula eletroquímica, onde uma diferença de potencial é aplicada a eletrodos de metal, em geral ferro ou alumínio, imersos na solução eletrolítica a ser tratada. Sob a ação de uma corrente elétrica ocorre a formação da espécie coagulante *in situ*, em decorrência da oxidação do metal de sacrifício no ânodo, e a formação simultânea de íons hidróxido e gás hidrogênio no cátodo.

Os íons metálicos em meio aquoso formam hidróxidos metálicos neutros  $M(OH)_3$ , pouco solúveis em uma determinada

faixa de pH, ou espécies iônicas complexas  $M_x(H_2O)_y(OH)_z^{n+}$ . Os hidróxidos metálicos em suspensão (“coagulados”) atraem substâncias e partículas, neutras ou carregadas, presentes no meio, formando agregados de maior dimensão (“flocos”), que podem sedimentar ou ser carregados até a superfície, pela ação das bolhas de gás hidrogênio, fenômeno esse conhecido como flotação. Os flocos contendo os poluentes originalmente presentes na solução eletrolítica podem ser recolhidos por um método de separação conveniente e encaminhados para a destinação final mais adequada. Assim, nas condições descritas, ainda que os mecanismos operantes na remoção dos mais diversos tipos de poluentes por EC não sejam totalmente compreendidos,<sup>3,4,27</sup> é possível reconhecer três fenômenos induzidos electroquimicamente: eletrocoagulação, eletrofloculação e eletroflotação.

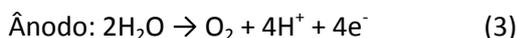
Do ponto de vista da Química, coagulação e floculação são termos relacionados ao fenômeno da precipitação. Entretanto, na área tecnológica, eletrocoagulação refere-se a uma etapa inicial de produção eletroquímica de agentes químicos coagulantes, e eletrofloculação à etapa seguinte em que ocorre a adsorção de espécies químicas contaminantes, como íons ou partículas coloidais presentes no meio em tratamento, na superfície do agente coagulante.<sup>28</sup>

Enquanto na coagulação química (CQ) são usados sais metálicos, polímeros ou polieletrólitos, na EC o coagulante é gerado *in situ* pela oxidação eletrolítica de um metal conveniente no ânodo. Empregando-se eletrodos de alumínio, as semi-reações nos eletrodos são:



O cátion alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) gerado no ânodo reage com moléculas de água produzindo  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , a espécie insolúvel considerada

como o principal agente responsável pela coagulação.<sup>29</sup> Uma outra semi-reação a ser considerada é a oxidação da água no ânodo,<sup>30</sup> enquanto a reação catódica correspondente é a mesma mostrada na equação 2.



Os gases gerados nos eletrodos, hidrogênio (equação 2) e oxigênio (equação 3), formam correntes de microbolhas que provocam a flotação dos materiais coagulados. A eficiência do processo de flotação está associada ao tamanho das bolhas, quanto menores, maior a superfície de contato com as partículas poluentes, bem como à sua adequada dispersão no meio.

Há alguns exemplos na literatura de experimentos de laboratório simplificados que empregam a eletrocoagulação no contexto do ensino de Química voltado para questões ambientais. Ibanez<sup>31</sup> em uma revisão das contribuições das técnicas eletroquímicas aplicadas ao saneamento ambiental apresentou um experimento simples de eletrocoagulação para remoção de corantes orgânicos de um efluente artificial. Mais recentemente, a eletrocoagulação de uma solução aquosa contendo um azo corante foi apresentada como um experimento de graduação.<sup>32</sup>

O presente artigo visa apresentar didaticamente a técnica de EC, contribuindo com a proposta de um experimento de baixo custo e fácil execução em laboratórios de ensino, empregando-se uma metodologia analítica adotada em estações de tratamento de efluentes para o controle de um importante poluente, o fosfato.

O aumento da concentração de nutrientes em ecossistemas aquáticos, em especial fósforo e nitrogênio, favorece o crescimento excessivo de biomassa. Este fenômeno, denominado eutrofização, traz como consequências aumento na demanda biológica de oxigênio, alteração de pH, turbidez da água, liberação de toxinas,

podendo ocasionar morte de peixes e animais. Geralmente, a excessiva concentração de fósforo em corpos hídricos está relacionada a despejos industriais, a atividade agropecuária ou, ainda, a efluentes domésticos, sendo os detergentes para lavar roupa uma das principais fontes de íons fosfato. A Resolução CONAMA n° 357 de 17/3/2005 classifica os corpos de água superficiais e, conjuntamente com a Resolução CONAMA n° 430 de 13/5/2011, estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. De acordo com as citadas resoluções, os limites máximos permitidos para fósforo total (P) em efluentes a serem lançados direta ou indiretamente em corpos de água doce variam de 0,030 mg L<sup>-1</sup> a 0,15 mg L<sup>-1</sup>.

No experimento de graduação aqui proposto, a integração de aspectos técnicos e regulatórios usados no tratamento de água e efluentes em geral é uma contribuição adicional para a formação abrangente do graduando em Química, Ciências Ambientais e áreas correlatas.

## 2. Parte Experimental

### 2.1. Materiais e métodos

Neste trabalho, foi feito o tratamento eletroquímico de uma amostra artificial de esgoto doméstico que simulou as características de coloração e concentração de fosfato observadas no efluente coletado do decantador primário (EDP) de uma estação de tratamento de esgoto urbano de um bairro residencial de Brasília. O uso de amostras que simulam o esgoto teve por finalidade evitar a insalubridade relacionada ao manuseio de amostras de esgoto em laboratórios de ensino.

Visando estabelecer os parâmetros metodológicos, incluindo a seleção do material de construção dos eletrodos, inicialmente foram empregadas soluções

aquosas de di-hidrogenofosfato de potássio (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) como amostra artificial de esgoto para a eletrólise. Esse composto é frequentemente utilizado para simular a presença de fosfato em efluentes artificiais em estudos de otimização da EC para remoção de fósforo.<sup>20,33</sup>

Todos os reagentes utilizados tinham grau de pureza analítico. Previamente ao uso, di-hidrogenofosfato de potássio (marca CAAL) foi seco em estufa a 110 °C por 3 horas e armazenado em dessecador. As soluções de reagentes empregadas na determinação de fósforo na forma de fosfato livre nas amostras e para a construção da curva padrão analítica foram preparadas usando-se água destilada. As soluções de simulação de efluentes, preparadas com KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> ou refrigerante de cola e submetidas ao processo de eletrocoagulação para redução do teor de fosfato, foram preparadas com água da torneira, que permitiu uma condução de corrente comparável à registrada na eletrólise da amostra de esgoto, na concentração de fósforo de 10 mg L<sup>-1</sup>. Essa concentração de fósforo corresponde ao valor médio aproximado encontrado nos afluentes das estações de tratamento de esgoto de Brasília e entorno.<sup>34</sup>

A amostra de efluente do decantador primário da estação de tratamento de esgotos da Asa Norte (ETE-Norte) fornecida pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) foi coletada às 10 horas do dia 28 de dezembro de 2010 e eletrolisada no mesmo dia. Nos processos eletrolíticos utilizou-se uma fonte de corrente contínua da marca ICEL – Manaus, modelo PS 4100, com saída de 0-30V / 0-3A. A análise foi feita em espectrofotômetro Genesys 10 UV, efetuando-se a leitura das amostras a 690 nm em temperatura ambiente, entre 20 e 30 °C.

A análise de fosfato nas amostras foi efetuada empregando-se o método do cloreto estânico (SnCl<sub>2</sub>) descrito pela *American Public Health Association*,<sup>35</sup> seguindo-se um procedimento similar ao usado para determinação de fósforo na forma de ortofosfato em efluentes pela

CAESB. A metodologia é fundamentada na análise espectrofotométrica da espécie intensamente azul (azul de molibdênio) formada pela redução do ácido fosfomolibdico ( $H_3PMo_{12}O_{40}$  - produto da reação do íon fosfato com o íon molibdato em solução ácida) com cloreto estanoso. O teor de fósforo nas amostras foi calculado com referência à curva padrão analítica construída conforme brevemente descrito a seguir.

## 2.2. Preparo de soluções

*Solução 0,020 mol/L de molibdato de amônio ( $(NH_3)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ )*

A solução foi preparada dissolvendo-se 6,255 g de molibdato de amônio tetra-hidratado em 40 mL de água destilada. À solução de molibdato, adicionou-se lentamente solução já resfriada de 70 mL de ácido sulfúrico concentrado em 100 mL de água destilada. Transferiu-se a mistura para um balão volumétrico de 250 mL e completou-se o volume. A solução foi conservada em geladeira.

*Solução de cloreto estanoso ( $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ )*

A solução foi preparada dissolvendo-se 2,535 g de cloreto estanoso di-hidratado em 50 mL de glicerol com aquecimento em banho-maria e agitação. A solução obtida é estável e não requer cuidados de armazenamento.

*Solução estoque de fósforo ( $500 \text{ mg L}^{-1}$ )*

A solução estoque de fósforo foi preparada com 1,0965 g de di-hidrogenofosfato de potássio ( $KH_2PO_4$ ) seco e água destilada em balão volumétrico de 500 mL. A solução foi conservada em geladeira.

*Solução intermediária de fósforo ( $5,0 \text{ mg L}^{-1}$ )*

A solução foi preparada por diluição 1:100 da solução estoque de fósforo, pipetando-se 5 mL da solução estoque de fósforo descrita acima, transferindo-se para um balão volumétrico de 500 mL e completando-se o volume com água destilada. A solução intermediária de fósforo foi conservada em geladeira.

## 2.3. Curva padrão analítica

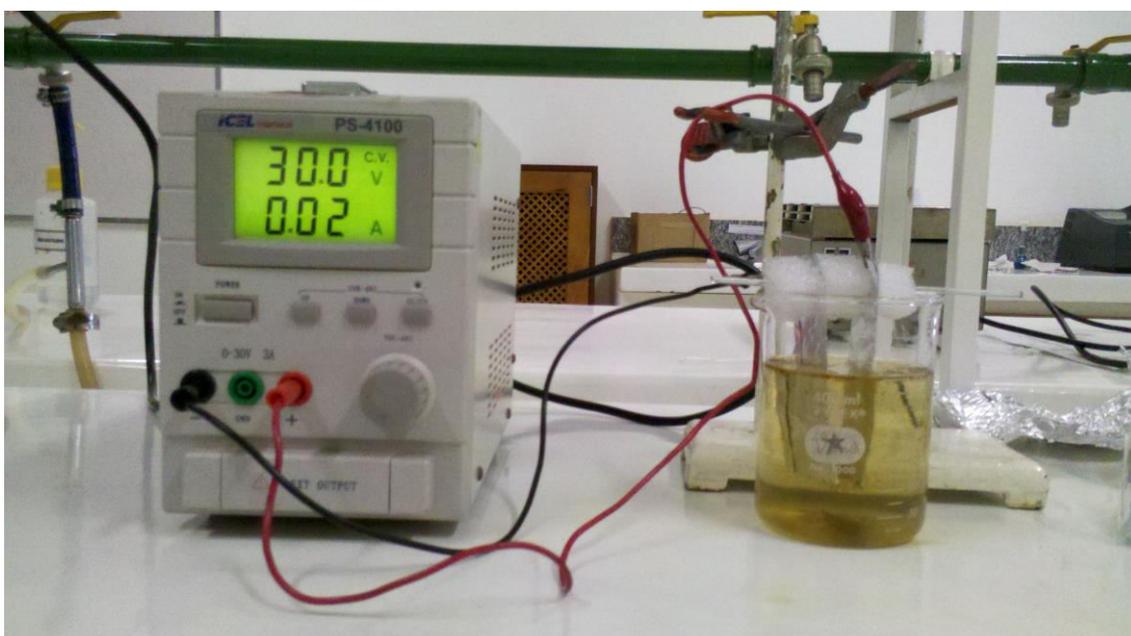
De acordo com o procedimento para determinação de fósforo na forma de ortofosfato em efluentes pela CAESB, foi construída uma curva padrão relacionando concentrações conhecidas de soluções de fósforo entre 0,0 a 2,0  $\text{mg L}^{-1}$  e os respectivos valores das absorvâncias medidas em 690 nm. Para a construção da curva padrão, transferiram-se doze alíquotas de 0 a 20,0 mL (0,0 mL; 0,5 mL; 1,0 mL; 2,0 mL; 4,0 mL; 6,0 mL; 8,0 mL; 10,0 mL; 12,0 mL; 14,0 mL; 18,0 mL; 20,0 mL) da solução intermediária de fósforo ( $5,0 \text{ mg L}^{-1}$ ) para balões volumétricos de 50 mL. Em cada balão contendo a alíquota adicionaram-se 4 mL da solução de molibdato de amônio e, em seguida, 10 gotas da solução de cloreto estanoso. Após completar rapidamente o volume à marca de aferição e homogeneizar a solução, esperou-se de 10 a 12 minutos para o desenvolvimento da cor antes de fazer a leitura da amostra (o tempo de pausa, em temperatura ambiente, foi mantido uniforme para todas as amostras). As soluções preparadas dessa forma tinham respectivamente as seguintes concentrações de fósforo: 0,0  $\text{mg L}^{-1}$ ; 0,05  $\text{mg L}^{-1}$ ; 0,1  $\text{mg L}^{-1}$ ; 0,2  $\text{mg L}^{-1}$ ; 0,4  $\text{mg L}^{-1}$ ; 0,6  $\text{mg L}^{-1}$ ; 0,8  $\text{mg L}^{-1}$ ; 1,0  $\text{mg L}^{-1}$ ; 1,2  $\text{mg L}^{-1}$ ; 1,4  $\text{mg L}^{-1}$ ; 1,8  $\text{mg L}^{-1}$ ; 2,0  $\text{mg L}^{-1}$ . Empregando-se a equação da reta obtida para a curva padrão, construída usando-se o resultado médio de três experimentos independentes para cada ponto da curva ( $R^2 = 0,9952$ ), foi possível

determinar a concentração de fósforo na solução eletrolítica durante a EC, medindo-se os valores de absorvâncias das alíquotas recolhidas ao longo do processo. O instrutor poderá optar pela construção da curva padrão previamente à aula em que será realizado o experimento de eletrocoagulação, com ou sem a participação dos alunos.

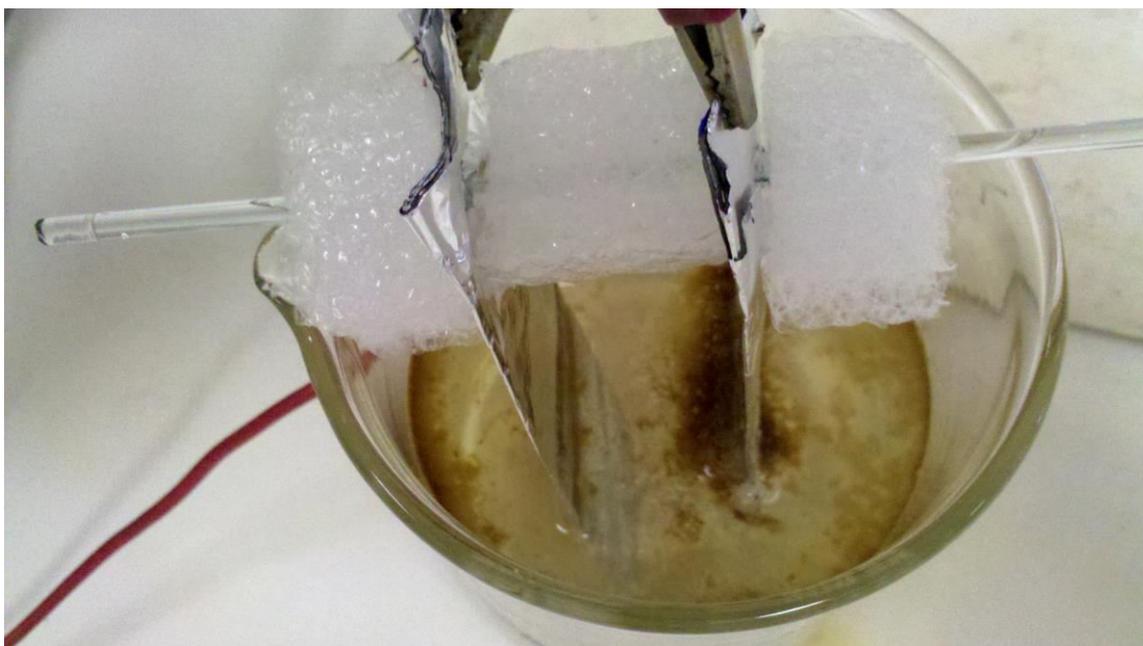
#### 2.4. Construção da célula eletrolítica

A célula eletrolítica consistiu de bquer de 400 mL, onde dois eletrodos metálicos perfurados a cerca de 1 cm da borda superior foram transpassados e mantidos suspensos

por bastão fino de vidro, conforme mostrado na Figura 1. Os eletrodos, separados em cerca de 3 cm um do outro por pequenos blocos de isopor ou esponja sintética e mantidos sem contato com as paredes do recipiente, foram conectados à fonte de corrente contínua por intermédio de conectores do tipo jacaré (Figura 2). Tipicamente, nos primeiros dez minutos da eletrólise foram obtidas leituras de corrente de 0,05 A, estabilizando-se entre 0,03 ou 0,02 A até o final do processo. Esses valores de corrente são eficientes na remoção de fosfato por eletrocoagulação, conforme descrito na literatura em condições semelhantes.<sup>33</sup>



**Figura 1.** Montagem experimental da eletrocoagulação de solução artificial de esgoto doméstico preparada a partir da diluição de bebida refrigerante do tipo cola



**Figura 2.** Detalhe do posicionamento dos eletrodos de papel alumínio suspensos por um bastão de vidro e separados por blocos de espuma sintética. Notar o estágio final da eletrocoagulação onde se observa o sólido flocoso de cor castanha devido à adsorção do corante da bebida refrigerante empregada na superfície da fase líquida

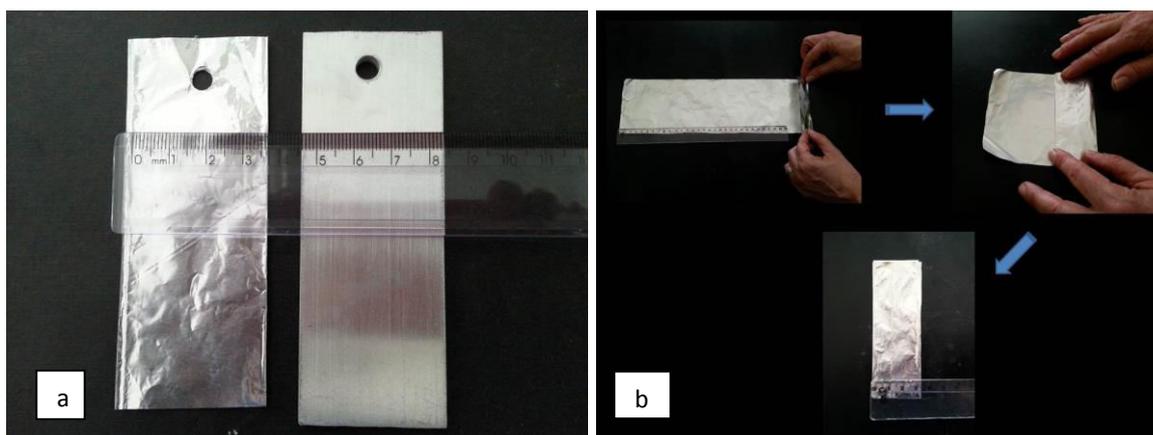
### Âodos

Usou-se sempre alumínio metálico como material de constituição do ânodo (eletrodo de sacrifício). O eletrodo é consumido no processo, já que o metal sofre oxidação ao estado +3 nos processos de eletrocoagulação. Placas de alumínio (10 cm de comprimento x 4 cm de largura x 0,3 cm de espessura) e de papel alumínio em dobradura retangular (10 cm x 3 cm) funcionaram como ânodos (Figura 3) em dois conjuntos independentes de experimentos de eletrocoagulação de solução de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ( $0,000322 \text{ mol L}^{-1}$ ) com teor de  $10 \text{ mg L}^{-1}$  de fósforo, usada na padronização do procedimento, sem que fossem observadas diferenças nos aspectos quantitativos do processo.

Antes do uso, as placas maciças de alumínio foram limpas com algodão embebido em acetona e, em seguida, lavadas com solução aquosa de ácido clorídrico a  $6 \text{ mol/L}$  (solução de HCl concentrado em água

na proporção de 1:1) para remoção da camada de óxido - tal procedimento deve ser efetuado apenas com as placas maciças de alumínio. Na eletrólise dos efluentes de esgoto foram usadas placas de alumínio no ânodo. Na eletrólise da solução de refrigerante tipo cola (solução de efluente artificial) foram usados exclusivamente ânodos constituídos de papel alumínio.

Os eletrodos de papel alumínio foram construídos a partir de uma faixa de papel alumínio de 10 cm de largura por cerca de 45 cm de comprimento dobrada de forma contínua, um lado sobre o outro, sempre no mesmo sentido, de maneira a formar uma "placa" de 3 cm x 10 cm, mantendo-se a superfície brilhante do papel alumínio voltada para o exterior. Dobradura em sanfona não resultou em um bom eletrodo, pois se observou a tendência da placa abrir nas pontas. O emprego de papel alumínio teve como objetivo a simplificação da montagem e redução de custos do procedimento experimental (Figura 3).



**Figura 3.** a) Ânodos: à esquerda, construído com papel alumínio, e à direita, placa de alumínio; b) Etapas da construção do ânodo de papel alumínio

### Cátodos

No cátodo ocorre a redução de água e observa-se a formação de bolhas de hidrogênio. Placas de aço (10 cm de comprimento x 4 cm de largura x 0,1 cm de espessura) e de papel alumínio em dobradura retangular (10 cm x 3 cm) funcionaram como cátodos em dois conjuntos independentes de experimentos de eletrocoagulação de solução de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  a  $10 \text{ mg L}^{-1}$ , usada na padronização do processo, sem que houvesse diferenças significativas nos resultados quantitativos dos experimentos. Na eletrólise do efluente de esgoto foram usadas placas de aço nas dimensões acima como cátodo. Nos experimentos de eletrocoagulação de solução de refrigerante tipo cola foram empregados exclusivamente cátodos de papel alumínio em dobradura, construídos conforme descrito no tópico anterior sobre os ânodos.

### 2.5. Coleta das alíquotas da solução eletrolítica para quantificação do teor de fósforo e determinação do pH

O teor de fósforo inicial de cada solução eletrolítica (solução de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  – item 2.6; solução de EDP – item 2.7; solução de refrigerante de cola – item 2.8) foi verificado antes de proceder a eletrocoagulação,

coletando-se uma alíquota de 5 mL e transferindo-se esse volume para um balão volumétrico de 50 mL. Ao balão contendo a alíquota foram adicionados 4 mL da solução de molibdato de amônio e, em seguida, 10 gotas da solução de cloreto estânico. Após completar rapidamente o volume à marca de aferição e homogeneizar a solução, esperou-se de 10 a 12 minutos para o desenvolvimento da cor antes de fazer a leitura da amostra (o tempo de pausa, em temperatura ambiente, foi mantido uniforme para todas as amostras). Esse mesmo procedimento foi empregado para a quantificação do teor de fósforo coletando-se uma alíquota de 5 mL da solução sob eletrólise aos 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 75 minutos de eletrocoagulação.

A fim de reduzir o erro na amostragem e evitar etapas experimentais adicionais de filtração ou centrifugação da alíquota, é aconselhável a introdução da ponta da pipeta bem abaixo da camada superficial onde os flocos se acumulam, procurando-se coletar a alíquota sempre no mesmo ponto e a uma mesma profundidade na célula, preferencialmente fora da região entre os eletrodos. As medidas de pH foram efetuadas mediante o uso de fita indicadora universal. Não houve necessidade de ajuste do pH durante os experimentos.

## 2.6. Eletrocoagulação de solução de $\text{KH}_2\text{PO}_4$

Na célula eletrolítica descrita no item 2.4, foram colocados 320 mL de uma solução com teor de  $10 \text{ mg L}^{-1}$  em fósforo preparada com  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  seco e água da torneira. Em seguida, aplicou-se uma diferença de potencial na amostra, para se obter uma leitura de corrente de cerca de 0,05 A. Recomenda-se verter a solução eletrolítica no béquer com os eletrodos já posicionados, para maior controle do arranjo experimental. Usando-se o método do cloreto estanoso, cujo procedimento está descrito no item 2.5, determinou-se o teor de fósforo na solução eletrolítica ao início da eletrólise ( $T_0$ ). Alíquotas de 5 mL da solução submetida à eletrólise foram pipetadas aos 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 75 minutos de reação e o teor de fósforo foi determinado.

Para os experimentos feitos com solução de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  foi investigado o efeito do material de construção dos eletrodos. No primeiro conjunto de experimentos, foram empregadas placas de aço no cátodo e placas de alumínio no ânodo. Em seguida, foram usadas placas confeccionadas com papel alumínio em dobradura como eletrodos. Os experimentos de seleção do material de construção dos eletrodos foram feitos em triplicata ( $n = 3$ ). Um registro de pH foi feito no início e ao final da eletrólise.

## 2.7. Eletrocoagulação de EDP da ETE-Norte-CAESB

A amostra de efluente de esgoto doméstico urbano foi submetida ao processo de eletrocoagulação, empregando-se placa de alumínio no ânodo e placa de aço no cátodo na célula descrita no item 2.4. Aplicou-se corrente inicial de 0,05 A em cerca de 320 mL de amostra, determinando-se a concentração de fósforo em alíquotas de 5 mL coletadas aos 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 75 minutos de reação.

## 2.8. Eletrocoagulação de solução de refrigerante de cola

Como simulação de efluente doméstico rico em fosfato, foi preparada uma solução de refrigerante de cola (embalagem PET de 600 mL, tradicional). Após agitação por cerca de 10 minutos com bastão de vidro para retirada do excesso de gás carbônico, 30 mL de refrigerante à temperatura ambiente foram pipetados e diluídos a 500 mL com água da torneira. Determinou-se a concentração de fósforo na solução diluída de refrigerante previamente à eletrólise. Em seguida, 350 mL da solução diluída de refrigerante de cola foram transferidos para a célula eletrolítica e aplicou-se uma corrente inicial de 0,05 A, determinando-se a concentração de fósforo em alíquotas de 5 mL coletadas aos 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 75 minutos de reação. Os eletrodos do processo foram feitos de papel alumínio em dobradura, conforme descrito no item 2.4.

O experimento foi feito em triplicata ( $n = 3$ ) a partir de três diferentes garrafas PET de 600 mL da mesma marca de refrigerante adquiridas em ocasiões e estabelecimentos distintos. A depender do tipo de bebida refrigerante contendo fosfato e de sua embalagem (lata ou embalagem PET), o instrutor deverá adequar a quantidade de refrigerante usada na preparação da solução a ser eletrolisada, de modo que a concentração inicial de fósforo seja em torno de  $10 \text{ mg L}^{-1}$ .

Para o cálculo da concentração de fosfato, abateu-se dos valores de absorbância medidos ao longo da análise a soma dos valores de absorbância do branco e da solução eletrolítica antes do início da eletrólise devido à sua tênue coloração amarelada resultante dos corantes da bebida refrigerante empregada (absorbância de fundo). A absorbância de fundo foi determinada a partir de uma solução diluída a 50 mL de uma alíquota de 5 mL da solução a ser eletrolisada. Os valores das absorbâncias de fundo encontrados para

alíquotas da solução eletrolítica antes do início da EC foram extremamente baixos no comprimento de onda empregado (690 nm), tipicamente 0,001. Nos cálculos da determinação da concentração de fósforo, empregou-se o valor de absorvância de fundo medido exclusivamente antes do início da EC em cada experimento. A determinação da absorvância de fundo para cada alíquota retirada ao longo da EC ocasionaria um decréscimo substancial do volume da solução eletrolítica, comprometendo a eficiência da eletrólise, além de aumentar o número de etapas experimentais.

### 3. Resultados e Discussão

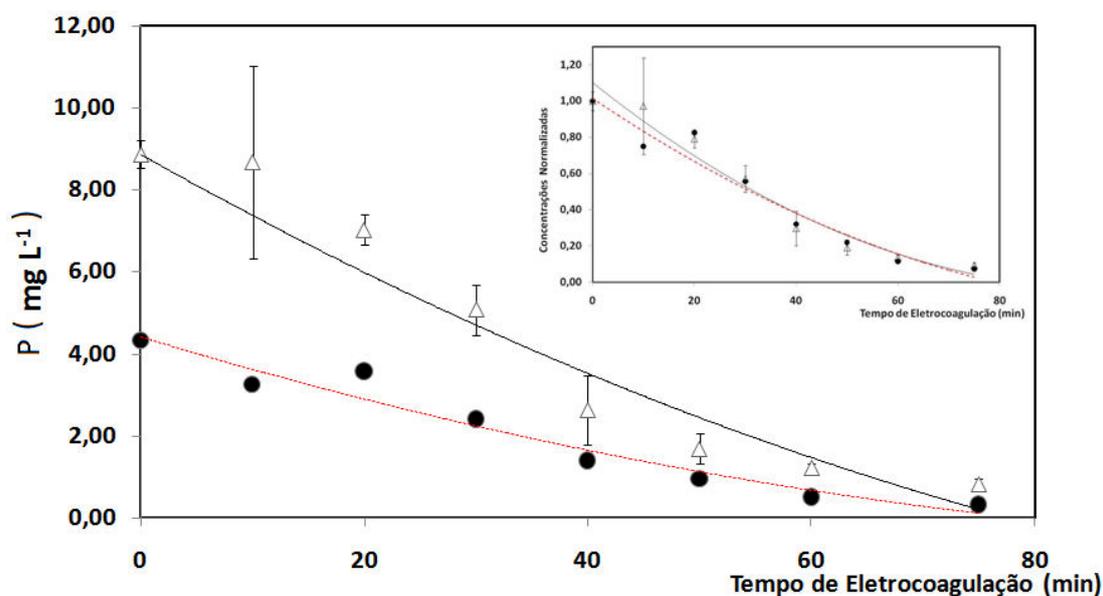
#### 3.1. Desenvolvimento da metodologia e eletrocoagulação de EDP da ETE-Norte-CAESB

O estabelecimento das condições de um processo eletrolítico adequado para graduação foi feito mediante o uso de soluções de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  com teor de  $10 \text{ mg L}^{-1}$  em fósforo, preparadas com água da torneira, simulando um efluente simplificado. Constatou-se redução no teor de fósforo de 91% na eletrocoagulação da solução de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  após 75 min de eletrólise com ânodo de placa maciça de alumínio e cátodo de placa de aço. Com o intuito de avaliar o comportamento da eletrocoagulação, e a consequente redução da concentração de fósforo, em uma amostra real de esgoto, complexa, rica em matéria orgânica e particulados, foi feita a eletrólise de uma amostra do EDP da estação de tratamento de

esgotos da Asa Norte, bairro residencial de Brasília, fornecida pela CAESB, nas mesmas condições. A amostra apresentava aparência turva e tonalidade acinzentada. O teor inicial de fósforo encontrado na amostra do EDP foi igual a  $4,29 \text{ mg L}^{-1}$ . Após 75 min de eletrólise o teor de fósforo medido atingiu  $0,32 \text{ mg L}^{-1}$ , correspondendo a uma redução de cerca de 93%.

Os resultados da eletrocoagulação dessas soluções, usando-se ânodos construídos de placas de alumínio e cátodos de aço, foram comparados na Figura 4. Apesar das diferenças na complexidade das matrizes e nos teores iniciais de fósforo nas duas soluções, o decréscimo nas concentrações de fósforo no efluente simplificado e na amostra de EDP evoluiu de modo semelhante, conforme evidencia a análise dos valores de concentração de fósforo normalizados aos valores iniciais. Do ponto de vista qualitativo, o processo de eletrocoagulação contribuiu para uma acentuada diminuição da turbidez da amostra real de esgoto, percebendo-se um sobrenadante flocoso pardo oriundo da eletrocoagulação.

Embora o experimento tenha mostrado com muita clareza a eficiência do procedimento na remediação de efluentes, o uso de amostras reais de esgoto em laboratórios de graduação traz vários inconvenientes, o mais importante deles é o risco biológico. Por esse motivo, buscou-se preparar uma simulação de esgoto adequada para evidenciar a eficiência da eletrocoagulação na remoção de fosfato e, se possível, outros de seus múltiplos aspectos, como redução da turbidez, clareamento da solução, desgaste do eletrodo.

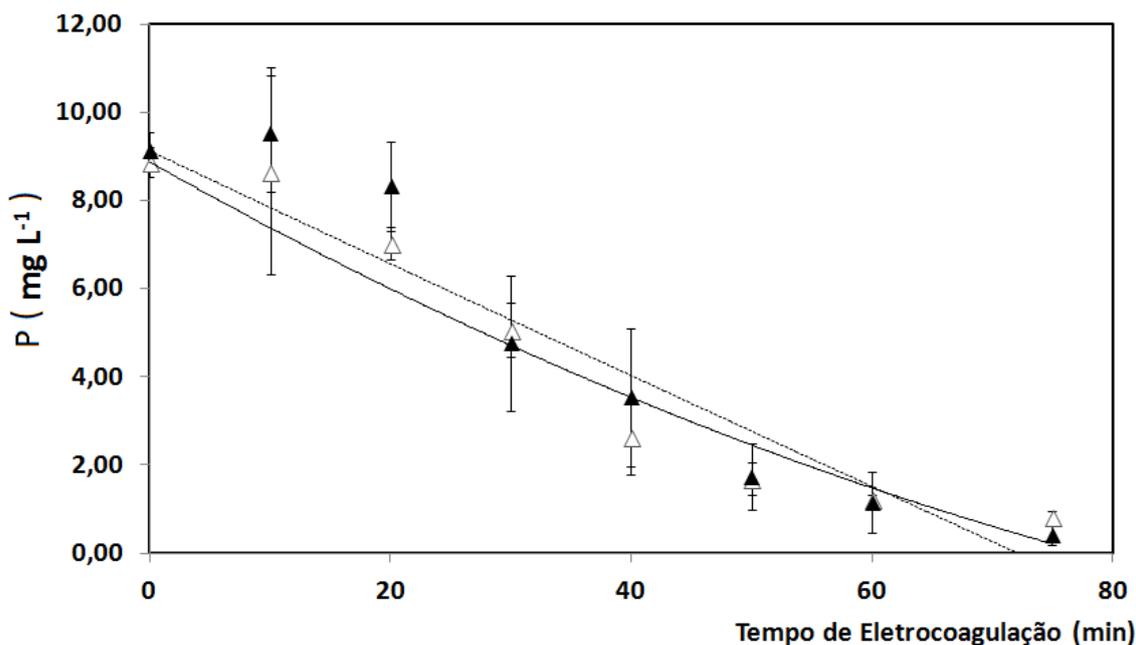


**Figura 4.** Decaimento da Concentração de fósforo em  $\text{mg L}^{-1}$  contra Tempo de Eletrocoagulação (min) na EC de soluções de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ( $\Delta$ ,  $n = 3 \pm$  desvio padrão) e de uma amostra de EDP ( $\bullet$ ), empregando-se eletrodos constituídos de cátodo de placa de aço e ânodo de placa de alumínio. Na figura menor inserida, os mesmos resultados normalizados nas soluções de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ( $\Delta$ ) e do EDP ( $\bullet$ )

Visando simplificar a montagem do experimento, foi feito um estudo da substituição das placas de alumínio e aço por eletrodos confeccionados com papel alumínio, de fácil aquisição e construção, além do menor custo. Os resultados dos experimentos de eletrocoagulação realizados com soluções de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , com teor de  $10 \text{ mg L}^{-1}$  em fósforo, usando-se eletrodos de placas metálicas, alumínio no ânodo e aço no cátodo, e papel alumínio dobrado foram

semelhantes, observando-se um decréscimo médio no teor de fosfato de 91% e 96%, respectivamente (Figura 5). O experimento serviu como validação da escolha de eletrodos construídos por dobradura do papel alumínio.

Nesses experimentos de estabelecimento das condições de EC registrou-se o pH da solução eletrolítica em torno de 6 antes do início do procedimento, alcançando pH 7 ao final da eletrólise.



**Figura 5.** Decaimento da Concentração de fósforo em  $\text{mg L}^{-1}$  contra Tempo de Eletrocoagulação (min) de solução de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  empregando-se eletrodos constituídos de cátodo de placa de aço e ânodo de placa de alumínio ( $\triangle$ ,  $n = 3 \pm$  desvio padrão) e de solução de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  empregando-se eletrodos construídos com papel alumínio ( $\blacktriangle$ ,  $n = 3 \pm$  desvio padrão)

### 3.2. Eletrocoagulação de solução de refrigerante de cola

A escolha de simular uma amostra de efluente de esgoto urbano empregando-se uma solução de refrigerante de cola deveu-se ao fato de que, além de rica em fosfato, essa matriz apresenta coloração semelhante à amostra do EDP, além de substâncias orgânicas, tais como açúcares, aromatizantes, corantes, cafeína, permitindo observar a mesma riqueza de fenômenos observados na eletrólise da amostra do efluente de esgoto doméstico estudado. A mais notável diferença entre a amostra do EDP e a amostra de esgoto artificial se relaciona à turbidez inicial, inexistente na amostra simulada. As eletrólises das soluções de refrigerante de cola foram efetuadas empregando-se eletrodos construídos com papel alumínio.

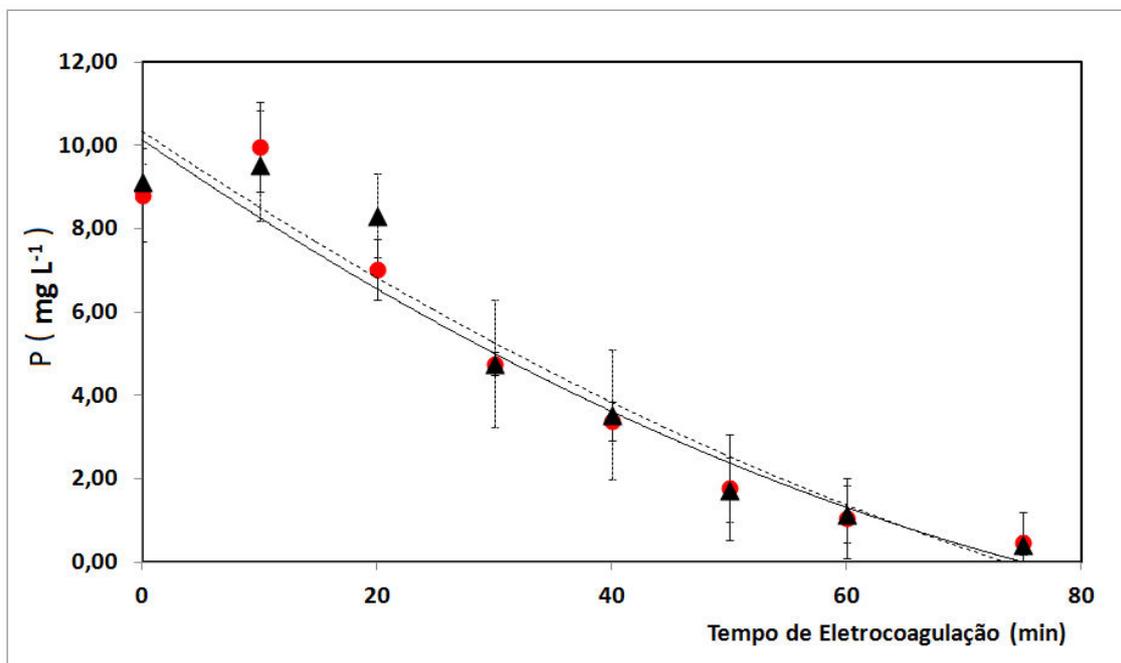
Durante a eletrocoagulação, as soluções diluídas de bebidas refrigerantes de cola se comportaram como a amostra do efluente sintético preparado com  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  eletrolisada

com eletrodos de papel alumínio no tocante à redução do teor de fósforo, observando-se uma queda de cerca de 95% (Figura 6). Mais além, alguns aspectos macroscópicos da eletrocoagulação da solução de refrigerante foram semelhantes àsquelas observadas durante a eletrólise da amostra de esgoto: observou-se o clareamento da coloração e a formação de um sólido flocoso de tom castanho, menos denso que a solução, oriundo da eletrocoagulação de fosfatos de alumínio insolúveis e material corante presente na bebida refrigerante.

Os eletrodos construídos com papel alumínio permitiram evidenciar o consumo do metal no ânodo (eletrodo de sacrifício), bastando ao final do processo desdobrar o papel, após lavagem em água corrente, e observar as inúmeras perfurações milimétricas que advêm do processo. O uso de fonte de corrente contínua favorece a percepção das reações que ocorrem em cada um dos eletrodos, contribuindo de forma muito didática para a compreensão do processo eletrolítico.

Na EC da solução de refrigerante cola registrou-se o pH inicial em torno de 5-6,

alcançando pH 7 ao final da eletrólise.



**Figura 6.** Decaimento da Concentração de fósforo em  $\text{mg L}^{-1}$  contra Tempo de Eletrocoagulação (min) de solução de refrigerante de cola (●,  $n = 3 \pm$  desvio padrão) e de solução de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  empregando-se eletrodos construídos com papel alumínio (▲,  $n = 3 \pm$  desvio padrão)

Em todos os processos de eletrólise realizados foi observado uma discreta elevação do pH, inicialmente na faixa de 5-6 e atingindo valores finais entre 7-8. Tal elevação pode ser racionalizada levando-se em consideração que a redução da água no cátodo gera íons hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) que não são em sua totalidade consumidos para formar espécies insolúveis de alumínio no meio.<sup>28</sup> Considerando que em valores de pH próximos à neutralidade a dissolução química do metal dos eletrodos não é um processo que merece ser considerado,<sup>28</sup> a oxidação do alumínio decorre exclusivamente do processo eletroquímico. Os cátions alumínio e íons hidróxido gerados nas reações de eletrodos (equações 1 e 2) reagem formando várias espécies monoméricas, como  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^+$ , além de espécies poliméricas  $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ ,  $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$ ,  $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$ ,  $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ ,  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ , que

se convertem em precipitado amorfo de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  com uma grande área superficial para adsorção de contaminantes.<sup>36</sup>

De acordo com a literatura,<sup>33</sup> com eletrodos de alumínio, a maior eficiência de remoção de fosfato é atingida em pH 7. Estudos sugerem que na eletrocoagulação de efluentes aquosos sintéticos contendo fosfato com valores de pH entre 6 e 8, as espécies predominantemente formadas são fosfatos de alumínio insolúveis e cátions poliméricos de alumínio, sobre cuja superfície contaminantes aniônicos, como o fosfato, também podem ser removidos por adsorção.<sup>37,38</sup>

Nos experimentos deste trabalho, ao final dos 75 min de eletrólise, a concentração de fósforo não atingiu a concentração máxima de fósforo total permitida ( $0,15 \text{ mg L}^{-1}$ ) para lançamento direto ou indireto em corpos de

água doce pelas resoluções conjuntas do CONAMA nº 357 de 17/3/2005 e nº 430 de 13/5/2011, apesar da expressiva redução do teor de fósforo alcançada, superior a 90% em todos os procedimentos e amostras tratadas, com um arranjo experimental simples.

Estudos na literatura com montagens experimentais otimizadas, empregando um número maior de eletrodos na célula, liga de alumínio como material do ânodo e adição de eletrólitos, mostraram que a remoção de fosfato pode ser elevada até 99-100%.<sup>33,39</sup> Um dos parâmetros frequentemente estudados na literatura é a corrente aplicada, geralmente expressa na forma de densidade de corrente, o quociente entre a quantidade de corrente (A ou mA) e a área superficial geométrica do eletrodo (cm<sup>2</sup> ou dm<sup>2</sup>).

Neste trabalho, a densidade de corrente inicial obtida foi 0,083 A dm<sup>-2</sup>, estabilizando-se em 0,042 A dm<sup>-2</sup> nos primeiros dez minutos de EC. Uma modificação possível para o aumento da eficiência na remoção de fosfato no experimento proposto seria a elevação da densidade de corrente para 0,1 A dm<sup>-2</sup>,<sup>33,39</sup> mediante aumento da voltagem fornecida pela fonte ou adição de eletrólito de suporte à solução a ser tratada. Nesse caso, todavia, recomenda-se que o procedimento seja realizado empregando-se placas de alumínio ao invés do papel alumínio, para evitar o desgaste acelerado do eletrodo de sacrifício e desprendimento descontrolado de fragmentos do papel alumínio no meio sob corrente. A eficiência da remoção de fosfato também aumenta com o tempo de eletrocoagulação, porém há um concomitante aumento no consumo de energia,<sup>39</sup> o que se constitui em um fator de exclusão do parâmetro tempo quando se considera a otimização da eletrocoagulação para fins tecnológicos.

#### 4. Conclusões

Nesta prática foram explorados conteúdos de eletroquímica e análise espectrofotométrica, aplicados a questões

ambientais. O experimento apresenta aos estudantes uma alternativa ao processo tradicional de floculação com sais de ferro (III) e alumínio para a precipitação de fosfatos, em uso em estações de tratamento de esgoto. É um procedimento de baixo custo, acessível e de fácil montagem em laboratórios de ensino de graduação em Química, podendo ser executado em uma aula experimental de quatro horas de duração ou menos, mediante simplificações.

O uso de soluções aquosas de refrigerante de cola é uma opção válida e original para a simulação do comportamento de um efluente doméstico rico em fosfato durante um procedimento de eletrocoagulação. O uso de eletrodos de papel alumínio dobrado também se mostrou uma opção eficiente e econômica, que permitiu observar a olho nu o desgaste do eletrodo de sacrifício ao final da eletrocoagulação.

Para enriquecer as discussões ao longo da execução experimental ou na elaboração dos relatórios, sugerimos algumas questões relacionados ao tema que o professor pode abordar com seus alunos: (a) as principais fontes de fósforo no esgoto doméstico; (b) as providências cabíveis para diminuir o aporte de fósforo em esgotos domésticos; (c) outros tratamentos para a remoção de fósforo em efluentes aquosos; (d) o tratamento utilizado para remoção de fósforo na estação de tratamento de esgoto da sua cidade; (e) o teor de fósforo no efluente final da estação de tratamento de esgoto da sua cidade; (f) a correta destinação dos flocos gerados durante o processo de EC para remoção de fósforo; (g) fontes de fósforo na natureza e dimensão atual das reservas; (h) consumo atual de fósforo e projeção de extinção das reservas naturais; (i) custo da obtenção de fósforo a partir das reservas naturais; (j) avaliação técnica e econômica da reciclagem de fósforo; (k) propostas para reciclagem de fósforo removido na EC.

Esse experimento é um exemplo de integração de aspectos técnicos e regulatórios usados no tratamento de água e efluentes em geral, suscitando discussões multidisciplinares que certamente

enriquecerão a formação do graduando na área de Química e ciências correlatas.

## Agradecimentos

Agradecemos o apoio técnico de R. S. Maia e D. C. B. Santos e à CAESB pela assistência técnica e fornecimento de amostras.

## Referências Bibliográficas

- <sup>1</sup> Kobya, M.; Bayramoglu, M.; Eyvaz, M. Techno-economical evaluation of electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections. *Journal of Hazardous Materials* **2007**, *148*, 311. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>2</sup> Garrigues, S.; Armenta, S.; De la Guardia, M. Green strategies for decontamination of analytical wastes. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* **2010**, *29*, 592. [[CrossRef](#)]
- <sup>3</sup> Mollah, M. Y. A.; Morkovsky, P.; Gomes, J. A. G.; Kesmez, M.; Parga, J.; Cocke, D. L. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials* **2004**, *B114*, 199. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>4</sup> Ghernaout, D.; Naceur, M. W.; Ghernaout, B. A review of electrocoagulation as a promising coagulation process for improved organic and inorganic matters removal by electrophoresis and electroflotation. *Desalination and Water Treatment* **2011**, *28*, 287. [[CrossRef](#)]
- <sup>5</sup> Meneses, J. M.; Vasconcelos, R. F., Fernandes, T. F.; Araújo, G. T. Tratamento do efluente do biodiesel utilizando a eletrocoagulação/flotação: investigação dos parâmetros operacionais. *Química Nova* **2012**, *35*, 235. [[CrossRef](#)]
- <sup>6</sup> Crespilho, F. N.; Santana, C. G.; Rezende, M. O. O. Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. *Química Nova* **2004**, *27*, 387. [[CrossRef](#)]
- <sup>7</sup> Kobya, M.; Demirbas, E.; Dedeli, A.; Sensoy, M.T. Treatment of rinse water from zinc phosphate coating by batch and continuous electrocoagulation processes. *Journal of Hazardous Materials* **2010**, *173*, 326. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>8</sup> Katal, R.; Pahlavanzadeh, H. Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: Application to the treatment of paper mill wastewater. *Desalination* **2011**, *265*, 199. [[CrossRef](#)]
- <sup>9</sup> Ren, M.; Song, Y.; Xiao, S.; Zeng, P.; Jianfeng P., J. Treatment of berberine hydrochloride wastewater by using pulse electrocoagulation process with Fe electrode. *Chemical Engineering Journal* **2011**, *169*, 84. [[CrossRef](#)]
- <sup>10</sup> Farhadi, S.; Aminzadeh, B.; Torabian, A.; Khatibikamal, V.; Fard, M. A. Comparison of COD removal from pharmaceutical wastewater by electrocoagulation, photoelectrocoagulation, peroxi-electrocoagulation and peroxi-photoelectrocoagulation processes. *Journal of Hazardous Materials* **2012**, *219*, 35. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>11</sup> Cerqueira, A. A.; Souza, P. S. A.; Marques, M. R. C. Effects of direct and alternating current on the treatment of oily water in an electroflocculation process. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* **2014**, *31*, 693. [[CrossRef](#)]
- <sup>12</sup> Tchamango, S.; Nanseu-Njiki, C. P.; Ngameni, E.; Hadjiev, D.; Darchen, A. Treatment of dairy effluents by electrocoagulation using aluminium electrodes. *Science of the Total Environment* **2010**, *408*, 947. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>13</sup> Bazrafshan, E.; Mostafapour, F. K.; Farzadkia, M.; Ownagh, K. A.; Mahvi, A. H. Slaughterhouse Wastewater Treatment by Combined Chemical Coagulation and Electrocoagulation Process. *PLoS ONE* **2012**, *7*, e40108. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>14</sup> Chen, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology* **2004**, *38*, 11. [[CrossRef](#)]

- <sup>15</sup> Meunier, N.; Drogui, P.; Montané, C.; Hausler, R.; Mercier, G.; Blais, J. F. Comparison between electrocoagulation and chemical precipitation for metals removal from acidic soil leachate. *Journal of Hazardous Materials* **2006**, *B137*, 581. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>16</sup> Meunier, N.; Drogui, P.; Mercier, G.; Blais, J. F. Treatment of metal-loaded soil leachates by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology* **2009**, *67*, 110. [[CrossRef](#)]
- <sup>17</sup> Nanseu-Njiki, C. P.; Tchamango, S. R.; Ngom, P. C.; Darchen, A.; Ngameni, E. Mercury(II) removal from water by electrocoagulation using aluminium and iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials* **2009**, *168*, 1430. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>18</sup> Neal, C.; Jarvie, H. P.; Withers, P. J.A.; Whitton, B. A.; Neal, M. The strategic significance of wastewater sources to pollutant phosphorus levels in English rivers and to environmental management for rural, agricultural and urban catchments. *Science of the Total Environment* **2010**, *408*, 1485. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>19</sup> Emamjomeh, M. M.; Sivakumar, M. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. *Journal of Environmental Management* **2009**, *90*, 1663. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>20</sup> İrdemez, S.; Demircioğlu, N.; Yildiz, Y. S. The effects of pH on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with iron plate electrodes. *Journal of Hazardous Materials* **2006**, *B137*, 1231. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>21</sup> Murugananthan, M.; Raju, G. B.; Prabhakar, S. Removal of sulfide, sulfate and sulfite ions by electro coagulation. *Journal of Hazardous Materials* **2004**, *B109*, 37. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>22</sup> Yilmaz, A. E.; Boncukcuoğlu, R.; Kocakerim, M. M.; Keskinler, B. The investigation of parameters affecting boron removal by electrocoagulation method. *Journal of Hazardous Materials* **2005**, *125*, 160. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>23</sup> Yadav, A. K.; Singh, L.; Mohanty, A.; Satya, S.; Sreekrishnan, T. R. Removal of various pollutants from wastewater by electrocoagulation using iron and aluminium electrode. *Desalination and Water Treatment* **2012**, *46*, 352. [[CrossRef](#)]
- <sup>24</sup> Merzouk, B.; Gourich, B.; Sekki, A.; Madani, K.; Chibane, M. Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation-electroflotation technique: A case study. *Journal of Hazardous Materials* **2009**, *164*, 215. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>25</sup> Kiliç, M. G.; Hoşten, Ç. A comparative study of electrocoagulation and coagulation of aqueous suspensions of kaolinite powders. *Journal of Hazardous Materials* **2010**, *176*, 735. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>26</sup> Solak, M.; Kiliç, M.; Yazici, H.; Şencan, A. Removal of suspended solids and turbidity from marble processing wastewaters by electrocoagulation: Comparison of electrode materials and electrode connection systems. *Journal of Hazardous Materials* **2009**, *172*, 345. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>27</sup> Moreno, H. A.; Cocke, D.; Gomes, J. A.; Morkovsky, P.; Parga, J. Electrocoagulation Mechanism For Metal Removal. *ECS Transactions* **2007**, *2*, 51. [[CrossRef](#)]
- <sup>28</sup> Cañizares, P.; Carmona, M.; Lobato, J.; Martinez, F.; Rodrigo, M. A. Electrodeposition of aluminum electrodes in electrocoagulation processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research* **2005**, *44*, 4178. [[CrossRef](#)]
- <sup>29</sup> Harif, T.; Khai, M.; Adin, A. Electrocoagulation versus chemical coagulation: Coagulation/flocculation mechanisms and resulting floc characteristics. *Water Research* **2012**, *46*, 3177. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- <sup>30</sup> Rajeshwar, K.; Ibanez, J. G.; *Environmental Electrochemistry: Fundamentals and Applications in Pollution Sensors and Abatement*, Academic Press, San Diego, 1997. [[Link](#)]
- <sup>31</sup> Ibanez, J. G. Saneamento Ambiental por Métodos Eletroquímicos. I-Tratamento de Soluções Aquosas. *Química Nova na Escola* **2002**, *45*. [[Link](#)]
- <sup>32</sup> Neto, S. A.; Magri, T. C.; Silva, G. M.; Andrade, A. R. Tratamento de resíduos de corante por eletrofloculação: um experimento para cursos de graduação em

- química. *Química Nova* **2011**, *34*, 1468. [CrossRef]
- <sup>33</sup> Vasudevan, S.; Lakshmi, J.; Jayaraj, J.; Sozhan, G. Remediation of phosphate-contaminated water by electrocoagulation with aluminium, aluminium alloy and mild steel anodes. *Journal of Hazardous Materials* **2009**, *164*, 1480. [CrossRef] [PubMed]
- <sup>34</sup> Sítio da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. Relatório Anual da Administração 2011. Disponível em: <[http://www3.caesb.df.gov.br/Arquivos/Relatorio Anual de Administra%C3%A7ao 2011.pdf](http://www3.caesb.df.gov.br/Arquivos/Relatorio%20Anual%20de%20Administra%C3%A7%C3%A3o%202011.pdf)>. Acesso em: 27 agosto 2015
- <sup>35</sup> APHA, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, Washington, 1998, p. 87.
- <sup>36</sup> Bayramoglu, M.; Kobya, M.; Can, O. T.; Sozbir, M. Operating cost analysis of electrocoagulation textile dye wastewater. *Separation and Purification Technology* **2004**, *37*, 117. [CrossRef]
- <sup>37</sup> Pulkka, S.; Martikainen, M.; Bhatnagar, A.; Sillanpää, M. Electrochemical methods for the removal of anionic contaminants from water - A review. *Separation and Purification Technology*, **2014**, *132*, 252. [CrossRef]
- <sup>38</sup> Cañizares, P.; Martínez, F.; Jiménez, C.; Lobato, J.; Rodrigo, M. A. Comparison of the Aluminum Speciation in Chemical and Electrochemical Dosing Processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research* **2006**, *45*, 8749. [CrossRef]
- İrdemez, Ş.; Yıldız, Y. Ş.; Tosunoğlu, V. Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminum plate electrodes. *Separation and Purification Technology* **2006**, *52*, 394. [CrossRef]