

AVALIAÇÃO DO EFEITO DE AGLUTINANTES NA PREPARAÇÃO DE TINTA CONDUTIVA À BASE DE MATERIAL CARBONÁCEO VISANDO O DESENVOLVIMENTO DE ELETRODO IMPRESSO PARA A DETERMINAÇÃO DE PARAQUAT

Ariane L. G. Ferreira (G)^{*1}, Arnaldo C. Pereira (PQ)¹

¹Departamento de Ciências Naturais, UFSJ, arianelarissa.gf@gmail.com^{*}, arnaldo@ufs.edu.br.

RESUMO

RESUMO – Neste trabalho descrevemos o desenvolvimento de um sensor eletroquímico impresso pela técnica de serigrafia, com suporte de PET, para a determinação do paraquat (PQ). As tintas foram preparadas pela mistura de grafite, carbon black e acetona em ambos, alterando somente o material aglutinante (esmalte e verniz vitral). O eletrodo de referência foi obtido por modificação com uma tinta à base de prata. A caracterização eletroquímica foi realizada por voltametria de onda quadrada (VOQ) na presença do PQ a $300 \mu\text{mol L}^{-1}$ em solução tampão fosfato $0,10 \text{ mol L}^{-1}$, pH 7,00. Os resultados obtidos demonstraram que o sensor impresso com a tinta composta por grafite (35 %), carbon black (15 %) e verniz vitral (50 %) apresentou o maior ganho de corrente na oxidação do PQ quando comparado à tinta com esmalte. Os resultados obtidos indicam que o sensor desenvolvido apresenta grande potencial como uma plataforma analítica portátil, descartável e de baixo custo, com desempenho eficiente na detecção de PQ.

Palavras-chave: eletrodo impresso, serigrafia, verniz vitral, Carbon Black, paraquat.

Introdução

O paraquat (PQ), ou 1,1'-dimetil-4,4'-bipiridina dicloreto, é um herbicida altamente tóxico e de uso restrito, amplamente utilizado no controle de plantas daninhas. Devido aos riscos à saúde e ao meio ambiente, há uma demanda por métodos analíticos simples, sensíveis e eficazes para sua detecção (1). Nesse contexto, sensores eletroquímicos se destacam por oferecerem baixo custo, resposta rápida, alta sensibilidade, boa seletividade e reprodutibilidade (2). Eletrodos impressos, geralmente produzidos por serigrafia, têm sido amplamente aplicados em dispositivos eletroquímicos. Compostos por um suporte inerte recoberto com tinta condutora, esses sensores incluem três componentes principais: o eletrodo de referência (ER), que estabiliza o potencial; o eletrodo de trabalho (ET), onde ocorre a reação do analito; e o eletrodo auxiliar (EA), responsável para que a corrente gerada seja aplicada no eletrodo de trabalho. Esses dispositivos se destacam pelo baixo custo de produção, facilidade de fabricação em larga escala, flexibilidade de design e descartabilidade. Tintas condutoras baseadas em materiais carbonáceos são empregadas por sua alta condutividade, ampla área superficial e boa estabilidade (3). Neste trabalho, foi desenvolvida uma tinta condutora composta por grafite (GR), Carbon Black (CB), verniz vitral (VV) e acetona, sendo o verniz responsável por atuar como aglutinante e conferir flexibilidade à tinta.

Essa tinta foi aplicada para imprimir o sensor eletroquímico, contendo os três eletrodos em um suporte PET. O desempenho eletroquímico do eletrodo impresso foi avaliado para a determinação de paraquat, utilizando a técnica VOQ.

Experimental

Desenvolvimento da tinta condutora à base de carbono, tinta de prata e impressão dos eletrodos

Os procedimentos para o preparo das tintas e impressão dos eletrodos são ilustrados na Figura 1.

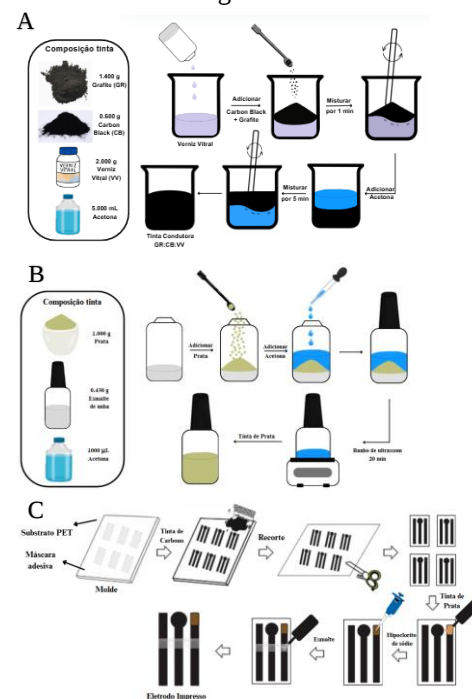


Figura 1. Esquemas dos procedimentos para o preparo: A) da tinta condutora à base de carbono, B) da tinta de prata, C) da impressão dos eletrodos.



Resultados e Discussão

Inicialmente foi avaliado o comportamento eletroquímico do sensor usando dois aglutinantes diferentes, esmalte de unha e verniz vitral (Figura 2). As tintas foram preparadas na proporção de 50% de material carbonáceo (grafite e *carbon black*) e 50% de aglutinante.

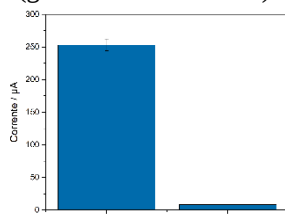


Figura 2. Efeito dos diferentes aglutinantes na intensidade de corrente anódica durante o preparo das tintas. Meio reacional: paraquat 300 $\mu\text{mol L}^{-1}$ em solução tampão fosfato 0,10 mol L^{-1} , pH 7,00.

Observou-se um aumento significativo na corrente obtida com a tinta preparada com verniz vitral, em comparação àquela que utilizou esmalte de unha como aglutinante (Figura 2). Esse comportamento pode estar relacionado às interações químicas entre o paraquat e os diferentes aglutinantes, considerando suas estruturas moleculares e características físico-químicas.

Os grupos funcionais da resina alquídica, como ésteres, éteres e cetonas, podem favorecer a interação com partículas condutoras (grafite e *carbon black*), ajudando a formar um filme eletroativo mais homogêneo, com maior condutividade e área eletroquimicamente ativa, o que poderia aumentar a intensidade da corrente e a transferência de carga (4). O PQ, por ser uma espécie carregada positivamente e capaz de sofrer redução eletroquímica, pode interagir preferencialmente com superfícies que contenham presença de grupos funcionais compatíveis, favorecendo sua interação e adsorção na matriz formada pelo verniz. No entanto, são necessários estudos adicionais para aprofundar essa hipótese.

Posteriormente, foi avaliado o efeito da composição da tinta condutora, variando as proporções de *carbon black*, grafite e verniz vitral. Para isso, foram testadas proporções de VV entre 45% e 55% (Figura 3A).

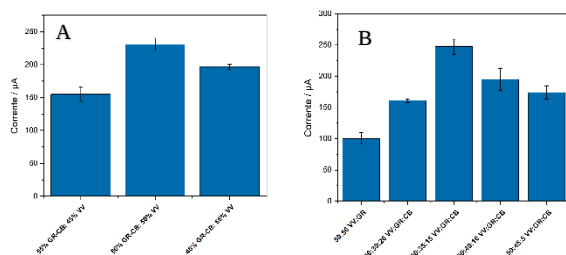


Figura 3. A) otimização da quantidade de aglutinante na tinta B) otimização da quantidade de grafite e *Carbon Black*. Meio reacional: paraquat 300 $\mu\text{mol L}^{-1}$ em solução tampão fosfato 0,10 mol L^{-1} , pH 7,00.

Observou-se que, com 45% de VV, a tinta apresentou elevada viscosidade e baixa adesão ao PET. Na proporção de 50% de VV, observou-se melhor uniformidade e menor viscosidade, facilitando a impressão e proporcionando o melhor desempenho eletroquímico. Por outro lado com 55% de VV, apesar da boa homogeneidade, a corrente diminuiu devido ao excesso de verniz isolante, dificultando a transferência de carga (Figura 3A).

Após otimizar a quantidade de aglutinante foi realizado o estudo da quantidade de CB na tinta condutora, a fim de avaliar o melhor desempenho analítico do sensor.

Pode-se observar pela Figura 3B que os eletrodos com maior proporção de *carbon black* apresentam maior ganho de corrente quando comparado com a tinta composta somente por grafite. Isso se deve às partículas nanométricas de CB, que formam uma rede condutora com elevada área superficial e microporosidade, facilitando a condução de elétrons e aumentando os sítios ativos para interação com o paraquat.

Como resultado, o eletrodo torna-se mais condutor, sensível e seletivo para o analito. Observa-se ainda que a maior sensibilidade foi obtida com a formulação contendo 35% de GR e 15% de CB. No entanto, a partir de proporções mais elevadas de CB, como 20%, há uma redução da corrente, possivelmente devido à dificuldade de difusão do analito, causada pelo excesso das partículas condutoras, ou pela lixiviação da tinta para a solução. Portanto, a proporção ótima escolhida para a impressão dos eletrodos foi 50% de material carbonáceo e 50% de verniz vitral, a qual será utilizada nas etapas subsequentes do estudo para análise de PQ em amostras reais de água, acoplado a um sistema de análise por injeção em batelada (BIA), de modo a validar sua aplicabilidade analítica.

Conclusões

A tinta condutora desenvolvida a partir da mistura de grafite, *carbon black* e verniz vitral se destaca pela fácil aplicação. Dentre as formulações avaliadas, a tinta composta por 35% GR, 15% CB e 50% VV, apresentou o desempenho eletroquímico mais satisfatório. Essa composição resultou em maior intensidade de corrente e melhor estabilidade analítica. O verniz vitral, além de atuar como agente aglutinante, promoveu uma dispersão mais homogênea dos materiais carbonáceos, possivelmente devido a uma maior afinidade química com esses componentes, em comparação ao esmalte de unha. Dessa forma, o eletrodo impresso com tinta formulada à base de verniz vitral evidenciou-se como a alternativa mais eficaz para a detecção do PQ, destacando a relevância da composição da tinta condutora no desempenho final do dispositivo analítico.

Conclui-se, portanto, que o sensor proposto apresenta características promissoras, sendo portátil, descartável, de baixo custo e passível de fabricação simplificada, configurando-se como uma plataforma viável para a determinação de PQ. Em continuidade a este estudo, o eletrodo impresso deverá ser avaliado quanto à aplicabilidade na análise de amostras reais de água, acoplado a um sistema de análise por injeção em batelada (BIA).

Agradecimentos

UFSJ-DCNAT, FAPEMIG, CAPES, CNPQ, GPPE e LABSENSOR.

Referências

- Y. Chaudhary, S. Suman, K.J.S. Sankaran, *Microchem. J.* **2025**, 213, 113780.
- M.I. Saidin, I.M. Isa, M.S. Rosmi, N. Hashim, M.S. Ahmad, S.N.A. Mohd Yazid, A.A. Bahari, *Int. J. Environ. Anal. Chem.* **2024**, 1–15.
- D. Pimalai, T. Putnin, S. Bamrungsap, *J. Environ. Sci.* **2025**, 148, 139–150.
- L.A. Pradela-Filho, I.A.A. Andreotti, J.H.S. Carvalho, D.A.G. Araújo, L.O. Orzari, A. Gatti, R.M. Takeuchi, A.L. Santos, B.C. Janegitz, *Sens. Actuators B Chem.* **2020**, 305, 127433.