

## **DISPOSITIVOS MICROFLUÍDICOS DO TIPO RESERVATÓRIO-EM-CHIP: IMPRESSÃO 3D E LITOGRAFIA MACIA APLICADAS AO ESTUDO DE NANOFLUIDOS PARA ÓLEO E GÁS**

Silva, T. D.<sup>1,2\*</sup>; Velasco, K.<sup>1</sup>; Cancela, B.<sup>3</sup>; Balbino, T. A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Programa de Engenharia da Nanotecnologia (PENT), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil*

<sup>2</sup>*Graduação em Nanotecnologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Campus Duque de Caxias, Rio de Janeiro, Brasil*

<sup>3</sup>*Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano (IMA), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil*

**E-mail: edfry1604@gmail.com**

**Palavras-chave:** Nanofluidos. Microfluídica. impressão 3D. Recuperação avançada de petróleo (EOR).

A nanotecnologia aplicada à indústria do petróleo tem impulsionado soluções inovadoras para desafios como a recuperação avançada de petróleo (EOR) e a garantia de escoamento [1]. Entre as estratégias promissoras destacam-se os nanofluidos, que incorporam aditivos em escala nanométrica capazes de modificar propriedades interfaciais, reduzir a tensão interfacial óleo-água e alterar a molhabilidade das rochas-reservatório. Embora apresentem desempenho superior em relação a fluidos convencionais, a avaliação de sua eficiência em condições de reservatório requer metodologias ágeis e de menor custo em comparação aos ensaios tradicionais. Ensaios de *core flooding*, por exemplo, demandam testemunhos de rochas, elevadas pressões, longos prazos e custos significativos, dificultando a aplicação em larga escala [2].

Nesse contexto, dispositivos microfluídicos do tipo reservatório-em-chip constituem como alternativa estratégica, pois mimetizam a heterogeneidade de meios porosos em escala reduzida [3]. Esses micromodelos permitem a visualização direta de fenômenos de transporte, precipitação e deslocamento de fluidos, viabilizando estudos controlados com nanofluidos em condições representativas.

A fabricação dos dispositivos neste trabalho envolveu a combinação de impressão 3D por estereolitografia e litografia macia. Inicialmente, moldes de réplica foram produzidos por impressão 3D [4]. Em seguida, empregou-se PDMS (polidimetilsiloxano) preparado na proporção 10:1 com agente de cura, submetido a degaseificação a vácuo e cura em temperatura controlada. Os dispositivos resultantes apresentaram transparência, característica essencial para análises ópticas, e foram selados por tratamento com plasma, assegurando estanqueidade em vazões de até  $0,45 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ .

As geometrias dos canais foram projetadas a partir de microtomografias de rochas carbonáticas, garantindo representatividade estrutural e permitindo a reprodução de gargantas porosas com dimensões próximas às reais. A técnica de impressão 3D empregada alcançou resolução mínima de aproximadamente 80  $\mu\text{m}$ , suficiente para representar adequadamente os constrangimentos geométricos típicos de rochas-reservatório. Essa abordagem reduz o tempo e custo de produção em comparação a métodos convencionais de microfabricação, como a fotolitografia em salas limpas.

Os ensaios preliminares tiveram como objetivo validar a funcionalidade dos dispositivos em condições de escoamento. Para isso, foram injetadas soluções salinas e realizados testes com alternância de fluidos, simulando processos relevantes de campo, como a injeção de água e  $\text{CO}_2$ . Observou-se a ocorrência de precipitação de sais e consequente bloqueio de poros ao longo das zonas de mistura, evidenciando a capacidade do micromodelo de reproduzir mecanismos críticos presentes em reservatórios. A transparência do PDMS possibilitou análises quantitativas por microscopia óptica e segmentação digital via *ImageJ*, permitindo estimar a fração de área comprometida por precipitados.

Esses resultados confirmam que os micromodelos desenvolvidos podem ser empregados para a avaliação sistemática da eficiência de nanofluidos formulados com nanopartículas funcionais. Nesses ensaios, a interação das nanopartículas com as superfícies porosas pode ser diretamente observada, favorecendo a otimização de formulações com menor custo e tempo experimental.

Em perspectiva mais ampla, a integração de impressão 3D e litografia macia representa uma abordagem versátil para a prototipagem de micromodelos inspirados em rochas, superando limitações de escalabilidade da microfabricação tradicional. Essa estratégia acelera a transição tecnológica na indústria de óleo e gás, fornecendo ferramentas inovadoras para potencializar a recuperação de petróleo e mitigar impactos ambientais.

## REFERÊNCIAS

1. Sajid M.; Ahmad W.; Ayoub M. J. *Pet. Explor. Prod. Technol.*, 15, 2025.
2. Zhou Z.; Gao R.; Wu Y. J. *Rock Mech. Geotech. Eng.*, 7, 2015.
3. Cheperli A.; Torabi F.; Sabeti M. *Processes*, 12, 2024.
4. Weisgrab G.; Ovsianikov A.; Costa P. F. *Adv. Mater. Technol.*, 4, 2019.