



## II CONPESQ Congresso de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação

Os novos rumos da ciência pós-pandemia

12 a 16 de abril de 2021 Universidade Federal do Cariri - UFCA

### **Eletrooxidação de amarelo tartrazina (E-102) utilizando ânodos cerâmicos construídos com resíduos da indústria siderúrgica**

**Luiz Carlos do Carmo Arrais Junior<sup>1</sup>**

Centro de Ciências e Tecnologia  
Universidade Federal do Cariri  
[luizcarlosarrais@gmail.com](mailto:luizcarlosarrais@gmail.com)

**André Oliveira Santos<sup>2</sup>**

Centro de Ciências e Tecnologia  
Universidade Federal do Cariri  
[andrehosantos@gmail.com](mailto:andrehosantos@gmail.com)

**Vanessa Erika Abrantes Coutinho<sup>3</sup>**

Centro de Ciências e Tecnologia  
Universidade Federal do Cariri  
[vanessaerika.bio@gmail.com](mailto:vanessaerika.bio@gmail.com)

**Thiago Mielle Brito Ferreira Oliveira<sup>4</sup>**

Centro de Ciências e Tecnologia  
Universidade Federal do Cariri  
[thiago.mielle@ufca.edu.br](mailto:thiago.mielle@ufca.edu.br)

**RESUMO:** A escória de alto forno (EAF) é um resíduo sólido do setor siderúrgico, resultante do processo de produção do ferro gusa. Sua composição química-morfológica aponta para seu uso como substrato em cerâmicas condutoras devido à presença de diferentes óxidos metálicos e arranjo estrutural, que conferem elevada área superficial ao material eletrodico. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de EAF como matéria-prima na produção de ânodos cerâmicos, visando sua possível aplicação como superfície eletrodica para a eletrooxidação de azo-corantes, micropoluentes persistentes e de controle prioritário, decorrente de sua ação tóxica para diferentes organismos vivos. Para tanto, foram estudadas diferentes combinações desse material com carbono grafite (CGF), antes e após o processo de sinterização das combinações a 400°C. Os materiais resultantes foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia dispersiva de

1 Graduando em Engenharia de Materiais e Aluno de Iniciação Científica – Bolsista PIBIT/UFCA, no Programa Institucional de Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade Federal do Cariri.

2 Docente do Centro de Ciência e Tecnologia, Doutorando no Programa de Pós-Graduação Multicêntrico na área de Bioquímica e Biologia Molecular da Universidade Federal do Cariri e Colaborador do projeto.

3 Doutoranda no Programa de Pós-Graduação Multicêntrico na área de Bioquímica e Biologia Molecular da Universidade Federal do Cariri e Colaborador do projeto.

4 Docente/Pesquisador do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Cariri e Orientador do projeto.

raios-X, voltametria cíclica, voltametria linear e espectroscopia de impedância eletroquímica, dando indícios de melhor desempenho (maior resistência mecânica e melhor efeito electrocatalítico em relação à reação de evolução de oxigênio) para o ânodo obtido com EAF e CGF na proporção 50:50% (m/m), após o processo de sinterização. A eficiência do ânodo cerâmico para a eletrodegradação de azo-corantes foi analisada, usando amarelo de tartrazina como molécula modelo, mostrando resultados satisfatórios a um custo-benefício aceitável para a implementação do método em possíveis processos de tratamento em escala industrial.

**PALAVRAS-CHAVE:** Siderurgia; Escória de alto forno; Cerâmicas semicondutoras; Azo-corantes; Eletrodegradação.

**ABSTRACT:** Blast furnace slag (BFS) is a solid residue from the steel sector, originated during the pig iron production process. Its chemical-morphological composition points to its use as a substrate in conductive ceramics, due to the presence of different metallic oxides and structural arrangement that gives a high surface area to the electrodic material. The present work aimed to evaluate the potential of BFS as a raw material in the production of ceramic anodes, and its possible application as an electrode surface for the electrooxidation of azo dyes, that are persistent and priority control micropollutants, due to its toxic action for different living organisms. For this purpose, different models of this material with carbon graphite (CG) were studied, before and after the process of sintering the combinations at 400 °C. The materials were characterized by scanning electron microscopy, X-ray dispersive spectroscopy, cyclic voltammetry, linear voltammetry and electrochemical impedance spectroscopy, giving evidence of better performance (greater mechanical resistance and better electrocatalytic effect related to the evolution of oxygen evolution) for the anode obtained with BFS and CG in the ratio 50:50% (wt/wt), after the sintering process. The efficiency of the ceramic anode for the electrodegradation of azo-dyes was analyzed, using tartrazine yellow as a model molecule, showing satisfactory results at an acceptable cost-benefit for an implementation of the method in possible treatment processes on an industrial scale.

**Keywords:** Steel industry; Blast furnace slag; Semiconductor ceramics; Azo-dyes; Electrodegradation.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria do aço permanece no coração do desenvolvimento global com uma demanda crescente por seus produtos, sendo um fator crucial em diversos setores da economia mundial. Em 2019, a produção mundial de aço bruto atingiu aproximadamente 1,9 bilhões de toneladas, com crescimento de 3,4% em relação ao ano anterior, com maior parte da produção concentrada na Ásia (Worldsteel Association, 2019). O Brasil produziu o equivalente a 1,7% da produção mundial, o equivalente a 32,6 milhões de toneladas de aço, mantendo-se na 9ª colocação do ranking mundial de produtores de aço e em 1º no ranking da América Latina (Aço Brasil, 2020).

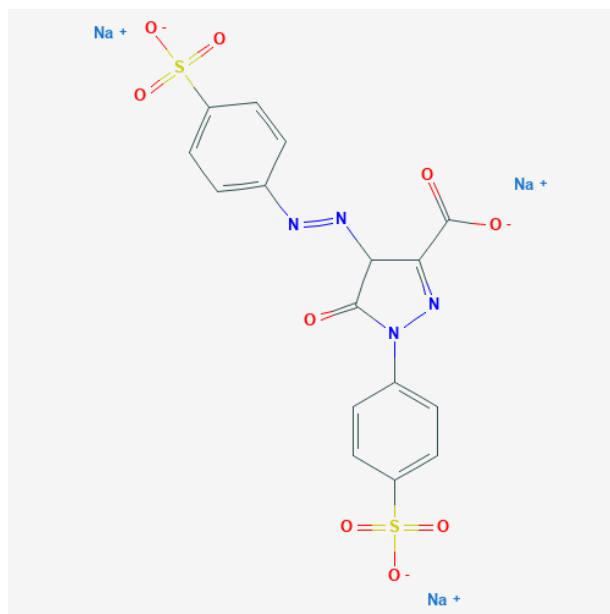
A produção de metais é feita principalmente por processos de mineração, flotação, hidrometalurgia, pirometalurgia e eletrometalurgia. Dentre esses processos, a pirometalurgia se destaca por ser um dos processos mais utilizados mundialmente para produção de metais.

(POTYSZ, 2018). O setor siderúrgico promove a produção de ferro e aço através da pirometalurgia, onde, além do produto de interesse, acaba gerando grandes quantidades de resíduos sólidos, como a escória e outros subprodutos (OGE, 2019). A escória de alto forno (EAF) tem atraído a atenção de muitos cientistas pela possibilidade de ser convertida em produtos de valor agregado e pela diminuição de resíduos através do reaproveitamento (KHOLKINA, 2019). Além disso, a EAF exibe boa resistência mecânica, dureza, resistência ao desgaste, adesividade, rugosidade, porosidade e tenacidade (PASETTO, 2017). Esses atributos também estão entre as principais características encontradas nos óxidos metálicos e a versatilidade desses materiais impulsionou uma nova tendência em sua utilização, o desenvolvimento de novos materiais cerâmicos funcionais (ANDREOLA, 2016).

Por outro lado, causa grande preocupação ambiental a ampla utilização de aditivos, à base de compostos azo, como agentes corantes em diversas indústrias do setor alimentício, têxtil e cosméticos (CÂMARA, 2017). Estes compostos apresentam uma série de desvantagens como toxicidade, não são biodegradáveis, além de carcinogênicos, mutagênicos e até teratogênicos, criando sérias ameaças à saúde humana e aos organismos marinhos (ABDELGHAFAR, 2018).

Dentre os compostos que fazem parte desse grupo de corantes azo, a tartrazina (TRT, também conhecida como E-102; Figura 1) é um dos mais importantes e mais utilizados na indústria alimentar porque, quando incorporado a alguns alimentos, agrega uma série de benefícios, melhorando a aparência e a cor deles (SHANSHAN, 2020). Em contrapartida aos seus benefícios, estudos mostram que a TRT vem apresentando uma série de problemas relacionados à saúde humana, como reações alérgicas, hiperatividade, asma, enxaqueca, eczema, câncer de tireoide e lúpus. Além disso, estima-se que de 2 a 10% da produção anual de corantes sintéticos são descartados em ambientes fluviais, tanto devido ao processo produtivo quanto ao descarte não sustentável após o uso (SKINNER, 2020).

**Figura 1** – Fórmula estrutural da TRT, exibindo os grupos azo (-N=N-) e os anéis aromáticos característicos deste composto.



Fonte: PubChem (estrutura 164825).

Diante do exposto, pode-se afirmar a grande motivação do desenvolvimento desse trabalho, tendo em vista o reaproveitamento de um resíduo sólido da indústria siderúrgica, a EAF, no desenvolvimento de um material cerâmico, avaliando o potencial do mesmo para eletrooxidação de TRT, um poluente prioritário pertencente a classe dos azo-compostos.

## 2 JUSTIFICATIVA

Os azo-corantes são os mais produzidos anualmente, correspondendo a cerca de 70% da produção mundial, mas 1–10% do total é descartado devido ao uso não sustentável, produzindo uma grande quantidade de efluentes. Portanto, é necessário o desenvolvimento de métodos eficientes para o tratamento de efluentes provenientes do uso de TRT (SKINNER, et al. 2020).

O processo eletroquímico mostrado nesse estudo demonstrou desempenho equivalente ou superior comparado a outras propostas envolvendo adsorção e fotodegradação para o tratamento de TRT. Como a utilização da semente *Moringa oleifera* como um adsorvente natural, que obteve uma descoloração acima de 95% após um período de tratamento de 4h (RECK,2018). O uso de adsorventes à base de cinzas e resíduos de soja sem óleo que demonstrou uma descoloração acima de 50% após um período de 1h de tratamento com a melhor percentagem de remoção obtida em pH 2,0 (MITTAL, 2006). Por fotodegradação, a utilização de irradiação UV e fotólise de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para degradação de TRT, que obteve 83% de

degradação após 1 h de irradiação (OANCEA, 2014).

Devido aos impactos ambientais provenientes tanto da grande quantidade de resíduos sólidos da indústria siderúrgica quanto da emissão de efluentes das indústrias que fazem uso de corantes, a reutilização da escória para construção de um ânodo cerâmico para eletrooxidação de TRT se mostra uma solução ecologicamente sustentável, ou seja, combina a reciclagem de um resíduo sólido para o desenvolvimento de uma tecnologia sustentável e eficiente para o tratamento eletroquímico de um poluente ambiental.

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 REAGENTES E MATERIAIS**

Os eletrodos foram elaborados a partir de frações de EAF fornecidas por uma Companhia Siderúrgica que atua numa área pertencente ao Porto do Pecém, em Fortaleza – CE. As placas de cobre e resina Epóxi<sup>®</sup> foram adquiridos no comércio local de Juazeiro do Norte – CE. O corante amarelo de tartrazina e demais reagentes usados na preparação dos eletrólitos foram adquiridos da Sigma-Aldrich<sup>®</sup> e utilizados sem posterior purificação. Todas as soluções foram preparadas com água destilada.

#### **3.2 PREPARAÇÃO DOS ÂNODOS CERÂMICOS**

Foi realizada uma trituração manual da EAF em um almofariz de aço-inox, seguida de um peneiramento a seco utilizando uma peneira com abertura de 80 mesh. O material peneirado foi misturado com carbono grafite (CGF) nas proporções 10:90, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50, 60:40, 70:30, 80:20 e 90:10% (m/m), e compactados em moldes circulares com prensa hidráulica (CrushIRTM, Pike Technologies; 8 toneladas de pressão), originando discos com diâmetro de 15,0 mm e espessura de 3,0 mm. Posteriormente, os discos foram sinterizados em forno mufla a uma temperatura de 400 °C por 4 h, a uma taxa de aquecimento de 50°C/min. Visando uma maior uniformidade do arranjo microestrutural do material, os ânodos passaram por um resfriamento lento no interior do próprio forno por um período de 12 h. Os discos sinterizados foram então immobilizados sobre uma placa de cobre para permitir o contato elétrico e utilizou-se a resina Epóxi<sup>®</sup> para o isolamento e delimitação da área ativa do ânodo (1,54 cm<sup>2</sup>).

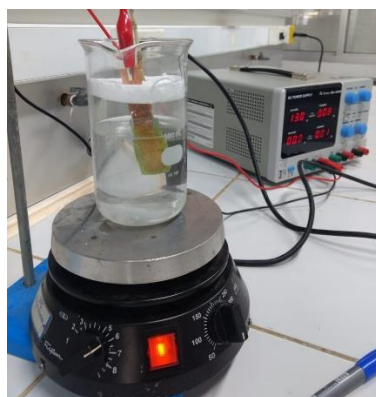
### 3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS ÂNODOS

A morfologia e composição dos materiais foram caracterizadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV; SHIMADZU Superscan) e Espectroscopia Dispersiva de Raios-X (EDS; RIGAKU, modelo mini flex 600). O comportamento térmico da EAF foi analisado através da técnica de calorimetria exploratória diferencial (DSC). A caracterização eletroquímica foi realizada através dos métodos de voltametria cíclica (VC), voltametria linear (VL) e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE), utilizando um Potenciostato/Galvanostato PGSTAT 101 e  $\mu$ -Autolab Type III, ambos da Metrohm®. Todas as medidas eletroquímicas foram realizadas em uma célula de três eletrodos: o ânodo de trabalho, um contra-eletródo de platina e um eletródo de referência do tipo Ag/AgCl/Cl<sup>-</sup> saturado.

### 3.4 ELETRODEGRADAÇÃO DA TARTRAZINA

Os ensaios de eletrodegradação foram realizados sob condições galvanostáticas, utilizando os ânodos construídos e uma placa de titânio (10.0 cm<sup>2</sup>) como cátodo, com o controle de tensão e densidade de corrente feito por fonte de alimentação DC (SANKE electrical Co., Ltd., China). A eletrólise da solução de TRT  $1,0 \times 10^{-3}$  mol L<sup>-1</sup> em NaCl  $1,0 \times 10^{-2}$  mol L<sup>-1</sup> foi realizada sob constante agitação (400 rpm), a uma temperatura de 25 °C, e o processo monitorado por espectrofotometria UV-vis (UV-1800, SHIMADZU). O sistema eletródico completo é mostrado na Figura 2.

**Figura 2** – Sistema eletroquímico utilizado nos testes de eletrodegradação de TRT.



Fonte: Autoria própria.

Foram estudadas a influência de parâmetros críticos no processo: pH (2,0; 7,0; 12,0),

temperatura (20, 30 e 40 °C), tempo de eletrólise (2 a 30 min), densidade de corrente (5; 10; 20; 30 mA), e concentração do eletrólito ( $1 \times 10^{-1}$  mol L<sup>-1</sup>;  $5 \times 10^{-2}$  mol L<sup>-1</sup>;  $1 \times 10^{-2}$  mol L<sup>-1</sup>;  $5 \times 10^{-3}$  mol L<sup>-1</sup>;  $1 \times 10^{-3}$  mol L<sup>-1</sup>). Todos os experimentos foram realizados em triplicata e os resultados apresentados como a média aritmética entre as três medidas.

A fim de avaliar a aplicabilidade dos materiais cerâmicos para a eletrólise de TRT, foram conduzidos diferentes experimentos em meio de ácido sulfúrico  $1 \times 10^{-2}$  mol L<sup>-1</sup>, aplicando-se densidades de 10 mA cm<sup>-2</sup>, ao longo de 30 minutos. Os resultados foram acompanhados por espectroscopia UV-visível.

Os valores de porcentagem de remoção foram obtidos através da espectroscopia UV-visível acompanhando a leitura dos valores de absorbância no pico característico da TRT no comprimento de onda de 430nm, em as medidas foram realizadas a partir de alíquotas retiradas após intervalos de tempo de eletrodegradação (0; 2,5; 5; 7,5; 10; 15; 20; 25; 30 min).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

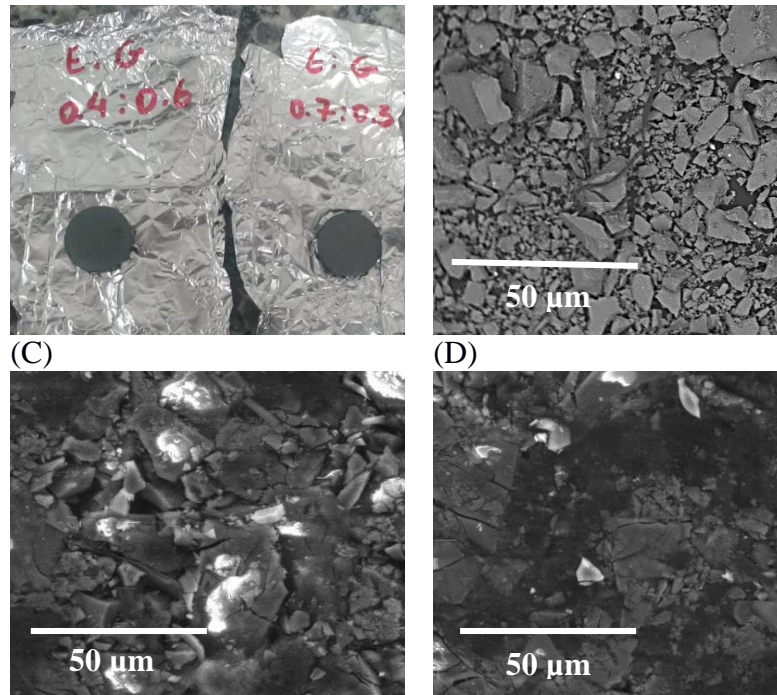
### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

As microestruturas da EAF foram analisadas por MEV, antes e após a associação com CGF. Observando o perfil das amostras antes da sinterização (Figura 3A), pode-se notar uma grande variabilidade na granulometria, o que favorece a densificação do material. O material compósito prensado apresentou uma estrutura rugosa e bem compactada, com a presença de trincas, principalmente nos discos contendo menor proporção de CGF (Figura 3B). Após a etapa de sinterização (Figura 3C), esses defeitos foram reduzidos pronunciadamente, indicando maior nível de densificação e coalescência dos componentes, bem como de melhor resistência mecânica (dados não mostrados).

**Figura 3** – Corpos de prova obtidos a partir de diferentes proporções de escória de alto-forno e grafite (A); micrografias obtidas para os resíduos particulados da EAF (B), bem como para sua combinação com CGF, na proporção 50:50% (m/m), antes (C) e após (D) o processo de sinterização, para uma magnificação de 250 vezes.

(A)

(B)



Fonte: Autoria própria.

A adição de CGF a EAF mostrou-se necessária uma vez que este resíduo puro apresentou baixa capacidade de transferência de carga, assimilando-se a um isolante. A escolha do CGF como material modificador se justifica por apresentar uma ampla janela de potencial, baixa corrente de fundo e resistência ôhmica (TURUNC, 2020). De fato, a associação EAF/CGF favoreceu um aumento na condutividade do material à medida que se aumentava o teor de CGF, como comprovado experimentalmente por ensaios voltamétricos e EIE (dados não mostrados), nos quais houve redução da resistência à transferência de carga de  $580 \Omega$  para  $60 \Omega$ , com o incremento na proporção de CGF no compósito. Ainda, o aumento do teor de EAF provocou uma diminuição no grau de compactação e na resistência mecânica do compósito, além de dificultar o processo de sinterização. A proporção entre EAF e CGF que apresentou condições de resistência mecânica e de condutividade foi a de 50:50%, logo este compósito foi escolhido como material base do ânodo de trabalho.

Através da análise de EDS, foi determinada a composição elementar da EAF (Tabela 1). Os resultados indicaram a presença majoritária de oxigênio (48,77%), cálcio (18,85%) e silício (18,59%). Outros elementos também encontrados, embora em menor abundância, foram alumínio (7,88%), manganês (3,35%), magnésio (1,63%) e titânio (0,93%). A presença destes elementos é característica de resíduos sólidos oriundos dos processos de aproveitamento do ferro gusa, sendo que o grande percentual de oxigênio indica que boa parte

destes esteja na forma de óxidos metálicos, como MgO, CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO e MnO<sub>2</sub> (LUNA, 2017; JOHN & AGOPYAN, 1998). Altos teores de óxidos na EAF tornam fazem com que este material apresentem uma elevada resistência mecânica, mas às custas da diminuição na condutividade elétrica, de modo que sua utilização como material anódico é totalmente dependente de associações com outros materiais condutores, a exemplo do CGF.

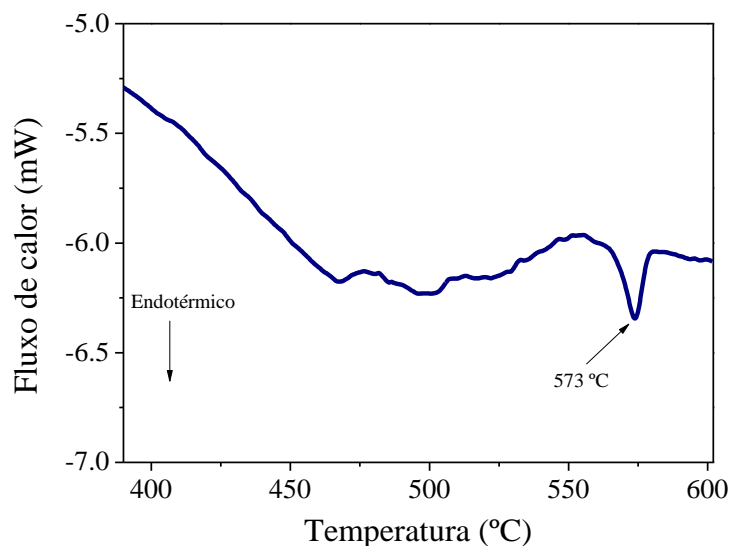
**Tabela 1** - Principais componentes da EAF, em massa.

<i>Componente</i>	<i>O</i>	<i>Ca</i>	<i>Si</i>	<i>Al</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Ti</i>
<i>Teor (%)</i>	48.77	18.85	18.59	7.88	3.35	1.63	0.93

Fonte: Autoria própria.

A análise por DSC mostrou que houve uma transição de primeira ordem (reação de cristalização) na temperatura de 573 °C (Figura 4). Essa transição transformação é característica da mudança de fase do SiO<sub>2</sub>, onde o quartzo  $\alpha$  transforma-se irreversivelmente em quartzo  $\beta$ , com conseqüente expansão volumétrica de aproximadamente 0,45% (PEREIRA, 2014; ZHANG, 2018). Essa transformação de fase expansiva prejudica a integridade mecânica de corpos cerâmicos que contenham partículas de SiO<sub>2</sub> em sua composição, devido à nucleação de trincas. A fim de se evitar esse efeito, buscou-se sinterizar os corpos de prova a uma temperatura inferior à essa temperatura crítica, sendo utilizado a temperatura de 400 °C como condição otimizada para síntese do material base dos ânodos.

**Figura 4** – Curva de DSC para a escória de alto-forno.

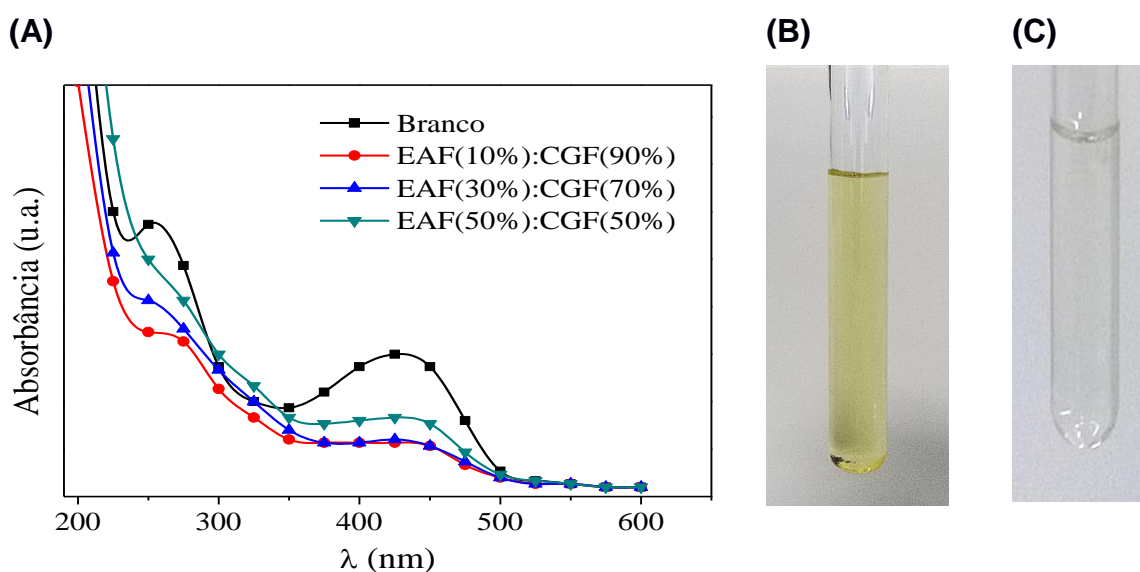


Fonte: Autoria própria.

## 4.2 ELETRODEGRADAÇÃO DA TARTRAZINA

Ao final do processo eletrolítico, todos os compósitos testados promoveram a eletrodegradação do corante (Figura 5A) tendo em vista o decaimento expressivo das bandas de absorção características de TRT em 430 nm – que pode ser atribuída às transições  $n \rightarrow \pi^*$  dos grupos  $-N=N-$ ,  $-N=C-$  e  $-C=O-$ , responsáveis pela coloração do corante – e em 257 nm – atribuída às transições  $\pi \rightarrow \pi^*$ , que demonstra a característica aromática do corante (OANCEA, 2014). Isto sugere que a degradação da TRT se dá de forma completa, resultado importante, considerando que a degradação incompleta poderia gerar compostos tão ou mais prejudiciais que o próprio corante. Ainda, a própria inspeção visual da solução antes e após o processo eletrolítico (Figuras 5B e 5C, respectivamente) evidencia que houve quebra do grupo cromóforo  $-N=N-$ . Embora a eficiência de tratamento tenha sido relativamente similar para as diferentes combinações, o material sinterizado com 50% em massa de EAF pode ser produzido a um custo bem mais acessível, tendo em vista que a EAF é um resíduo industrial, favorecendo sua implementação em uma futura escala de tratamento industrial. Quando analisados em conjunto, estes dados atestam a eficiência eletrocatalítica dos ânodos à base de EAF.

**Figura 5** – Espectros de absorção UV-Visível observados antes e após o processo de eletrodegradação de TRT sobre ânodos cerâmicos utilizados neste trabalho (A). O aspecto visual da solução antes (B) e após (C) o tratamento eletroquímico das amostras.

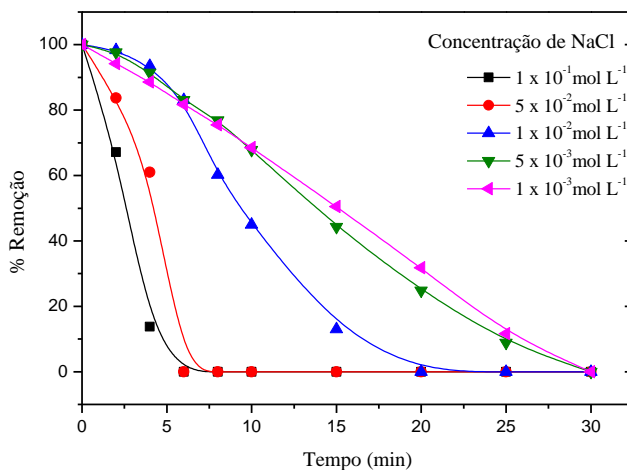


Fonte: Autoria própria.

### 4.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA ELETRODEGRADAÇÃO DA TRT

A otimização das condições de eletrólise foi feita buscando-se a redução do tempo de tratamento e do custo energético, a fim de tornar o processo mais sustentável. A Figura 6 mostra o efeito da concentração do eletrólito sobre a eficiência do processo. Nota-se que à medida que a concentração do eletrólito aumentou, o processo de degradação do corante se deu de forma mais acentuada, necessitando de menos tempo para degradar a TRT e, conseqüentemente, diminuindo os custos com energia elétrica. Isso ocorre devido ao aumento na concentração de espécies de cloro ativo eletrogeradas em solução, que atuam conjuntamente aos radicais hidroxila ( $\text{OH}\cdot$ ) na decomposição da TRT (MOHAN, 2007). Os íons hipoclorito ( $\text{ClO}^-$ ) são os principais agentes oxidantes na degradação indireta de poluentes orgânicos em eletrólitos clorados (KARIYAJJANAVAR, 2011). Entretanto, a concentração do eletrólito suporte foi fixada em  $5,0 \times 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$  nos experimentos subsequentes, uma vez que nesta concentração o desempenho do processo electrocatalítico foi semelhante ao da maior concentração estudada.

**Figura 6** – Efeito da concentração do eletrólito no processo de eletrooxidação de TRT.

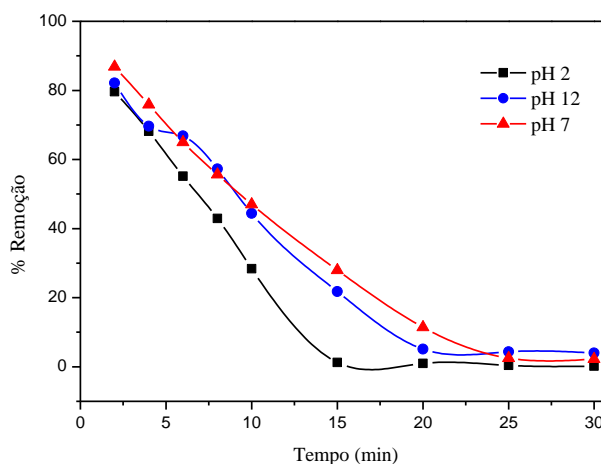


Fonte: Autoria própria.

O pH do eletrólito suporte é um dos principais fatores que afetam o desempenho do processo de degradação. Assim, sabendo-se que a molécula da TRT tem caráter próton-dependente, ao apresentar sítios aceptores ou doadores de prótons, a influência do pH do eletrólito também foi investigada. A Figura 7 mostra o efeito do pH do eletrólito suporte

sobre o processo de eletrooxidação do azo-corante. Pode-se notar que em meio ácido a molécula sofreu degradação de forma mais rápida, também favorecendo um menor gasto energético no processo. Nesta condição, a produção de espécie oxidantes de derivadas de cloro torna-se maior, contribuindo para a eficiência do processo. Portanto, o pH ácido foi escolhido para os experimentos subsequentes.

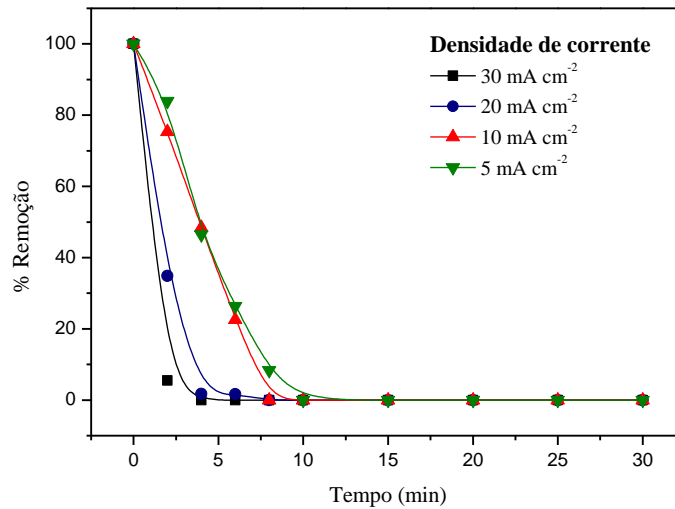
**Figura 7** – Efeito do pH no processo de eletrooxidação de TRT.



Fonte: Autoria própria.

O estudo do efeito da densidade de corrente é de fundamental importância, podendo ser considerado como um dos parâmetros mais críticos do processo de eletrodegradação. Os ensaios de eletrodegradação sob diferentes densidades de corrente mostram que a concentração do corante diminuiu exponencialmente em função do tempo de eletrólise, para todas as condições testadas (Figura 8). Nos dez minutos iniciais, a redução na concentração do corante foi mais pronunciada, mantendo-se praticamente constante após esse tempo. Observa-se que nas condições de maiores densidades de corrente (20 e 30 mA cm<sup>-2</sup>) houve um aumento na cinética de degradação devido a maior produção de radicais oxidantes OH•, promovendo a total remoção de TRT em um tempo inferior a 5 min. Como condição otimizada, utilizou-se uma densidade 20 mA cm<sup>-2</sup> por oferecer um melhor custo-benefício energético para a efetivação do processo.

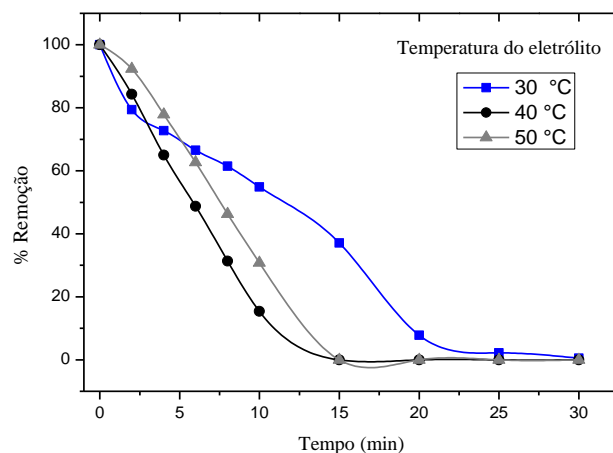
**Figura 8** - Efeito da densidade de corrente no processo de eletrooxidação de TRT.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Como em outras reações de catálise heterogênea, a temperatura do meio deve ser estudada, uma vez que exerce influência direta na cinética da reação afetando a velocidade de degradação positivamente. Como mostrado na Figura 9, a eficiência do processo eletrolítico melhorou com o aumento da temperatura, comparando o processo a 30 °C com 40 e 50 °C. Martínez-Huitl (2009) relatou que o aumento da temperatura favorece a velocidade de formação das radiações de OH•, que são responsáveis pela degradação dos azo-corantes em um período de tempo reduzido. Todavia, temperaturas mais elevadas também podem ocasionar a perda de água por evaporação, devendo ser evitada já que também é desejável o reuso desta água. Assim, a eletrodegradação do TRT conduzida a 40 °C se mostrou a melhor alternativa para este trabalho, garantindo a completa remoção de TRT e menor consumo de energia elétrica.

**Figura 9** - Efeito da temperatura no processo de eletrooxidação de TRT.



Fonte: Elaborado pelos autores.

## 5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, a combinação entre EAF e CGF pode ser usada na fabricação de novos semicondutores cerâmicos, mas somente em proporções de EAF  $\geq 50\%$ , visando o maior reaproveitamento de EAF. O material resultante apresentou morfologia rugosa e bem compactada, principalmente após o processo de sinterização, características desejáveis para superfícies anódicas. A utilização de CGF foi fundamental para o desenvolvimento dos ânodos, reduzindo a resistência elétrica de  $580 \Omega$  para  $60 \Omega$  quando as proporções em massa de EAF e CGF variaram entre 50:50% e 10:90%. Esses materiais mostram boa performance para a eletrodegradação do azo-corante TRT, nas condições otimizadas (50:50% em massa; pH 2,0;  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ; densidade de corrente  $20 \text{ mV cm}^{-2}$ ) o anodo cerâmico possibilitou a eficiente eletrooxidação da TRT obtendo 95,3% de descoloração, favorecendo sua implementação em uma futura escala de tratamento industrial oferecendo um bom custo-benefício em termo de consumo energético. Por fim, este trabalho contribuiu com uma nova alternativa de reaproveitamento de rejeitos para a produção de cerâmicas funcionais, ampliando o campo de aplicações desses materiais.

## AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Cariri – UFCA pelo apoio ao projeto, por meio de concessão de bolsa através do programa PIBITI/UFCA (Edital 06/2019/PRPI).

## REFERÊNCIAS

- ABDELGHAFAR S. Dhmees; NAGLA M. Khaleel; SAWSAN A. Mahmoud. Synthesis of silica nanoparticles from blast furnace slag as cost-effective adsorbent for efficient azo-dye removal, **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 27, n. 4, p. 1113-1121, dec. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.03.012>>. Acesso em: 10 nov. 2020.
- ANDREOLA, F. *et al.* Recycling of industrial wastes in ceramic manufacturing: State of art and glass case studies. **Ceramics International**, v. 42, n. 12, p. 13333-13338, set. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.205>>. Acesso em: 13 nov. 2020.
- CÂMARA, Arthur M. **Corantes azo: características gerais, aplicações e toxicidade**. 2016. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Nutrição) – Curso de Nutrição, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: <<https://monografias.ufrn.br/jspui/handle/123456789/5117>>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- Instituto Aço Brasil**. Anuário Estatístico - 2020 - Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2020.
- JOHN, V.M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de escória de alto forno no Brasil**. PCC, USP. 1998.
- KARIYAJJANAVAR, Prakash; NARAYANA, Jogttappa.; NAYAKA, Yanjerappa.A. Degradation of textile wastewater by electrochemical method. **Hydrology Current Research**, v. 2, n. 1, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.4172/2157-7587.1000110>>. Acesso em: 25 nov. 2020.
- KHOLKINA, E. *et al.* Synthesis and Characterization of Novel Catalytic Materials Using Industrial Slag: Influence of Alkaline Pretreatment, Synthesis Time and Temperature. **Top Catal**, v. 62, p. 738–751, mar. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11244-019-01162-5>>. Acesso em: 15 dez. 2020.
- LUNA, D. S. **Influência da incorporação da lama vermelha e da escória de alto forno, na obtenção de cerâmica estrutural**. Marabá – PA, 2017.
- MARTÍNEZ-HUITLE Carlos A; ENRIC Brillas. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review, **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 87, n. 3-4, p. 105-145, abr. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.09.017>>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- MITTAL Alok; MITTAL Jyoti; KURUP Lisha. Adsorption isotherms, kinetics and column operations for the removal of hazardous dye, Tartrazine from aqueous solutions using waste materials—Bottom Ash and De-Oiled Soya, as adsorbents, **Journal of Hazardous Materials**, v. 136, n. 3, p. 567-578, ago. 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.12.037>>. Acesso em 22 jan. 2021.
- MOHAN, N. A; BALASUBRAMANIAN, N; BASHA, AHMED C. Electrochemical oxidation of textile wastewater and its reuse. **Journal of Hazardous Materials**, v. 147, n. 1-2, p. 644–651, ago. 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.063>>. Acesso em: 15 jan. 2021.
- OANCEA, Petruta; MELTZER, Viorica. Kinetics of tartrazine photodegradation by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in aqueous solution, **Chemical Papers**, v. 68, n. 1, p. 105-111. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.2478/s11696-013-0426-5>>. Acesso em: 23 jan. 2021.
- OGE, Mecit, *et al.* An overview of Utilization of Blast Furnace and Steelmaking Slag in Various Applications. **Materials Today: Proceedings**, v. 11, n.1, p. 516-525, 2019.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.01.023>>. Acesso em: 12 dez. 2020.

PASETTO, M., *et al.* Sustainable solutions for road pavements: a multi-scale characterization of warm mix asphalts containing steel slags. **Journal Cleaner Production**, v. 166, p. 835–843. nov. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.212>>. Acesso em: 18 dez. 2020.

PEREIRA, A. H. A, *et al.* A study about the contribution of a-b phase transition of quartz to thermal cycle damage of a refractory used in fluidized catalytic cracking units. **Cerâmica**, v. 60, n. 355, p. 449-456, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000300019>>. Acesso em 09 nov. 2020.

POTYSZ A.; HULLEBUSCH, van E. D.; KIERCZAK J. Perspectives regarding the use of metallurgical slags as secondary metal resources – A review of bioleaching approaches. **Journal of Environmental Management**, v. 219, p. 138-152, ago. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.083>>. Acesso em: 10 nov. 2020.

RECK, Isabela Maria et al. Removal of tartrazine from aqueous solutions using adsorbents based on activated carbon and Moringa oleifera seeds, **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p.85-97, jan. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.237>>. Acesso em 25 jan. 2021.

SHANSHAN Wu, *et al.* Electropolymerized melamine for simultaneous determination of nitrite and tartrazine, **Food Chemistry**, v. 333, dec. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127532>>. Acesso em: 17 jan. 2021.

SKINNER AW, *et al.* Factorial Design of Experiments for Optimization of Photocatalytic Degradation of Tartrazine by Zinc Oxide (ZnO) Nanorods with Different Aspect Ratios, **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 5, out. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104235>>. Acesso em: 19 jan 2021.

TURUNC Ersan, Gumus Ilkay, Arslan Hakan, Redox active Co(II) complex modified carbon paste electrode for the determination of dopamine, **Materials Chemistry and Physics**, v. 243, (2020), <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122597>.

WSA – **Worldsteel Association. Global crude steel output increases by 3.4% in 2019.** Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2019/world-steel-in-figures-2019.html>>. Acesso em 10 de setembro de 2020.

WSA – Worldsteel Association. **World steel in figures 2019.** Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2020/Global-crude-steel-output-increases-by-3.4--in-2019.html>>. Acesso em 10 de setembro de 2020.

ZHANG, Yuanbo, *et al.* Utilizing blast furnace slags (BFS) to prepare high-temperature composite phase change materials (C-PCMs). **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 184–191, jul. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.110>>. Acesso em: 01 fev. 2021.