

NANOCOMPÓSITOS DE PDMS COM NANOPARTÍCULAS RECICLADAS APLICADOS A DISSIPADORES DE CALOR

Matheus Zingra Gobetti, matheus.z.gobetti@unesp.br¹
Raíssa Guimarães Mendonça Corrêa, rgm.correa@unesp.br¹
Edemar Morsch Filho, edemar.filho@unesp.br¹
Jeferson Diehl de Oliveira, jeferson.diehl@unesp.br¹
Elaine Maria Cardoso, elaine.cardoso@unesp.br¹

¹UNESP - Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista - SP, 13876-750

Resumo. Este trabalho apresenta uma análise numérica do desempenho termo-hidráulico de microdissipadores de calor fabricados em poli(dimetilsiloxano), operando com escoamento monofásico de água deionizada sob regime laminar. Utilizando o software ANSYS Fluent 2022 R2, investigaram-se duas configurações geométricas de micropilares — Diamond Staggered e Circular Staggered — mantendo-se constantes os parâmetros geométricos e de escoamento. As simulações consideraram a aplicação de um fluxo de calor constante na base do dissipador e permitiram comparar a influência da geometria dos micropilares sobre a queda de pressão e a temperatura da superfície. Em uma segunda etapa, avaliou-se o impacto da incorporação de nanopartículas recicladas de bateria íon-lítio na matriz polimérica, resultando em um nanocompósito com condutividade térmica significativamente aumentada. Os resultados indicaram que o uso deste nanocompósito proporciona uma expressiva redução da temperatura na base do dissipador, sem impacto significativo na queda de pressão, evidenciando o potencial do uso de materiais reciclados em sistemas de gerenciamento térmico.

Palavras-chave: Dissipador de calor compacto, micropilares, desempenho termo-hidráulico.

Abstract. This work presents a numerical analysis of the thermal-hydraulic performance of poly(dimethylsiloxane) microheatsinks operating with a single-phase flow of deionized water under a laminar regime. Using ANSYS 2022 Fluent 2022 R2 software, two geometric configurations of micropillars — Diamond Staggered and Circular Staggered — were investigated, keeping the geometric and flow parameters constant. The simulations considered the application of constant heat flux at the base of the heatsink and allowed a comparison of the influence of the geometry of the micropillars on the pressure drop and the surface temperature. The second step evaluated the impact of incorporating recycled lithium-ion battery nanoparticles in the polymer matrix, resulting in a nanocomposite with significantly increased thermal conductivity. The results indicated that using this nanocomposite significantly reduces the temperature at the heatsink's base without significantly impacting the pressure drop, evidencing the potential of using recycled materials in thermal management systems.

Keywords: Micro heat sink, micro-pin fins, thermal-hydraulic behavior.

1. INTRODUÇÃO

Trocadores de calor microestruturados — particularmente microdissipadores que incorporam matrizes de micropilares — surgiram como uma solução promissora para otimização da transferência de calor em sistemas térmicos miniaturizados, oferecendo maior área de superfície para a troca térmica e maior mistura do fluido refrigerante. À medida que a miniaturização de dispositivos continua, o desenvolvimento de microdissipadores de calor à base de polímeros que combinam capacidade de fabricação, flexibilidade mecânica e desempenho térmico tornou-se relevante tanto na pesquisa acadêmica quanto em aplicações industriais.

Na última década, investigações experimentais e numéricas têm explorado o desempenho de dissipadores de calor microestruturados com diferentes formatos, espaçamentos e arranjos de pilares. Estudos comparando arranjos alinhados com arranjos escalonados têm demonstrado consistentemente que o arranjo escalonado promove maior mistura de fluido e maior taxa de transferência de calor, embora ao custo de maior queda de pressão (Nunes et al., 2023). Pilares circulares, devido aos seus contornos suaves, tendem a apresentar menor resistência ao escoamento em comparação com geometrias como diamantes ou triângulos, porém, o formato diamante pode propiciar um coeficiente de transferência de calor local ligeiramente maior, devido a vórtices secundários (Ravanji et al., 2023).

Apesar desses avanços, ainda existem desafios para maximização da transferência de calor e redução da queda de pressão. A integração de materiais reciclados em microdissipadores de calor apresenta uma nova abordagem para essas

questões, como evidenciado pelos resultados promissores da incorporação de nanopartículas em matrizes poliméricas, o que melhorou significativamente a condutividade térmica sem afetar negativamente a queda de pressão (Luo et al. 2022).

Apesar desses avanços, pouca atenção tem sido dada a microdissipadores de calor à base de polímeros — materiais que oferecem alternativas leves, de baixo custo e flexíveis, mas apresentam condutividade térmica intrinsecamente baixa. Da mesma forma, a incorporação de nanopartículas recicladas ou bioderivadas para aumentar a condutividade de polímeros permanece praticamente inexplorada no contexto de dissipadores de calor microestruturados. Essa lacuna é especialmente significativa, considerando os imperativos da sustentabilidade — por meio da valorização de materiais residuais — e da melhoria do desempenho no gerenciamento térmico.

Neste trabalho, apresenta-se uma análise numérica de microdissipadores de calor de poli(dimetilsiloxano) (PDMS) com duas geometrias de micropilares escalonadas: diamante e circular. Utilizando o ANSYS Fluent 2022 R2, compara-se inicialmente o desempenho termo-hidráulico das configurações de PDMS puro com fluxo de calor constante. Em seguida, avalia-se o efeito da integração de nanopartículas recicladas de baterias de íons de lítio na matriz de PDMS, visando um nanocompósito termicamente aprimorado. O objetivo é quantificar como a incorporação de nanopartículas recicladas influencia a redução de temperatura e a queda de pressão do sistema, demonstrando assim a viabilidade de compósitos de material reciclado em sistemas de gerenciamento térmico em microescala.

2. METODOLOGIA

A análise térmica e hidrodinâmica do escoamento monofásico de água deionizada no dissipador de calor com micropilares foi realizada utilizando o software ANSYS Fluent 2022 R2. Os dissipadores são de poli(dimetilsiloxano) (PDMS) com dimensões 30 mm x 60 mm x 7 mm (Figura 1) e possuem na parte superior uma lâmina de vidro-borossilicato de dimensões 30 mm x 60 mm x 1 mm. Os *plenums* de entrada e saída possuem dimensões de 14 x 20 x 4 mm. Na região central, na base do dissipador de calor com área de 20 mm x 15 mm, aplica-se um fluxo de calor de 7800 W/m².

Para a abordagem numérica, construíram-se diferentes dissipadores de calor (Figura 2) — um constituído de micropilares em formato diamante e arranjo escalonado (*Diamond Staggered*) e outro, com micropilares em formato circular e arranjo escalonado (*Circular Staggered*) —, ambos com 275 micropilares com dimensões de 0,5 mm de lado, 0,5 mm de altura e espaçamento de 0,5 mm.

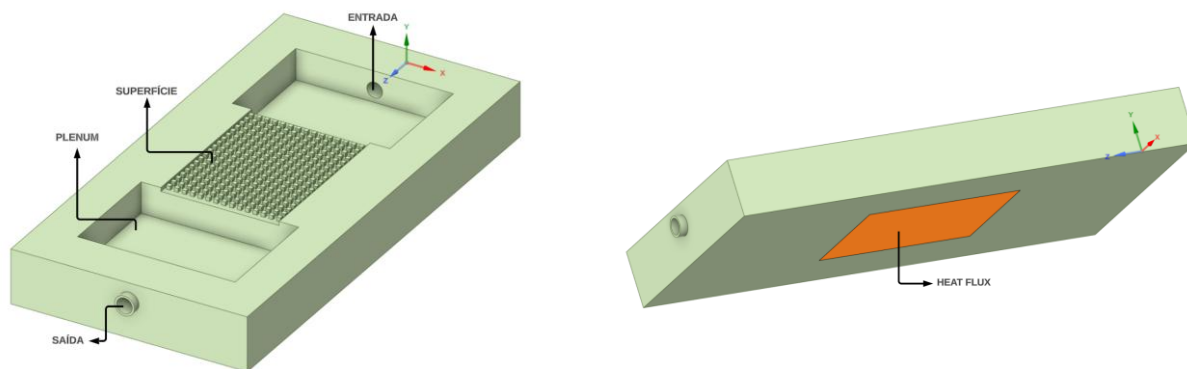


Figura 1. Partes constituintes do microdissipador de calor utilizado para as análises de convecção forçada.

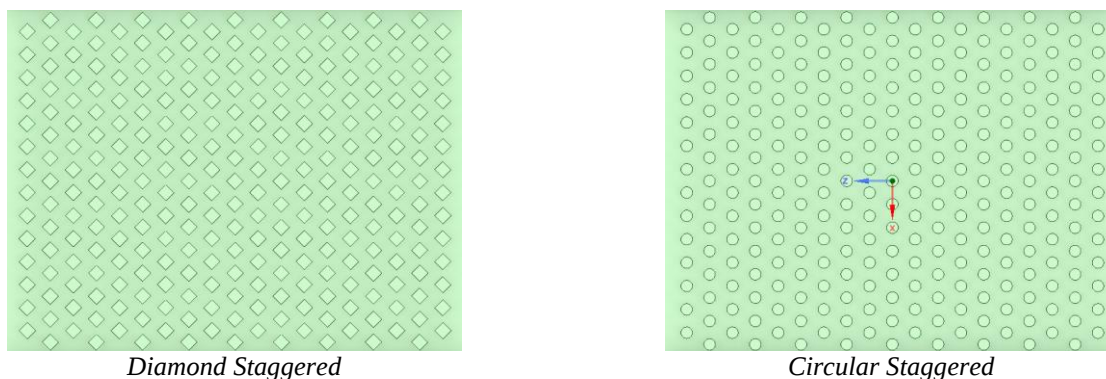


Figura 2. Diferentes geometrias de micropilares considerada no presente estudo.

O modelo numérico foi baseado nas equações de conservação de massa, momento e energia, com uma abordagem *upwind* de segunda ordem para momento, energia e pressão. O escoamento foi resolvido adotando-se o Método dos Volumes Finitos implementado no software. A pressão de referência foi a atmosférica e, considerando as características de um sistema de baixa pressão, a pressão de saída foi tomada como zero (manométrica). A vazão volumétrica (10, 15 e 20 ml/min) e a temperatura de entrada ($\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) foram as mesmas da parte experimental deste trabalho. O fluxo de calor foi aplicado na parte inferior do dissipador de calor para corresponder à região dos micropilares, conforme mostrado na Figura 1.

A convergência ocorreu para malhas com 900 mil elementos; foi adotado como critério de convergência um resíduo de 10^{-8} para a equação da conservação da energia e de 10^{-5} para as demais. As simulações utilizaram o método SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) para resolver o acoplamento pressão-velocidade e o esquema PRESTO (PREssure STaggering Option) para a interpolação de pressão. As seguintes considerações foram feitas: (i) o escoamento é laminar, incompressível e newtoniano; (ii) condição de contorno e de não escorregamento nas paredes; (iii) regime permanente; (iv) as propriedades termofísicas dos materiais e do fluido são constantes; (v) dissipação viscosa e a força gravitacional são desprezadas; (vi) todas as superfícies do dissipador de calor expostas ao ambiente são consideradas termicamente isoladas, exceto a parte inferior do dissipador de calor (região dos micropilares), onde é especificado um fluxo de calor constante.

Após esta primeira análise comparativa, a fim de melhorar a eficiência térmica do microdissipador de calor, simulou-se a adição de nanopartículas de LiCoO_2 (óxido de lítio-cobalto, em 30% em massa), oriundas de um processo de reciclagem de baterias íon-lítio, ao PDMS e analisou-se o efeito sobre a queda de pressão e transferência de calor. A Tabela 1 apresenta as informações sobre a condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico, obtidas a partir da literatura, e utilizadas na simulação numérica.

Tabela 1. Comparação das propriedades do PDMS puro com o NanoPDMS.

Propriedades	PDMS puro	LiCoO_2	NanoPDMS (30 wt%.) / modelo preditivo utilizado
Densidade [kg/m^3]	970	4790 (Cheng et al., 2017)	2280 / regra de mistura
Calor específico [J/kg.K]	1302	731,20 (Spinner et al. 2015)	1267 / regra de mistura
Condutividade térmica [W/m.K]	0,19	5,40 (Cho et al., 2014)	0,80 / Modelo Maxwell– Garnett (Nejad, 2012)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 2 têm-se os resultados obtidos para a queda de pressão (Δp) e temperatura na base do dissipador de calor (T_{parede}), considerando dissipador de PDMS puro, para as configurações *Diamond Staggered* e *Circular Staggered*.

Tabela 2. Resultados comparativos das configurações *Diamond Staggered* e *Circular Staggered*.

	10 ml/min		15 ml/min		20 ml/min	
	Diamond	Circular	Diamond	Circular	Diamond	Circular
ΔP [kPa]	0,87	0,69	1,55	1,22	2,37	1,87
T_{parede} [$^{\circ}\text{C}$]	192,4	192,6	190,2	190,5	189,6	189,8

Verifica-se que a queda de pressão segue uma tendência crescente com a vazão volumétrica (Tabela 2). A superfície com micropilares em formato diamante (*Diamond Staggered*) apresentou uma queda de pressão maior que a superfície com formato circular; em média, 27%. Resultados semelhantes foram encontrados por Ravanji et al. (2023), no qual aletas em forma de diamante estão associadas a uma maior queda de pressão e, aletas circulares, a um melhor desempenho termo-hidráulico.

Independente da geometria dos micropilares, a temperatura da base dos microdissipadores se manteve aproximadamente a mesma; isso pode ser devido ao fato de que todos os outros parâmetros (número de aletas, espaçamento, diâmetro hidráulico, número de Reynolds) são os mesmos. Segundo Hua et al. (2017), os números de Nusselt locais para aletas circulares e diamante diferem em menos de 7% sob condições de números de Reynolds

correspondentes, levando a quase o mesmo coeficiente de transferência de calor convectivo e, portanto, a distribuições de temperatura de parede comparáveis.

Quando LiCoO_2 (Óxido de Lítio-Cobalto) é incorporado à matriz de PDMS (material do microdissipador de calor) ocorre uma redução significativa na temperatura da superfície (Tabela 3). Isso se deve ao aumento significativo na condutividade térmica em comparação com a baixa condutividade térmica do PDMS puro (Tabela 1). No presente estudo, esta análise foi realizada somente para a geometria *Circular Staggered*, por esta ter apresentado melhor desempenho termo-hidráulico.

Tabela 3. Resultados comparativos do PDMS puro e NanoPDMS, para a geometria *Circular Staggered*.

	10 ml/min		15 ml/min		20 ml/min	
	Puro	Nano	Puro	Nano	Puro	Nano
ΔP [kPa]	0,69	0,69	1,22	1,22	1,87	1,87
T_{parede} [°C]	192,6	65,3	190,5	63,5	189,8	62,8

Considerando que todos os parâmetros geométricos e de escoamento permanecerem inalterados, espera-se que a queda de pressão permaneça praticamente a mesma, com apenas pequenas mudanças potencialmente insignificantes decorrentes de características de superfície (rugosidade) ou acoplamento termo-hidráulico; a queda de pressão é em grande parte uma função do número de Reynolds, do arranjo das aletas e da viscosidade do fluido, não da condutividade térmica do substrato.

A Figura 3 apresenta a distribuição de temperatura da superfície do dissipador de calor, obtidos por meio da simulação, ilustrando o desempenho térmico e com foco particular no impacto da incorporação de LiCoO_2 (Óxido de Lítio-Cobalto) na matriz de PDMS.

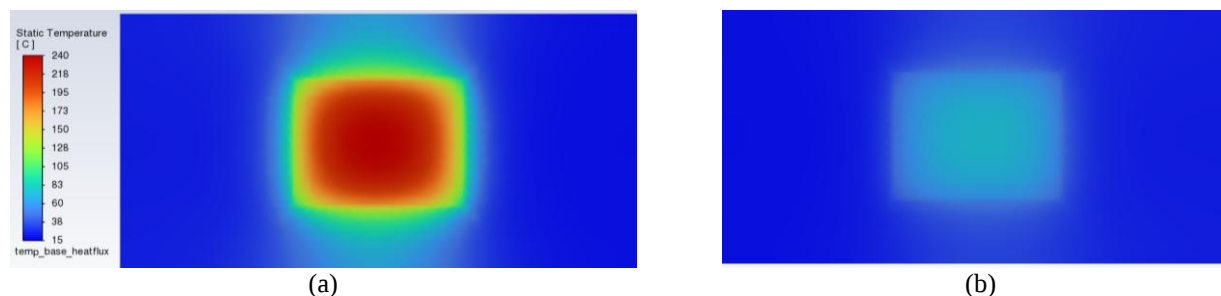


Figura 3. Distribuição de temperatura na base do dissipador de calor com geometria *Circular Staggered* para (a) PDMS puro e (b) NanoPDMS.

Os resultados revelam que a adição de nanopartícula recicladas aumenta significativamente a capacidade de dissipação de calor do microdissipador de calor, resultando em uma distribuição de temperatura superficial mais uniforme. Em comparação com o caso base (PDMS puro), a matriz nanocompósita modificada apresenta temperaturas superficiais máximas menores.

4. CONCLUSÕES

A análise numérica do escoamento monofásico de água deionizada em microdissipadores de calor com micropilares demonstrou que a geometria dos pilares exerce influência significativa sobre a queda de pressão. A configuração *Diamond Staggered* apresentou, em média, uma queda de pressão 27% superior à da configuração *Circular Staggered*, para as mesmas condições de contorno e parâmetros geométricos, o que está de acordo com resultados da literatura. No entanto, ambas as geometrias resultaram em temperaturas da base do dissipador muito semelhantes, o que pode ser atribuído ao fato de os parâmetros hidráulicos e térmicos — como número de Reynolds, espaçamento entre aletas e área de troca térmica — serem equivalentes.

A incorporação de nanopartículas recicladas de LiCoO_2 à matriz de PDMS revelou-se extremamente eficaz para a melhoria do desempenho térmico do microdissipador. Para a configuração *Circular Staggered*, a utilização do NanoPDMS resultou em uma redução significativa da temperatura da superfície do dissipador — independentemente da vazão volumétrica, a temperatura foi aproximadamente 3x menor — sem impacto relevante na queda de pressão. Essa melhoria está diretamente relacionada ao aumento na condutividade térmica da matriz polimérica, que passou de 0,19

W/m.K (PDMS puro) para 0,80 W/m.K (NanoPDMS). Dessa forma, o uso de compósitos com nanopartículas recicladas apresenta-se como uma estratégia promissora e sustentável para o desenvolvimento de sistemas de dissipação térmica mais eficientes.

5. AGRADECIMENTOS

E.M. Cardoso agradece pelo apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Proc. nº 309848/2020-2 e 305040/2023-5) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Proc. nº 2013/15431-7, 2019/02566-8, 2022/03946-1 e 2022/15765-1). R.G.M. Corrêa agradece ao apoio da FAPESP (Proc. nº. 2023/03492-3 e 2023/14537-8). J.D. de Oliveira agradece à FAPESP (Proc. nº 2024/17893-2). M.Z. Gobetti agradece à UNESP e ao CNPq (Proc. 174515/2024-3).

6. REFERÊNCIAS

- Cheng, E. J., Taylor, N. J., Wolfenstine, J., & Sakamoto, J. (2017). Elastic properties of lithium cobalt oxide (LiCoO₂). *Journal of Asian Ceramic Societies*, 5(2), 113-117.
- Cho, J., Losego, M. D., Zhang, H. G., Kim, H., Zuo, J., Petrov, I., ... Braun, P. V. (2014). Electrochemically tunable thermal conductivity of lithium cobalt oxide. *Nature Communications*, 5(1), 1-6.
- Jafari Nejad, S. J. (2012). A review on modeling of the thermal conductivity of polymeric nanocomposites. *e-Polymers*, 12(1), 025.
- Luo, W. J., Vishwakarma, P., Hsieh, C. C., Panigrahi, B. (2022). Microfluidic modular heat sink with improved material characteristics towards thermal management of flexible electronics. *Applied Thermal Engineering*, 216, 119142.
- Nunes, J. M., de Oliveira, J. D., Copetti, J. B., Gajghate, S. S., Banerjee, U., Mitra, S. K., Cardoso, E. M. (2023). Thermal performance analysis of micro pin fin heat sinks under different flow conditions. *Energies*, 16(7), 3175.
- Ravanji, A., Lee, A., Mohammadpour, J., Cheng, S. (2023). Critical review on thermohydraulic performance enhancement in channel flows: A comparative study of pin fins. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, 113793.
- Sakanova, A., Tseng, K. J. (2017). Comparison of pin-fin and finned shape heat sink for power electronics in future aircraft. *Applied Thermal Engineering*, 136, 364-374.
- Spinner, N. S., Mazurick, R., Brandon, A., Rose-Pehrsson, S. L., Tuttle, S. G. (2015). Analytical, numerical and experimental determination of thermophysical properties of commercial 18650 LiCoO₂ lithium-ion battery. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(14), A2789.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.