



Desenvolvimento de microagulhas por impressão 3D visando aplicações em sensores eletroquímicos de monitoramento transdérmico

Bianka Victória Nunes Fonseca^{1*}(PQ), Ariamna María Dip Gandarilla¹(PQ), Mark Dany Veloso Júnior¹ (PG), Thiago Monteiro de Souza¹ (PG), Walter Ricardo Brito^{1**}(PQ).

¹Universidade Federal do Amazonas, Central Analítica do Centro de Apoio Multidisciplinar (CAM), Laboratório de Bioeletrônica e Electroanalítica (LABEL), Av. Rodrigo Otávio Jordão Ramos, 6200, Coroado I, 69080-900, Manaus AM, Brasil.

* bianka.fonseca@ufam.edu.br

** wrbrito@ufam.edu.br

Palavras-Chave: Estereolitografia, manufatura aditiva, plataforma eletroquímica.

Introdução

A pele atua como uma interface dinâmica entre o meio interno e o ambiente externo do corpo humano, sendo constantemente influenciada por estímulos físicos, químicos e biológicos. Nesse sentido, o estado fisiológico da pele, bem como de todo o organismo, pode ser monitorado por meio da detecção de biomarcadores presentes em biofluidos localizados nas suas camadas internas¹. O monitoramento de biomarcadores é frequentemente realizado para identificar alterações no metabolismo e fornecer um diagnóstico precoce de doenças metabólicas crônicas, facilitando a adoção rápida de terapias². Para o monitoramento, as técnicas eletroquímicas têm se destacado por exigirem pequenos volumes de amostra, apresentarem baixos limites de detecção, alta sensibilidade e simplicidade operacional³. Com base nessas premissas, as microagulhas (MAs) surgem como plataformas eficazes para sensores eletroquímicos, viabilizando a detecção transdérmica de analitos de forma indolor, rápida e com risco reduzido de infecção, além disso, essas estruturas possuem dimensões micrométricas e podem apresentar variadas morfologias — sólidas, ocas, expansíveis, solúveis ou revestidas — adaptando-se a diferentes aplicações analíticas⁴. A manufatura aditiva, especialmente a impressão 3D, destaca-se por permitir a produção de estruturas complexas com alta reprodutibilidade, sem a necessidade de altas temperaturas ou solventes tóxicos⁵. Apesar de seu potencial, a fabricação de microagulhas por impressão 3D ainda enfrenta desafios, principalmente na otimização dos parâmetros de impressão para obter sensores altamente sensíveis e confiáveis. Neste trabalho, foram produzidas microagulhas (MAs) através da técnica de estereolitografia (impressão 3D) visando a sua aplicação como plataforma eletroquímica. Os formatos cônico e piramidal das agulhas foram investigados.

Material e Métodos

As microagulhas foram projetadas em dois formatos: cônico e piramidal. O arranjo foi composto por uma matriz 12 x 12 de agulhas em substrato de 1 cm² com espessura de 0,1 mm, base, 300 µm, distância, 500 µm, e altura, 600 µm (Figura 1). O substrato foi fixado a um suporte de 2 cm de altura e 0,27 cm de largura, da mesma espessura do substrato. Para a impressão, foi utilizada uma impressora laser 3D 4k e fotossensível biocompatível de alta resolução.

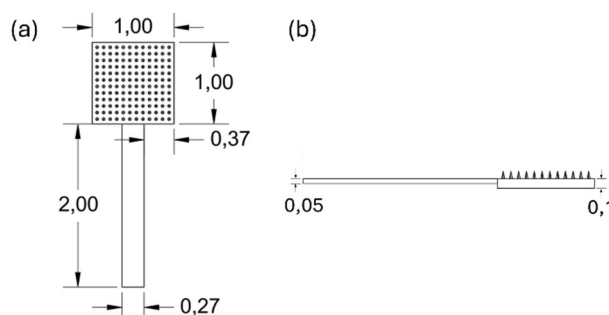


Figura 1. (a) Vista superior e (b) vista lateral (cm).

Após a impressão, as microagulhas foram lavadas com etanol, curadas e submetidas à pulverização catódica com ouro por 8 minutos, sendo posteriormente caracterizadas por técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e voltametria cíclica (VC). Para a caracterização eletroquímica foi utilizada uma célula de três eletrodos acoplada a um potenciostato. Como eletrodo de referência Ag/AgCl, como contraeletrodo um fio de platina. A célula foi preenchida com 5 mL de solução de K₃[Fe(CN)₆]/K₄[Fe(CN)₆] 5 mmol L⁻¹ suportada em KCl 0,1 mol L⁻¹, com uma velocidade de varredura de 50 mV/s.

Resultados e Discussão

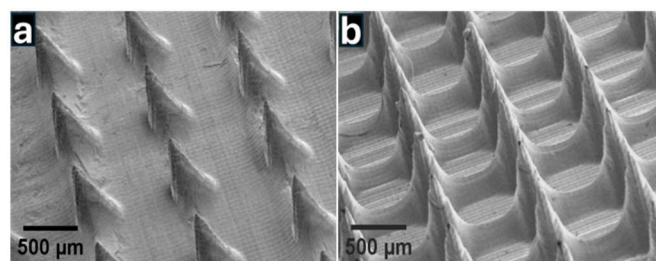


Figura 2. Imagens MEV das microagulhas a) cônica e b) piramidal.

Na Figura 2 é mostrado a morfologia das microagulhas produzidas por manufatura aditiva. As imagens de MEV revelaram um arranjo semelhante ao encontrado na literatura, isto é, apresentam um arranjo que segue um padrão espacial, conforme configurado no arquivo de desenho. Os arranjos obtidos apresentaram morfologia homogênea e ordenada com a presença de estruturas geométricas pontiagudas

preenchidas, condizente com a aquisição de MAs do tipo sólida⁶. As microagulhas na forma piramidal apresentaram uma geometria não homogênea, relacionado com o acúmulo de resina entre os espaçamentos das MAs, associado ao processo de limpeza com etanol ou metodologia de deposição do filme de ouro depositado na superfície.

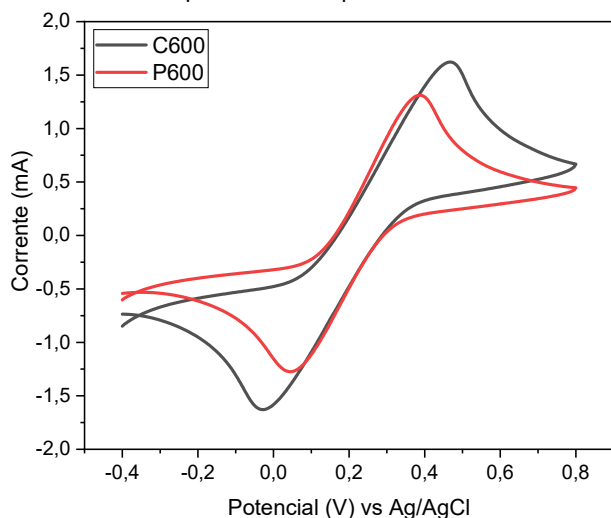


Figura 3. Voltamogramas cíclicos de MAs cônicas (C600) e piramidais (P600) em solução 5 mmol L⁻¹ de [Fe(CN)₆]^{3-/4-} suportada em 0,1 mol L⁻¹ de KCl em uma velocidade de varredura de 50 mV s⁻¹.

Na Figura 3 são mostrados os resultados preliminares do estudo eletroquímico das MAs. Os perfis voltamétricos obtidos são associados aos picos de corrente faradaica do processo redox da sonda eletroquímica empregada Fe³⁺/Fe⁴⁺ ⁷. Com base nesses perfis voltamétricos, o eletrodo que apresentou maiores valores de corrente de pico foi o C600, que mostrou um maior potencial para aplicações eletroquímicas.

Conclusões

Um arranjo de microagulhas foi criado em dois formatos, cônico e piramidal, usando o método de manufatura aditiva. A caracterização por MEV demonstrou que as MAs obtidas apresentam uma escala micrométrica característica, seguindo o padrão e as morfologias adequadas. A resposta eletroquímica das MAs avaliada por voltametria cíclica (VC) indicou um perfil condutivo nas amostras, identificado pela presença de picos relacionados ao processo redox da sonda eletroquímica. A forma cônica, em comparação com a piramidal, apresentou uma morfologia mais regular, além de um melhor desempenho eletroquímico, com valores de corrente de pico mais elevados. A variação morfológica demonstrou ser um fator influente nas propriedades eletroquímicas. Embora seja necessária uma investigação mais aprofundada das etapas de produção, as MAs produzidas demonstram potencial para aplicações em sensoriamento eletroquímico.

Agradecimentos

A UFAM, a FAPEAM pelo suporte financeiro, ao grupo de pesquisa LABEL, coordenado pelo Prof. Dr. Walter Brito, ao CMABio-UEA e a Central Analítica do IFAM-CMC, campus Manaus Centro.

Referências

[1] ABE, Y.; YAMAGUCHI, S.; ABE, H.; TAKIZAWA, R.; TATSUI, Y.; NISHIZAWA, M. Intradermal measurement of reactive oxygen species using open-tip porous microneedles. *Microelectronic Engineering*, v. 265, p. 111-877, 2022.

[2] BACKIYALAKSHMI, G.; SNEKHALATHA, U.; SALVADOR, A. L. Recent advancements in non-invasive wearable electrochemical biosensors for biomarker analysis – A review. *Analytical Biochemistry*, v. 692, p. 115-578, 2024.

[3] ADAM, H.; GOPINATH, S. C. B.; MD ARSHAD, M. K.; ADAM, T.; HASHIM, U.; SAULI, Z.; FAKHRI, M. A.; SUBRAMANIAM, S.; CHEN, Y.; SASIDHARAN, S.; WU, Y. S. Integration of microfluidic channel on electrochemical-based nanobiosensors for monoplex and multiplex analyses: An overview. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 146, p. 104-814, 2023.

[4] DERVISEVIC, M.; ESSER, L.; CHEN, Y.; ALBA, M.; PRIETO-SIMON, B.; VOELCKER, N. H. High-density microneedle array-based wearable electrochemical biosensor for detection of insulin in interstitial fluid. *Biosensors and Bioelectronics*, v. 271, p. 116-995, 2025.

[5] AFRIDI, A.; AL RASHID, A.; KOÇ, M. Recent advances in the development of stereolithography-based additive manufacturing processes: A review of applications and challenges. *Bioprinting*, v. 43, p. e00360, 2024.

[6] FITAIHI, R.; ABUKHAMEES, S.; CHUNG, S. H.; CRAIG, D. Q. M. Optimization of stereolithography 3D printing of microneedle micro-molds for ocular drug delivery. *International Journal of Pharmaceutics*, v. 658, p. 124-195, 2024.

[7] SENEL, M.; DERVISEVIC, M.; VOELCKER, N. H. Gold microneedles fabricated by casting of gold ink used for urea sensing. *Materials Letters*, v. 243, p. 50–53, 2019.