

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá – Câmpus de Guaratinguetá (SP)

CLAYSSON CAMPOS SOARES

CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TROCADOR DE CALOR FEITO EM PDMS COM ADIÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE RESÍDUOS DA BATERIA

Guaratinguetá (SP)

2026

Claysson Campos Soares

**CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TROCADOR DE CALOR
FEITO EM PDMS COM ADIÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE RESÍDUOS DA
BATERIA**

Dissertação de mestrado, apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Guaratinguetá (SP), para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Edegar Morsch Filho

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Elaine Maria Cardoso

Guaratinguetá (SP)

2026

S676c	Soares, Claysson Campos Caracterização e análise experimental de trocador de calor feito em PDMS com adição de nanopartículas de resíduos da bateria / Claysson Campos Soares. - Guaratinguetá, 2026. 214 f : il. Bibliografia: f. 197-212 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2026. Orientador: Prof. Dr. Edemar Morsch Filho Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Elaine Maria Cardoso 1. Compósitos nanoestruturados. 2. Trocadores de calor. 3. Baterias de lítio. I. Título. CDU 620.1(043)
-------	---

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A realização desse estudo busca contribuir para o avanço científico e tecnológico nas áreas de reciclagem de resíduos eletroeletrônicos e no aperfeiçoamento de materiais compósitos. O desenvolvimento de compósitos poliméricos funcionais com a incorporação de compostos obtidos de processos de reciclagem de baterias de íons de lítio no final da vida útil apresenta uma proposta inovadora de reinserção dos recursos estratégicos em novas tecnologias, o que favorece as práticas da economia circular e do desenvolvimento sustentável. Sendo assim, o estudo fortalece a integração entre a pesquisa científica, a inovação tecnológica e a sustentabilidade.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This study aims to contribute to scientific and technological advancements in the areas of electronic waste recycling and the improvement of composite materials. The development of functional polymer composites incorporating compounds obtained from end-of-life lithium-ion battery recycling processes presents an innovative proposal for reintegrating strategic resources into new technologies, thus favoring circular economy practices and sustainable development. Therefore, the study strengthens the integration between scientific research, technological innovation, and sustainability.

CLAYSSON CAMPOS SOARES

**Caracterização e análise experimental de trocador de calor feito em pdms com
adição de nanopartículas de resíduos da bateria**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Data da defesa: 10/07/2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. EDEMAR MORSCH FILHO

Orientador - UNESP

Prof. Dr. DANIEL SAMPAIO SOUZA

UNESP

Profa. Dra. JESSICA MARTHA NUNES

IFSP – Hortolândia

Dedico este trabalho aos meus pais, avós e professores.

AGRADECIMENTOS

Para mim, tão difícil quanto desenvolver esta pesquisa, a qual apresentou diversos obstáculos ao longo deste curso de Mestrado, é recordar todos os que contribuíram beneficemente para o meu crescimento e para o alcance de onde cheguei.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Clayton e Celene, pelo apoio incondicional na minha jornada, pelo afeto distribuído e por sempre estarem dispostos a oferecer o melhor para mim. Ao meu irmão, Silas, pelo companheirismo. E aos meus avós, Anízio, Ionice (*in memoriam* – *minha estrelinha de olhos verdes*), Aparecido (*in memoriam*) e Maria Lúcia, por toda a ajuda.

Sou profundamente grato aos professores da graduação – Dr.^a Jéssica, Dr. Marcelo, Dr. Igor e Me. Vitor – que possibilitaram que esse sonho se concretizasse.

Neste curso de Mestrado, estive rodeado de profissionais altamente competentes, sempre presentes e dispostos a sanar as minhas mais simples dúvidas e questionamentos, contribuindo fortemente para que esta pesquisa se desenvolvesse da maneira mais exitosa possível. Sou grato ao meu orientador, Prof. Dr. Edemar, e à minha coorientadora, Prof.^a Dr.^a Elaine, pela confiança, compreensão em momentos difíceis e por nunca medirem esforços para a realização da pesquisa.

Sou grato aos meus colegas de laboratório: o futuro pós-doutor, Dr. Jeferson, o futuro doutor, Me. Arthur., e à futura doutora, Me. Ariany, pelo apoio no dia a dia no laboratório.

Agradeço às instituições parceiras que contribuíram para o desenvolvimento dos materiais e das caracterizações desta pesquisa, em especial ao CAST-FESJ, ao LNNano-CNPq (PPMS[®], proposta 20251118; e FEI Inspect F50, proposta 20253943), aos laboratórios da UNESP-FEIS e da UNESP-FESJ, ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Lisboa e, não menos importante, ao NEST-n – laboratório possuidor de grande parte dos instrumentos e equipamentos essenciais aos experimentos –, bem como da estrutura do Hangar Tecnológico da UNESP-FESJ. A estes, também sou grato pela disposição dos funcionários e colaboradores.

Sou igualmente grato à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (processo 2024/00620-3) e à Royal Society (ICAO\R1\241065) ISPF – *International Collaboration Awards 2024 (Brazil and South Africa)*, pelos recursos financeiros disponibilizados para a realização da pesquisa e para a aquisição de equipamentos laboratoriais.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – código de financiamento 001 – pelo apoio institucional e financeiro para a concretização da pesquisa. Sou igualmente grato pelo apoio do Programa de Pós-graduação em Engenharia da UNESP-FEG.

A estes e àqueles, sou profundamente grato.

“Quem come do fruto do conhecimento é sempre expulso de algum paraíso”.
Melanie Klein (1882 – 1960), renomada psicanalista austríaca.

RESUMO

O expressivo consumismo observado na sociedade atual torna preocupante a questão do gerenciamento dos resíduos gerados, especialmente dos provenientes de equipamentos elétricos e eletrônicos, que possuem compostos tóxicos ao meio ambiente e, conseqüentemente, podem afetar a saúde dos seres vivos. Dentro dessa perspectiva, há um interesse crescente pelo desenvolvimento de novos produtos considerando o modelo de economia circular. Nessa concepção, os resíduos obtidos no término do ciclo de vida de um produto são reintroduzidos como matéria-prima para a obtenção de um novo produto. Esta pesquisa insere-se nesse contexto ao reciclar baterias em fim de vida útil para obter partículas contendo elementos metálicos de sua composição e fabricar um novo material compósito de matriz polimérica. Mais precisamente, neste estudo é abordada a incorporação de nanopartículas obtidas de um processo hidrometalúrgico de reciclagem de baterias de íons de lítio no polidimetilsiloxano (PDMS), em diferentes proporções de concentração (0%, 5%, 10% e 15%), o que representa uma alternativa ambientalmente sustentável para o descarte incorreto e apresenta viés para a aplicação desses compósitos em microssistemas de gerenciamento térmico. Para realizar as análises, a pesquisa foi dividida em duas partes principais, sendo uma delas destinada à caracterização dos materiais, enquanto a segunda parte focou em experimentos termohidrodinâmicos com microtrocares de calor fabricados com esses compósitos. As análises microscópicas e espectroscópicas dos compósitos desenvolvidos evidenciaram a presença de materiais metálicos, como o cobalto, além de fenômenos de agregação e aglomeração das partículas. Essa característica contribuiu para a formação de um cenário mecânico distinto nos compósitos, marcado pelo aumento da rigidez e pela redução da resistência e da elasticidade, proporcional ao teor de preenchimento acrescentado. As propriedades térmicas também foram alteradas com a incorporação das partículas, estabelecendo uma redução do calor específico à pressão constante e o aumento da condutividade térmica, este último alcançando um aumento de 67,12% na comparação entre o PDMS – 0 (0%) e o PDMS – 15 (15%). Para os testes experimentais com os microtrocares de calor em bancada, dois arranjos de micropilares foram considerados: alinhado e escalonado. Nesses testes, a temperatura e a queda de pressão foram avaliadas considerando diferentes vazões do fluido de trabalho (água deionizada de alta pureza), potências de aquecimento e concentrações de partículas da reciclagem de bateria no material polimérico. Os resultados evidenciaram a preferência do compósito com 15% de nanopartículas metálicas para aplicações em gerenciamento térmico, o que se revelou por meio de menores temperaturas e maiores índices do coeficiente de transferência de calor por convecção. Ainda, como esperado, o aumento da queda de pressão foi proporcional ao aumento da vazão volumétrica do escoamento. Ambos os resultados foram significativamente afetados pela qualidade superficial dos micropilares dos arranjos desenvolvidos, devido à precisão geométrica dos moldes de fabricação. Os micropilares do arranjo alinhado estiveram melhor definidos geometricamente sobre a superfície, o que contribuiu para melhores resultados de

transferência de calor e maior queda de pressão em comparação com o arranjo escalonado, no qual os micropilares apresentaram defeitos estruturais visíveis.

Palavras-Chave: nanocompósitos; reciclagem de baterias de íons de lítio; polidimetilsiloxano (PDMS); gerenciamento térmico; e microtrocares de calor.

ABSTRACT

The significant consumerism observed in contemporary society raises concerns regarding the management of generated waste, particularly that originating from electrical and electronic equipment, which contains toxic compounds harmful to the environment and, consequently, may affect the health of living beings. From this perspective, there is a growing interest in the development of new products based on the circular economy model. Under this concept, waste obtained at the end of a product's life cycle is reintroduced as raw material for the production of a new product. This research is situated within this context by recycling end-of-life batteries to obtain particles containing metallic elements from their composition and to manufacture a new polymer-matrix composite material. More specifically, this study addresses the incorporation of nanoparticles obtained from a hydrometallurgical recycling process of lithium-ion batteries into polydimethylsiloxane (PDMS) at different concentration levels (0%, 5%, 10%, and 15%), representing an environmentally sustainable alternative to improper disposal and indicating potential applications of these composites in thermal management microsystems. To conduct the analyses, the research was divided into two main parts: one focused on materials characterization, and the other on thermohydrodynamic experiments using micro heat exchangers fabricated from these composites. Microscopic and spectroscopic analyses of the developed composites revealed the presence of metallic materials, such as cobalt, as well as particle aggregation and agglomeration phenomena. These characteristics contributed to the formation of a distinct mechanical behavior in the composites, characterized by increased stiffness and reduced strength and elasticity, proportional to the added filler content. Thermal properties were also modified by the incorporation, resulting in a reduction in the specific heat capacity at constant pressure and an increase in thermal conductivity, the latter reaching a 67.12% increase when comparing PDMS – 0 (0%) and PDMS – 15 (15%). For the experimental bench tests with the micro heat exchangers, two micropillar arrangements were considered: in-line and staggered. In these tests, temperature and pressure drop were evaluated under different working fluid flow rates (high-purity deionized water), heating powers, and concentrations of battery-recycling particles in the polymeric material. The results demonstrated a preference for the composite containing 15% metallic nanoparticles for thermal management applications, as evidenced by lower temperatures and higher convective heat transfer coefficients. Additionally, as expected, the increase in pressure drop was proportional to the increase in volumetric flow rate. Both results were significantly affected by the surface quality of the micropillars in the developed arrangements, due to the geometric precision of the fabrication molds. The micropillars in the in-line arrangement were better geometrically defined on the surface, contributing to improved heat transfer performance and higher pressure drop compared to the staggered arrangement, in which the micropillars exhibited visible structural defects.

Keywords: nanocomposites; lithium-ion battery recycling; polydimethylsiloxane (PDMS); thermal management; and micro heat exchangers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Produção global de resíduos WEEE entre 2011 e 2020	30
Figura 2 –	Resíduos do tipo WEEE descartados incorretamente	31
Figura 3 –	Etiqueta para manuseio de baterias exigida na União Europeia	31
Figura 4 –	Estrutura molecular do PDMS	33
Figura 5 –	Esquema de microtrocador de calor em PDMS com micropilares cilíndricos	34
Figura 6 –	Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da incorporação dos resíduos de baterias alcalinas e de zinco-carbono na resina vinílica-acrílica	37
Figura 7 –	Principais tipos de baterias de íons de lítio e seus óxidos precursores . .	38
Figura 8 –	Fluxograma simplificado do processo pirometalúrgico	40
Figura 9 –	Fluxograma simplificado do processo hidrometalúrgico	42
Figura 10 –	Percurso comum do reaproveitamento de baterias de íons de lítio	43
Figura 11 –	Componentes e composição comum das baterias de íons de lítio	44
Figura 12 –	Processo inovador de dissolução do lítio e recuperação do cobre e grafite	45
Figura 13 –	Diferentes formatos geométricos das nanopartículas	48
Figura 14 –	Etapas do desenvolvimento de supercapacitores a partir de baterias de íons de lítio	48
Figura 15 –	Classificação da molhabilidade de superfícies baseada no ângulo de contato	53
Figura 16 –	Tensões superficiais na gota sobre a superfície de acordo com o Modelo de Young	53
Figura 17 –	Penetrabilidade da gota na superfície rugosa de acordo com os Modelos de Wenzel e de Cassie-Baxter	54
Figura 18 –	Representação do domínio amorfo e cristalino em uma matriz polimérica	55
Figura 19 –	Rota de transferência de calor em compósitos poliméricos	56
Figura 20 –	Carregamento em cadeias poliméricas	57
Figura 21 –	Propriedades mecânicas obtidas para os compósitos de PDMS/Ag@L-Mt	58
Figura 22 –	Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da incorporação de magnetita no PDMS	59
Figura 23 –	Sistema experimental para caracterização térmica sob compressão dos compósitos	60
Figura 24 –	Condutividade térmica dos compósitos de PDMS/nanoplaquetas de grafeno	61
Figura 25 –	Condutividade térmica dos compósitos CF/PDMS e OCF/PDMS	62
Figura 26 –	Modificação superficial e desenvolvimento dos compósitos h-BN@(Ag/Cu)	63
Figura 27 –	Comparação da condutividade térmica entre h-BN, h-BN@Cu, h-BN@Ag e h-BN@(Ag/Cu)	64
Figura 28 –	Propriedades térmicas: condutividade e calor específico – PDMS/Al ₂ O ₃	64

Figura 29 – Propriedade mecânica: módulo de elasticidade – PDMS/ Al_2O_3	65
Figura 30 – Condutividade térmica obtida para os diferentes tipos de preenchimento	66
Figura 31 – Representação da classificação dos canais pelo diâmetro hidráulico ($d_{h,c}$) em diferentes estudos	68
Figura 32 – O desenvolvimento das aletas quadradas a partir de uma superfície com canais	68
Figura 33 – Diferentes seções transversais das microaletas em trocadores de calor	69
Figura 34 – Microaletas de cobre em dissipadores de calor	69
Figura 35 – Representação dos trocadores de calor com microcanal reto e divergente	70
Figura 36 – Dissipadores térmicos e seus campos de temperatura na superfície superior	71
Figura 37 – Diferentes formatos de seção transversal dos microcanais – PDMS/grafeno (5%)	71
Figura 38 – Comparação da temperatura superficial máxima para os diferentes formatos de seção transversal dos microcanais – PDMS/grafeno (5%)	72
Figura 39 – Dissipador de calor flexível desenvolvido com microcanais dúcteis de prata	73
Figura 40 – Método de fabricação de microcanais de PDMS por litografia	73
Figura 41 – Seção transversal dos microcanais de PDMS em diferentes técnicas de fabricação	74
Figura 42 – Imagem microscópica dos micropilares – PDMS + 20% h-BN	74
Figura 43 – Aparato experimental dos testes termohidrodinâmicos para microtrocadores de calor	75
Figura 44 – Resultados termohidrodinâmicos	76
Figura 45 – Trocadores de calor em formato de serpentina desenvolvidos	76
Figura 46 – Resultados termohidrodinâmicos das serpentinas	77
Figura 47 – Arranjos de micropilares cilíndricos avaliados	77
Figura 48 – Queda de pressão para os diferentes arranjos de micropilares cilíndricos	78
Figura 49 – Manuseio do polímero e fabricação dos microtrocadores de calor	78
Figura 50 – Bancada e seção de testes	79
Figura 51 – Resultados térmicos obtidos – 6 W	79
Figura 52 – Resultados térmicos obtidos – 8 W	80
Figura 53 – Distribuição da velocidade para o arranjo com micropilar único	80
Figura 54 – Distribuição da velocidade para o arranjo de dois micropilares dispostos horizontalmente	81
Figura 55 – Distribuição da velocidade para o arranjo de dois micropilares dispostos verticalmente	81
Figura 56 – Etapas iniciais de obtenção das nanopartículas	85
Figura 57 – Etapas de purificação da mistura	86
Figura 58 – Etapas finais da obtenção das nanopartículas	87
Figura 59 – Etapas iniciais da fabricação das amostras	89

Figura 60 – Homogeneização com agitador mecânico	89
Figura 61 – Processo de retirada de bolhas de ar do composto formado	90
Figura 62 – Preparação das amostras nos moldes	90
Figura 63 – Etapas finais da fabricação das amostras	91
Figura 64 – Recipiente desenvolvido para medição da densidade das nanopartículas	93
Figura 65 – PPMS® – DynaCool™	94
Figura 66 – Elementos do sistema PPMS para leitura da capacidade térmica	95
Figura 67 – Processo de limpeza do porta-amostras	95
Figura 68 – Deposição da graxa do tipo H no porta-amostras	96
Figura 69 – Introdução do porta-amostras no equipamento	96
Figura 70 – Posicionamento da amostra no porta-amostras	97
Figura 71 – Exemplares das amostras para caracterização da condutividade térmica	99
Figura 72 – Representação do sistema desenvolvido para medição da condutividade térmica	99
Figura 73 – Sistema de medição da condutividade térmica	100
Figura 74 – Sistema de medição da condutividade térmica finalizado	101
Figura 75 – Representação geral do experimento de medição térmica	102
Figura 76 – Amostras para a medição laboratorial da condutividade térmica	104
Figura 77 – Medição laboratorial da condutividade térmica	105
Figura 78 – Especificações geométricas do corpo de prova do Tipo 4 da norma ASTM D638-14	107
Figura 79 – Moldes para fabricação dos corpos de prova do Tipo 4 da norma ASTM D638-14	108
Figura 80 – Corpos de prova de compósitos de PDMS com diferentes percentuais de nanopartículas, seguindo o Tipo 4 da norma ASTM D638-14	108
Figura 81 – Ensaios de tração durante a operação	109
Figura 82 – Curvas tensão-deformação típicas em polímeros	111
Figura 83 – Moldes para confecção dos microtrocares de calor	112
Figura 84 – Dimensões e geometria comuns nos microtrocares de calor	112
Figura 85 – Representação superior dos arranjos de micropilares	113
Figura 86 – Diferentes microtrocares de calor fabricados para cada concentração	114
Figura 87 – Representação esquemática do aparato experimental de medição do ângulo de contato das superfícies microaletadas	115
Figura 88 – Fixação da placa superior de acrílico	116
Figura 89 – Representação completa da bancada de testes e seus equipamentos . . .	117
Figura 90 – Suporte do microtrocador de calor	118
Figura 91 – Posicionamento real dos termopares de monitoramento térmico	118
Figura 92 – Representação detalhada dos elementos da bancada de testes	119
Figura 93 – Vista explodida detalhada do suporte do microtrocador de calor	120

Figura 94 – Visualização completa da bancada de testes	120
Figura 95 – Resistor elétrico utilizado	121
Figura 96 – Equipamentos do sistema de alimentação e controle	121
Figura 97 – Sistema de aquisição de dados – Keysight – DAQ970A	122
Figura 98 – Transdutor de pressão – WNK – WNK80MA	125
Figura 99 – Alguns dos equipamentos utilizados no sistema hidrodinâmico	127
Figura 100 – Representação geométrica dos micropilares dispostos em um microtro- cador de calor	130
Figura 101 – Representação geométrica da medição das temperaturas nos micropilares	132
Figura 102 – Esquema da instrumentação para medição da queda de pressão	135
Figura 103 – Representação da queda de pressão relativa à tubulação em função da vazão volumétrica	136
Figura 104 – Preparo e inserção das amostras no equipamento de microscopia eletrônica	138
Figura 105 – Micrografia obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das partículas	139
Figura 106 – Percentual em massa dos elementos químicos encontrados nos compósitos	143
Figura 107 – Ângulo de contato para as amostras do arranjo alinhado	154
Figura 108 – Ângulo de contato para as amostras do arranjo escalonado	154
Figura 109 – Comparação dos ângulos de contato das superfícies microaletadas	155
Figura 110 – Calor específico à pressão constante das amostras em função da tempe- ratura para cada medição	157
Figura 111 – Média do calor específico à pressão constante das medições em função da temperatura	158
Figura 112 – Condutividade térmica experimental das medições	161
Figura 113 – Curvas σ - ε dos corpos de prova fabricados com os compósitos	163
Figura 114 – Propriedades mecânicas médias dos corpos de prova fabricados em compósitos	164
Figura 115 – Comparação da temperatura na interface (T_r) para o fluxo térmico de 6,67 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos	166
Figura 116 – Comparação da temperatura na interface (T_r) para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica	167
Figura 117 – Comparação da temperatura na interface (T_r) para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes com- pósitos desenvolvidos	168
Figura 118 – Comparação da temperatura na interface (T_r) para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica	169

Figura 119 – Comparação da temperatura na interface (T_r) para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos	170
Figura 120 – Comparação da temperatura na interface (T_r) para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica	171
Figura 121 – Comparação da temperatura na base dos micropilares (T_{mp}) para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos	172
Figura 122 – Comparação da temperatura na base dos micropilares (T_{mp}) para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica	173
Figura 123 – Comparação da temperatura na base dos micropilares (T_{mp}) para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos	174
Figura 124 – Comparação da temperatura na base dos micropilares (T_{mp}) para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica	175
Figura 125 – Comparação da temperatura na base dos micropilares (T_{mp}) para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos	176
Figura 126 – Comparação da temperatura na base dos micropilares (T_{mp}) para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica	177
Figura 127 – Comparação do coeficiente de transferência de calor por convecção nos microtrocares de calor (h) para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos	180
Figura 128 – Comparação do coeficiente de transferência de calor por convecção nos microtrocares de calor (h) para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica	180
Figura 129 – Comparação do coeficiente de transferência de calor por convecção nos microtrocares de calor (h) para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos	181
Figura 130 – Comparação do coeficiente de transferência de calor por convecção nos microtrocares de calor (h) para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica	182
Figura 131 – Comparação do coeficiente de transferência de calor por convecção nos microtrocares de calor (h) para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos	183
Figura 132 – Comparação do coeficiente de transferência de calor por convecção nos microtrocares de calor (h) para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica	183

Figura 133 – Comparação da queda de pressão nos microtrocaadores de calor (Δp_{mt}) para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos	186
Figura 134 – Comparação da queda de pressão nos microtrocaadores de calor (Δp_{mt}) para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica	186
Figura 135 – Comparação da queda de pressão nos microtrocaadores de calor (Δp_{mt}) para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos	187
Figura 136 – Comparação da queda de pressão nos microtrocaadores de calor (Δp_{mt}) para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica	188
Figura 137 – Comparação da queda de pressão nos microtrocaadores de calor (Δp_{mt}) para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos	189
Figura 138 – Comparação da queda de pressão nos microtrocaadores de calor (Δp_{mt}) para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica	189
Figura 139 – Comparação da queda de pressão nos microtrocaadores de calor (Δp_{mt}) entre os diferentes fluxos térmicos para o arranjo alinhado dos microtrocaadores de calor em função da vazão volumétrica	191
Figura 140 – Comparação da queda de pressão nos microtrocaadores de calor (Δp_{mt}) entre os diferentes fluxos térmicos para o arranjo escalonado dos microtrocaadores de calor em função da vazão volumétrica	192

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades complementares do PDMS Sylgard™ 184 reportadas na literatura	51
Tabela 2 – Propriedades físico-químicas do PDMS Sylgard™ 184 – Dow Corning®	52
Tabela 3 – Composição das células de íons de lítio da bateria JK50 – Ningde Amperex Technology Limited	84
Tabela 4 – Caracterização das amostras	88
Tabela 5 – Nomenclatura dos microtrocaadores de calor em função do arranjo e da incorporação nanoparticulada	114
Tabela 6 – Coeficiente de determinação e incerteza de previsão dos termopares	124
Tabela 7 – Coeficiente de determinação e incerteza de previsão dos transdutores de pressão	126
Tabela 8 – Incerteza propagada da queda de pressão	126
Tabela 9 – Parâmetros para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção (h)	131
Tabela 10 – Composição química das partículas obtidas	140
Tabela 11 – Resultados da caracterização por técnicas de microscopia e espectroscopia	141
Tabela 12 – Resultados individuais de composição química – EDS	142
Tabela 13 – Imagens das superfícies microaletadas pela análise ETD: PDMS – 0	145
Tabela 14 – Imagens das superfícies microaletadas pela análise ETD: PDMS – 5	146
Tabela 15 – Imagens das superfícies microaletadas pela análise ETD: PDMS – 10	147
Tabela 16 – Imagens das superfícies microaletadas pela análise ETD: PDMS – 15	148
Tabela 17 – Imagens das superfícies microaletadas pela análise vCD: PDMS – 0	150
Tabela 18 – Imagens das superfícies microaletadas pela análise vCD: PDMS – 5	151
Tabela 19 – Imagens das superfícies microaletadas pela análise vCD: PDMS – 10	152
Tabela 20 – Imagens das superfícies microaletadas pela análise vCD: PDMS – 15	152
Tabela 21 – Calor específico à pressão constante médio dos compósitos de PDMS	158
Tabela 22 – Resultados das medições da condutividade térmica (k) para as amostras de PDMS	159
Tabela 23 – Incertezas obtidas para as amostras analisadas	160
Tabela 24 – Condutividade térmica média dos compósitos de PDMS	160
Tabela 25 – Comparação dos resultados de condutividade térmica com os métodos empregados	160

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila butadieno estireno (<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>)
Ag@L-Mt	Nanopartículas de prata (Ag) dispersas em montmorilonita modificada com lecitina
APTES	3-Aminopropiltrietoxissilano
BN	Nitreto de boro (<i>Boron Nitride</i>)
CB	Negro de fumo (<i>Carbon Black</i>)
CF	Fibra de carbono (<i>Carbon Fiber</i>)
CNT	Nanotubo de carbono (<i>Carbon Nanotube</i>)
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CuD	Cobre dendrítico em pó (<45 μm) (<i>Dendritic Copper</i>)
CuS	Cobre esferoidal em pó (10–25 μm) (<i>Spheroidal Copper</i>)
D2EHPA	Ácido di(2-etilhexil)fosfórico (<i>Di(2-ethylhexyl)phosphoric Acid</i>)
DES	Solvente eutético profundo (<i>Deep Eutectic Solvent</i>)
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva de Raios X (<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>)
EDTA	Ácido etilenodiaminotetraacético (<i>Ethylenediaminetetraacetic Acid</i>)
EGaIn	Liga de gálio-índio eutético (<i>Eutectic Gallium-Indium</i>)
EPE	Polietileno expandido (<i>Expanded Polyethylene</i>)
EPS	Poliestireno expandido (<i>Expanded Polystyrene</i>)
ETD	Detector de Elétrons Secundários (<i>Everhart-Thornley Detector</i>)
GF	Espuma de grafeno (<i>Graphene Foam</i>)
GnP	Nanopartícula de grafeno (<i>Graphene nanoparticle</i>)
GO	Óxido de grafeno (<i>Graphene Oxide</i>)
GS	Folha de grafeno (<i>Graphene Sheet</i>)

h-BN	Hexagonal de nitreto de boro (<i>Hexagonal - Boron Nitride</i>)
LCO	Bateria de íons de lítio composta por óxido de lítio-cobalto (LiCoO ₂)
LFP	Bateria de íons de lítio composta por fosfato de ferro-lítio (LiFePO ₄)
LIB	Bateria de íons de lítio (<i>Lithium-ion Battery</i>)
LMO	Bateria de íons de lítio composta por óxido de lítio-manganês (LiMn ₂ O ₄)
LNCM	Óxido de lítio-níquel-cobalto-manganês
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NCA	Bateria de íons de lítio composta por óxido de lítio-níquel-cobalto-alumínio (LiNiCoAlO ₂)
NiL	Níquel em pó (<45 μm)
NiP	Níquel em pó (3–7 μm)
NMC	Bateria de íons de lítio composta por óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto (LiNiMnCoO ₂)
NPC@Co	Compósito nanoporoso de carbono/cobalto (<i>Nanoporous carbon/cobalt</i>)
OCF	Fibra de carbono orientada (<i>Oriented Carbon Fiber</i>)
PDMS	Polidimetilsiloxano (<i>Polydimethylsiloxane</i>)
PDMS – 0	Compósito homogêneo de PDMS com 0% de concentração de nanopartículas (PDMS puro)
PDMS – 0A	Microtrocador de calor do compósito PDMS – 0 e arranjo alinhado de micropilares
PDMS – 0E	Microtrocador de calor do compósito PDMS – 0 e arranjo escalonado de micropilares
PDMS – 5	Compósito homogêneo de PDMS com 5% de concentração de nanopartículas
PDMS – 5A	Microtrocador de calor do compósito PDMS – 5 e arranjo alinhado de micropilares
PDMS – 5E	Microtrocador de calor do compósito PDMS – 5 e arranjo escalonado de micropilares
PDMS – 10	Compósito homogêneo de PDMS com 10% de concentração de nanopartículas

PDMS – 10A	Microtrocador de calor do compósito PDMS – 10 e arranjo alinhado de micropilares
PDMS – 10E	Microtrocador de calor do compósito PDMS – 10 e arranjo escalonado de micropilares
PDMS – 15	Compósito homogêneo de PDMS com 15% de concentração de nanopartículas
PDMS – 15A	Microtrocador de calor do compósito PDMS – 15 e arranjo alinhado de micropilares
PDMS – 15E	Microtrocador de calor do compósito PDMS – 15 e arranjo escalonado de micropilares
PE	Polietileno (<i>Polyethylene</i>)
PIV	Velocimetria de imagem de partícula (<i>Particle Image Velocimetry</i>)
PLA	Ácido polilático (<i>Polylactic Acid</i>)
PP	Polipropileno (<i>Polypropylene</i>)
PPMA	Polimetilmetacrilato (<i>Polymethyl Methacrylate</i>)
PPMS®	<i>Physical Property Measurement System</i> (Sistema de Medição de Propriedades Físicas)
PTFE	Politetrafluoretileno (<i>Polytetrafluoroethylene</i>)
PVDF	Fluoreto de polivinilideno (<i>Polyvinylidene fluoride</i>)
pH	Potencial hidrogeniônico
rGO	Óxido de grafeno reduzido (<i>reduced Graphene Oxide</i>)
SDBS	Dodecilbenzeno sulfonato de sódio (<i>Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate</i>)
THF	Tetrahidrofurano
UV	Ultravioleta (<i>Ultraviolet</i>)
vCD	Detector de Elétrons Retroespalhados (<i>Backscattered Electron Detector</i>)
WEEE	Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (<i>Wastes from Electrical and Electronic Equipment</i>)
ZIF – 67	Estrutura zeolítica imidazolato – 67 (<i>Zeolitic Imidazolate Framework – 67</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal respectiva [m ²]
A_0	Área inicial da seção estreita do corpo de prova [mm ²]
A_{sup}	Área do substrato de assentamento dos micropilares [m ²]
A_t	Área de troca térmica da superfície aletada [m ²]
A_{top}	Área da seção transversal dos micropilares paralela ao escoamento [m ²]
C_p	Capacidade térmica à pressão constante [J·K ⁻¹]
c_p	Calor específico à pressão constante [J·g ⁻¹ ·K ⁻¹]
d	Diâmetro respectivo [m]
d_D	Diâmetro interno do duto de polipropileno (PP) empregado nessa pesquisa
$d_{h,c}$	Diâmetro hidráulico do canal do microtrocador de calor [m]
d_M	Diâmetro interno da mangueira de silicone empregada nessa pesquisa
dQ	Variação do fluxo de calor [J]
dT	Variação da temperatura [°C]
dT/dx	Gradiente térmico na direção x [°C·m ⁻¹]
dx	Variação espacial na direção x [m]
E	Módulo de elasticidade (ou Módulo de Young) [MPa]
F	Força uniaxial aplicada no corpo de prova [N]
f	Fator de atrito [–]
f_D	Fator de atrito associado ao duto de polipropileno (PP) [–]
f_M	Fator de atrito associado à mangueira de silicone [–]
H_{mp}	Altura do micropilar [m]
H_t	Profundidade de instalação do sistema de monitoramento térmico da superfície aletada [m]
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção [W·m ⁻² ·K ⁻¹]

i	Corrente elétrica aplicada [A]
j	Elemento respectivo [–]
k	Condutividade térmica [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
L	Comprimento respectivo [m]
L_{Dm}	Comprimento do duto de polipropileno (PP) conectado diretamente com o microtrocador de calor [m]
L_{Dt}	Comprimento do duto de polipropileno (PP) conectado diretamente com o transdutor de pressão [m]
L_M	Comprimento da mangueira de silicone que conecta os dutos de polipropileno (PP) [m]
l	Aresta do recipiente desenvolvido para medição da densidade das nanopartículas [cm]
l_0	Comprimento inicial do corpo de prova [mm]
l_i	Comprimento instantâneo do corpo de prova [mm]
l_k	Largura da amostra desenvolvida para medição experimental da condutividade térmica [m]
l_{mp}	Largura do micropilar [m]
l_{sup}	Largura do substrato de assentamento dos micropilares [m]
m	Massa [g]
$\dot{m}$	Vazão mássica [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]
n	Número total de elementos [–]
Nu	Número de Nusselt [–]
P	Potência elétrica [W]
P_{mp}	Perímetro molhado do micropilar [m]
p	Pressão [kPa]
p_e	Pressão monitorada no transdutor localizado no duto de entrada do microtrocador de calor [kPa]

p_s	Pressão monitorada no transdutor localizado no duto de saída do microtroca- dor de calor [kPa]
Q	Taxa de transferência de calor [W]
q	Densidade de fluxo de calor [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
R	Resistência elétrica [Ω]
R^2	Coefficiente de determinação [%]
Re	Número de Reynolds [–]
r	Fator de rugosidade [–]
s	Incerteza respectiva [unidade da grandeza medida]
s_A	Incerteza relacionada à área de troca térmica entre o resistor e a amostra para o aparato de medição da condutividade térmica dos compósitos [m^2]
S_{c_p}	Desvio-padrão amostral do calor específico à pressão constante no conjunto obtido na faixa de temperaturas analisada [$\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
s_{c_p}	Erro instrumental de medição individual nos testes de calor específico à pressão constante [$\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
s_{dT}	Incerteza relacionada à diferença de temperatura entre os pontos de monito- ramento térmico para o aparato de medição da condutividade térmica dos compósitos [$^{\circ}\text{C}$]
s_{dx}	Incerteza relacionada à distância entre os pontos de monitoramento térmico para o aparato de medição da condutividade térmica dos compósitos [m]
s_i	Incerteza relacionada à corrente elétrica aplicada no resistor para o aparato de medição da condutividade térmica dos compósitos [A]
s_{jk}	Incerteza da condutividade térmica em cada uma das medições laboratoriais [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
s_k	Incerteza propagada da condutividade térmica dos compósitos [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
S_k	Incerteza expandida da condutividade térmica dos compósitos [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
s_l	Incerteza associada à medição linear com instrumento [cm]
s_{l_k}	Incerteza relacionada à largura da região de troca térmica para o aparato de medição da condutividade térmica dos compósitos [m]

s_p	Incerteza prevista na medição com cada transdutor de pressão [kPa]
s_{p_e}	Incerteza prevista na medição com o transdutor localizado no duto de entrada do microtrocador de calor [kPa]
s_{p_s}	Incerteza prevista na medição com o transdutor localizado no duto de saída do microtrocador de calor [kPa]
s_P	Incerteza relacionada à aplicação da potência elétrica no resistor para o aparato de medição da condutividade térmica dos compósitos [W]
s_R	Incerteza relacionada à resistência elétrica do resistor de aquecimento para o aparato de medição da condutividade térmica dos compósitos [Ω]
s_{s_k}	Incerteza das incertezas de cada teste laboratorial da condutividade térmica [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
s_t	Incerteza prevista na medição com cada termopar [$^{\circ}\text{C}$]
s_{T_1}	Incerteza relacionada ao termopar 1 de monitoramento para o aparato de medição da condutividade térmica dos compósitos [$^{\circ}\text{C}$]
s_{T_2}	Incerteza relacionada ao termopar 2 de monitoramento para o aparato de medição da condutividade térmica dos compósitos [$^{\circ}\text{C}$]
s_V	Incerteza associada ao volume do recipiente desenvolvido para medição da densidade das nanopartículas [cm^3]
$s_{\Delta p}$	Incerteza propagada na medição da queda de pressão entre os transdutores [kPa]
$s_{\bar{k}}$	Incerteza da média da medição laboratorial de k [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
s_{w_k}	Incerteza relacionada ao comprimento da região de troca térmica para o aparato de medição da condutividade térmica dos compósitos [m]
s_{x_j}	Incerteza de variável independente que expressa uma função [unidade da grandeza medida]
s_y	Incerteza de variável aleatória [unidade da grandeza medida]
T_e	Temperatura de entrada do fluido de trabalho (antes da região aletada) [$^{\circ}\text{C}$]
T_k	Temperatura correspondente à parcela da condução térmica entre o ponto de análise e a superfície [$^{\circ}\text{C}$]
T_{mp}	Temperatura na proximidade da base dos micropilares [$^{\circ}\text{C}$]

T_r	Temperatura na interface entre o microtrocador de calor e o resistor elétrico [°C]
T_s	Temperatura de saída do fluido de trabalho (após a região aletada) [°C]
T_{sup}	Temperatura na base dos micropilares [°C]
T_w	Temperatura correspondente ao acréscimo de temperatura entre a entrada e a saída na posição de leitura [°C]
T_∞	Temperatura do fluido que envolve a superfície microaletada [°C]
t	Quantidade de micropilares na superfície aletada [–]
U	Diferença de potencial elétrico [V]
V	Volume do recipiente desenvolvido para medição da densidade das nanopartículas [cm ³]
$\dot{V}$	Vazão volumétrica [mL·min ⁻¹]
v	Velocidade média [m·s ⁻¹]
v_D	Velocidade média do fluido no duto de polipropileno (PP) [m·s ⁻¹]
v_M	Velocidade média do fluido na mangueira de silicone [m·s ⁻¹]
w_k	Comprimento da amostra desenvolvida para medição experimental da condutividade térmica [m]
w_{mp}	Comprimento do micropilar [m]
w_{sup}	Comprimento do substrato de assentamento dos micropilares [m]
w_t	Distância de instalação do sistema de monitoramento térmico da superfície aletada em relação ao seu início [m]
x	Variável aleatória [unidade da grandeza medida]
x_j	Valor individual ou variável independente de função observado na j -ésima medição [unidade da grandeza medida]
$\bar{x}$	Valor médio de variável [unidade da grandeza medida]
y	Variável aleatória [unidade da grandeza medida]
z	Fator associado ao tamanho e modificação superficial do preenchimento em compósitos [–]

α	Fator de abrangência [–]
β	Fração de área sólida superficial em contato com o líquido da gota [–]
γ_{LV}	Tensão superficial na interface líquido-gás da gota [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
γ_{SL}	Tensão superficial na interface sólido-líquido da gota [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
γ_{SV}	Tensão superficial na interface sólido-gás da gota [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
δ	Desvio-padrão amostral da variável analisada [unidade da grandeza medida]
δ_{c_p}	Desvio-padrão amostral entre as medições nos testes de calor específico à pressão constante [$\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
δ_k	Desvio-padrão amostral em relação às medições individuais de condutividade térmica pelo método laboratorial [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
Δl	Alongamento do corpo de prova [mm]
Δp	Queda de pressão medida entre os transdutores [kPa]
$\Delta p'$	Queda de pressão respectiva [kPa]
Δp_{Dm}	Queda de pressão no duto de polipropileno (PP) conectado diretamente com o microtrocador de calor [kPa]
Δp_{Dt}	Queda de pressão no duto de polipropileno (PP) conectado diretamente com o transdutor de pressão [kPa]
Δp_M	Queda de pressão na mangueira de silicone que conecta os dutos de polipropileno (PP) [kPa]
Δp_{mt}	Queda de pressão associada ao microtrocador de calor como um todo [kPa]
Δp_{tub}	Queda de pressão associada às tubulações que se conectam ao microtrocador de calor [kPa]
ϵ	Rugosidade equivalente da parede do duto [m]
ε	Deformação de engenharia [–]
ε_{rup}	Deformação na ruptura [–]
η	Eficiência do micropilar [–]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
ρ	Densidade do fluido [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]

ρ_p	Densidade das nanopartículas obtidas [g·cm ⁻³]
σ	Tensão de engenharia [MPa]
σ_{lp}	Tensão limite escoamento [MPa]
σ_{max}	Tensão máxima [MPa]
σ_{rup}	Tensão de ruptura [MPa]
θ	Ângulo de contato [°]
θ_{CB}	Ângulo de contato pelo Modelo de Cassie-Baxter [°]
θ_W	Ângulo de contato pelo Modelo de Wenzel [°]
θ_Y	Ângulo de contato pelo Modelo de Young [°]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	30
1.1	POLIDIMETILSILOXANO (PDMS) E SUAS APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS	32
1.2	MICROTROCADORES DE CALOR NA ATUALIDADE	33
1.3	OBJETIVO DO TRABALHO	34
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	35
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	36
2.1	BATERIAS ELETROQUÍMICAS: VISÃO GERAL	36
2.1.1	Reciclagem de baterias: pesquisas, métodos e desenvolvimento sustentável	39
2.1.1.1	Pirometalurgia	39
2.1.1.2	Hidrometalurgia	41
2.1.1.3	Outras técnicas promissoras	42
2.1.2	Economia circular e inovação na reciclagem de baterias de íons de lítio	43
2.2	NANOTECNOLOGIA E COMPÓSITOS COM RESÍDUOS DE BATERIAS	47
2.3	POLIDIMETILSILOXANO E SUAS ABORDAGENS NA ATUALIDADE .	49
2.3.1	PDMS: características gerais e manuseio	49
2.3.1.1	O PDMS Sylgard™ 184 – Dow Corning®	51
2.3.2	Hidrofobicidade do PDMS	52
2.3.2.1	Modelos matemáticos de previsão do ângulo de contato	53
2.3.3	Mecanismos das propriedades de polímeros – discussão	54
2.3.3.1	Transferência de calor: condutividade térmica e calor específico	54
2.3.3.2	Carregamento e ruptura: propriedades mecânicas	56
2.3.4	Nanocompósitos de PDMS: estrutura, propriedades e aplicações avançadas	57
2.4	MICROTROCADORES DE CALOR	67
2.4.1	Canais: critérios de classificação de escala	67
2.4.2	Aletas	68
2.5	PDMS NO GERENCIAMENTO TÉRMICO	70
2.6	DESFECHO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	81
3	METODOLOGIA	83
3.1	HIDROMETALURGIA: OBTENÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS	83
3.2	DESENVOLVIMENTO DOS COMPÓSITOS	87
3.2.1	Manuseio do compósito e desenvolvimento das amostras	88
3.3	CARACTERIZAÇÕES DAS AMOSTRAS	92

3.3.1	Análises laboratoriais por técnicas de microscopia e espectroscopia: nanopartícula obtida e compósitos desenvolvidos	92
3.3.2	Caracterização física das nanopartículas obtidas: densidade (ρ_p)	92
3.3.3	Caracterização térmica	93
3.3.3.1	Capacidade térmica (C_p) e calor específico à pressão constante (c_p)	93
3.3.3.2	Condutividade térmica (k)	98
3.3.4	Caracterização mecânica	106
3.3.4.1	A curva tensão-deformação (ou curva σ - ε)	109
3.4	MICROTROCADORES DE CALOR: PROJETO, DESENVOLVIMENTO E PREPARAÇÃO DA SEÇÃO DE TESTES	111
3.4.1	Arranjos dos micropilares	113
3.4.1.1	Caracterização da superfície aletada dos microtrocaadores de calor: ângulo de contato (θ)	114
3.4.2	Preparação da seção de testes	115
3.5	BANCADA DE TESTES	116
3.5.1	Aspectos construtivos	117
3.5.2	Sistema de aquecimento	121
3.5.3	Sistema de instrumentação e monitoramento das variáveis operacionais	122
3.5.3.1	Temperaturas: termopares do tipo K	122
3.5.3.2	Queda de pressão: transdutores	124
3.5.4	Escoamento hidrodinâmico: fluido de trabalho e conexões hidráulicas .	126
3.6	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA TESTES TERMOHIDRODINÂMICOS NO MICROTROCADOR DE CALOR	127
3.7	EQUACIONAMENTO	129
3.7.1	Parâmetros da transferência térmica em microtrocaadores de calor . . .	129
3.7.2	Queda de pressão	133
3.7.2.1	Validação da medição de queda de pressão (Δp_{mt})	133
3.8	CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES MICROALETADAS POR TÉCNICAS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	137
4	RESULTADOS	139
4.1	ANÁLISE MICROSCÓPICA DAS PARTÍCULAS OBTIDAS – MEV . . .	139
4.2	ANÁLISE MICROSCÓPICA E ESPECTROSCÓPICA DOS COMPÓSITOS DESENVOLVIDOS – MEV E EDS	140
4.3	ANÁLISE MICROSCÓPICA DAS SUPERFÍCIES MICROALETADAS – ETD E VCD	144
4.4	ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DAS SUPERFÍCIES MICROALETADAS – ÂNGULO DE CONTATO	154

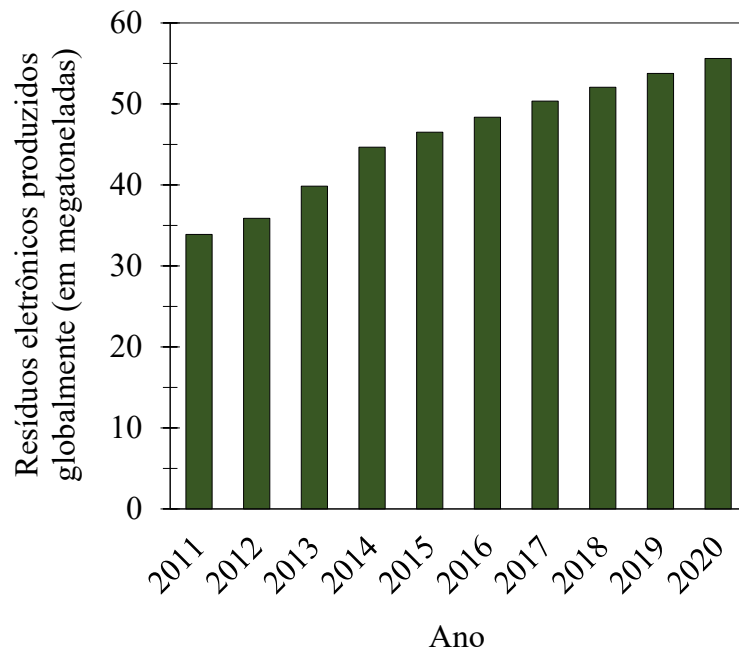
4.5	ANÁLISE DO CALOR ESPECÍFICO À PRESSÃO CONSTANTE (c_p) DOS COMPÓSITOS	156
4.6	ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k) DOS COMPÓSITOS . .	159
4.7	ANÁLISE DAS CURVAS σ - ε E DOS PARÂMETROS MECÂNICOS DOS COMPÓSITOS	162
4.8	RESULTADOS TERMOHIDRODINÂMICOS COM MICROTROCADO- RES DE CALOR DESENVOLVIDOS	165
4.8.1	Temperaturas	165
4.8.1.1	Temperatura na interface entre o resistor e o microtrocador de calor (T_r) . .	165
4.8.1.2	Temperatura na proximidade da base dos micropilares do dispositivo (T_{mp}) .	172
4.8.1.3	Coeficiente de transferência de calor por convecção (h)	179
4.8.2	Análise da queda de pressão nos microtrocadores de calor (Δp_{mt})	185
5	CONCLUSÕES	194
5.1	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	195
	REFERÊNCIAS	197
	DADOS CURRICULARES	213

1 INTRODUÇÃO

O avanço científico e tecnológico que tem permeado a sociedade humana nas últimas décadas propiciou o desenvolvimento de materiais, métodos e produtos que facilitam a vida em comunidade, interligam pessoas de diferentes continentes e contribuem para o bem-estar urbano. Se, por um lado, o consumo tecnológico tem possibilitado o acesso rápido e fácil a uma grande quantidade de ferramentas, utensílios e informações, por outro, tem evidenciado, mais do que nunca, a necessidade de medidas eficientes para a gestão da produção exacerbada de resíduos (IKRAM *et al.*, 2023), intensificada pela urbanização e pela obsolescência programada, cujo objetivo é reduzir a durabilidade e a vida útil dos equipamentos, levando ao descarte precoce (COOPER, 2005).

Entre os resíduos produzidos, destacam-se os do tipo WEEE (sigla em inglês para *Wastes from Electrical and Electronic Equipment*, que pode ser traduzida como Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos), cuja produção global atingiu 54 milhões de toneladas em 2019 (SHITTU; WILLIAMS; SHAW, 2021), com perspectiva de crescimento nos últimos anos (MAGODA; MEKUTO, 2022), conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Produção global de resíduos WEEE entre 2011 e 2020



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Forti *et al.* (2020).

Segundo Isildar *et al.* (2019), o descarte indevido dessas tecnologias (Figura 2), como o que ocorre em diversos aterros, evidencia a gravidade dessa questão na atualidade, uma vez que são responsáveis pela emissão de substâncias tóxicas e perigosas – como metais pesados – no meio ambiente, representando riscos relevantes à saúde humana. Para mitigar os impactos negativos evidentes dessa prática, a reciclagem e a recuperação desse tipo de material têm se tornado

uma prioridade global, fomentando o desenvolvimento de processos sustentáveis de gestão de resíduos (PINEDA-VASQUEZ *et al.*, 2023) e minimizando a extração de recursos naturais (ZENG; MATHEWS; LI, 2018).

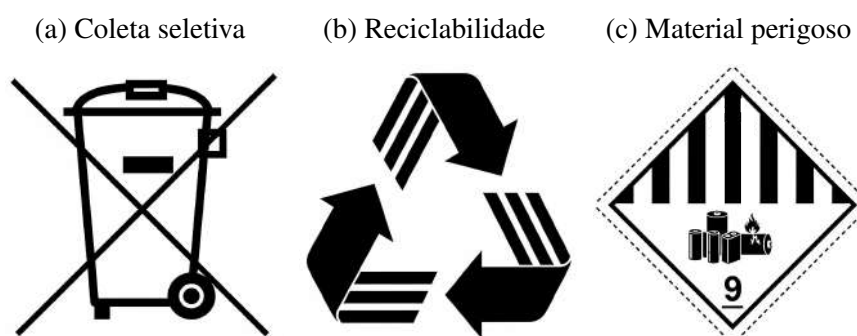
Figura 2 – Resíduos do tipo WEEE descartados incorretamente



Fonte: Adaptado de BASF SE (2016).

Dentro dessa perspectiva, as baterias configuram-se como um dos componentes elétricos mais presentes nos resíduos tecnológicos. Nesse sentido, a preocupação em garantir a segurança ambiental para as próximas gerações tem impulsionado diversas políticas ao redor do mundo para o seu correto manuseio e descarte, como ilustrado pela rotulagem utilizada na União Europeia, apresentada na Figura 3, que visa informar a necessidade de sua separação do lixo comum (Figura 3a), destacar sua reciclabilidade (Figura 3b) e identificá-las como resíduo perigoso (Figura 3c) (NEUMANN *et al.*, 2022).

Figura 3 – Etiqueta para manuseio de baterias exigida na União Europeia



Fonte: Adaptado de Neumann *et al.* (2022).

No que se refere à reciclagem de baterias, há a possibilidade de recuperar materiais valiosos presentes em sua composição, como lítio (Li), manganês (Mn), cobalto (Co) e níquel (Ni) (ZENG; MATHEWS; LI, 2018). Esse processo, além de possibilitar a reintrodução desses elementos na fabricação de novas baterias, também pode viabilizar o aperfeiçoamento de outros dispositivos, como sensores eletroquímicos e pseudocapacitores (LEAL *et al.*, 2023).

Essas matérias-primas reaproveitadas têm contribuído também para o desenvolvimento de outros produtos e representam um passo importante rumo à economia circular – uma proposta sustentável de reintrodução de materiais no ciclo produtivo –, possibilitando sua utilização como material de preenchimento, com o objetivo de potencializar propriedades em compósitos (HUANG *et al.*, 2019), além de fomentar aplicações em diversos processos, como o de gestão térmica (BURZYNSKI *et al.*, 2021).

Nesse sentido, as abordagens tecnológicas envolvendo o desenvolvimento de novos produtos derivados da reciclagem e recuperação de resíduos elétricos e eletrônicos, incluindo baterias, têm se expandido para a produção de materiais nanoparticulados, como nanotubos de carbono (CNTs, sigla em inglês para *Carbon Nanotubes*), óxidos metálicos (KUMAR; SINGH; SINGH, 2016) e grafeno, este último apresentando melhorias de até 10,8 vezes na condutividade térmica quando incorporado ao polímero polidimetilsiloxano (PDMS), configurando um compósito promissor para processos térmicos avançados (ZHANG *et al.*, 2019b).

1.1 POLIDIMETILSILOXANO (PDMS) E SUAS APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS

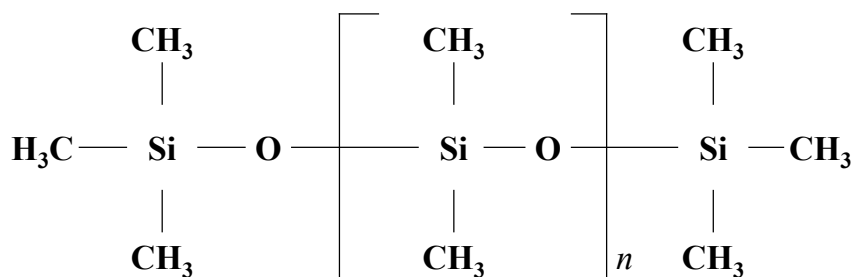
As abordagens envolvendo a nanotecnologia vêm ganhando espaço nos últimos anos, principalmente quando associadas ao desenvolvimento de novos produtos, segundo Fachine (2020). As nanopartículas, devido à sua escala de tamanho, apresentam propriedades físicas, químicas e mecânicas significativamente distintas da mesma substância em escala macroscópica, o que tem despertado o interesse de diversos setores e impulsionado avanços importantes em inúmeras áreas do conhecimento e da indústria.

O desenvolvimento de nanocompósitos, por exemplo, busca atender a determinadas exigências das tecnologias atuais por meio da combinação de uma matriz – que pode ser polimérica, metálica ou cerâmica – com nanopartículas, resultando em um material distinto, com propriedades novas ou superiores às encontradas nos materiais individualmente.

Considerando a possibilidade de incorporação das nanopartículas oriundas da reciclagem de baterias em uma matriz polimérica, o PDMS tem se destacado como um polímero elastomérico com propriedades viscoelásticas, baixo custo de operação, fácil manuseio e transparência óptica – ideal para aplicações em diversas áreas (MIRANDA *et al.*, 2021), como no campo da microfluídica (FRIEND; YEO, 2010), no desenvolvimento de microestruturas (JOHNSTON *et al.*, 2014) e em sistemas biocompatíveis (LIMA *et al.*, 2019).

A estrutura molecular do polímero PDMS – $\text{CH}_3[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n\text{Si}(\text{CH}_3)_3$ – é apresentada na Figura 4, em que “*n*” representa o número de unidades monoméricas repetidas, estando diretamente relacionado à viscosidade do material.

Figura 4 – Estrutura molecular do PDMS



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Yang *et al.* (2021).

No cenário térmico, a adição de nanopartículas à matriz polimérica do PDMS é uma técnica que busca contornar uma de suas principais desvantagens: a condutividade térmica relativamente baixa (aproximadamente $0,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), que pode limitar sua aplicação em sistemas de transferência de calor (SOUZA *et al.*, 2023). A incorporação de grafeno, por exemplo, conforme apontado por Zhang *et al.* (2019b), aumentou significativamente sua condutividade térmica; enquanto nanoplaquetas de grafite, aplicadas em 11% do volume, podem aumentar essa propriedade em até 9 vezes (BURZYNSKI *et al.*, 2021). Quanto às características mecânicas, a adição de nanopartículas de ferro pode elevar a tensão de ruptura do PDMS entre 1,2 e 1,6 vezes (HONG *et al.*, 2024).

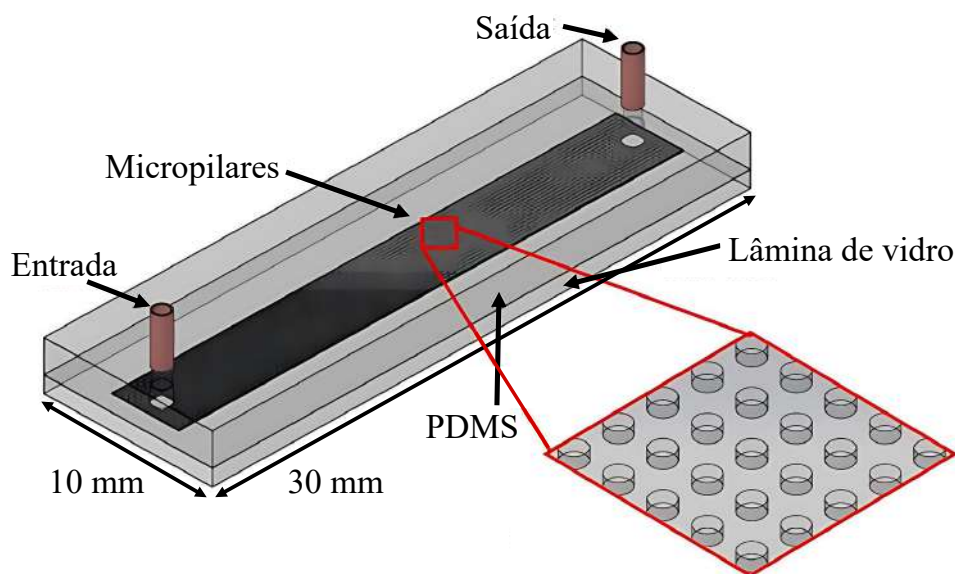
1.2 MICROTROCADORES DE CALOR NA ATUALIDADE

O advento e aperfeiçoamento de novas tecnologias têm provocado uma gradual miniaturização dos componentes eletrônicos, o que tornou essencial o aprimoramento de sistemas de gerenciamento térmico para dissipação de calor e manutenção da sua funcionalidade. Nesse contexto, a utilização de microtrocares de calor com microcanais e micropilares tem despertado interesse tanto em aplicações industriais quanto em equipamentos eletrônicos (LALAGI *et al.*, 2022), uma vez que apresentam alta eficiência no processo de transferência térmica (ZHOU *et al.*, 2020).

Diversos estudos têm sido realizados para aprimorar os métodos de transferência de calor, incluindo a análise do comportamento térmico de diferentes geometrias de micropilares instalados em trocadores de calor com microcanais (ZHOU *et al.*, 2020) e a descoberta de novos materiais de fabricação, como polímeros que, devido à sua flexibilidade e fácil manuseio, criam um novo cenário para o gerenciamento térmico em diversas condições (SOUZA *et al.*, 2023).

Dentro dessa perspectiva, trocadores de calor fabricados em PDMS, como ilustrado na Figura 5, têm apresentado resultados interessantes (DAMLE, 2021), o que fortalece as abordagens ecológicas e nanotecnológicas voltadas ao desenvolvimento de dispositivos em que a transferência de calor é essencial, especialmente direcionadas à melhoria das propriedades térmicas do polímero e à sua consolidação nesse cenário.

Figura 5 – Esquema de microtrocador de calor em PDMS com micropilares cilíndricos



Fonte: Adaptado de Damle (2021).

Nesse contexto, o avanço das tecnologias voltadas à reciclagem e recuperação de resíduos de baterias, aliado às abordagens nanotecnológicas e à utilização do PDMS na fabricação de microtrocadores de calor, promete contribuir de forma significativa para o desenvolvimento sustentável e para a elaboração de soluções inovadoras em diversos setores, incluindo o de gerenciamento térmico.

1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

O foco principal desta pesquisa concentra-se no desenvolvimento de microtrocadores de calor fabricados com compósitos de polidimetilsiloxano (PDMS), incorporados com diferentes teores em massa de nanopartículas provenientes da reciclagem de baterias de íons de lítio. A proposta consiste em analisar experimentalmente os efeitos da incorporação dessas nanopartículas em microtrocadores de calor fabricados em PDMS, com diferentes arranjos de micropilares, por meio da caracterização de suas propriedades e da realização de testes termohidrodinâmicos.

Dentro dessa perspectiva, os objetivos específicos deste estudo incluem:

- Investigar a composição, a morfologia e as características físicas das nanopartículas obtidas;
- Analisar como as nanopartículas influenciam a composição e a microestrutura dos compósitos desenvolvidos;
- Avaliar como as nanopartículas alteram as propriedades térmicas das composições obtidas, incluindo o calor específico a pressão constante e a condutividade térmica;

- Avaliar, por meio de ensaios de tração, como as nanopartículas alteram as propriedades mecânicas dos compósitos desenvolvidos;
- Analisar os efeitos da adição das nanopartículas na qualidade superficial e no ângulo de contato das regiões microaletadas; e
- Investigar a influência das nanopartículas e avaliar o desempenho termohidrodinâmico dos microtrocares sob escoamento forçado em uma bancada de testes desenvolvida.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi elaborado de forma estruturada, com o objetivo de apresentar, de maneira clara e objetiva, o que foi desenvolvido, seu respaldo teórico e os resultados obtidos. Nesse sentido, a divisão da pesquisa em capítulos, seções e subseções contribui para a conexão lógica das partes do estudo e facilita a localização de tópicos importantes. O trabalho foi estruturado nos capítulos: *Introdução*, *Revisão bibliográfica*, *Metodologia*, *Resultados* e *Conclusões*.

De forma resumida, a *Revisão bibliográfica* reúne os trabalhos e publicações mais relevantes sobre o tema, enfatizando a importância das baterias na atualidade e os avanços tecnológicos no tratamento de seus resíduos; investigando a relação entre os insumos obtidos da reciclagem dessas baterias e os aportes do setor nanotecnológico; abordando aspectos gerais do PDMS e os estudos referentes à melhoria de suas propriedades térmicas e mecânicas; relacionando o cenário do gerenciamento térmico com microtrocares de calor; e, por fim, apresentando os conceitos necessários para integrar os nanocompósitos desenvolvidos em sistemas de dissipação térmica.

Posterior à *Revisão bibliográfica*, o capítulo de *Metodologia* detalha todos os processos envolvidos na pesquisa, desde a obtenção das nanopartículas oriundas da reciclagem das baterias, passando pela caracterização delas e das amostras, pela fabricação dos microtrocares de calor, caracterização da superfície microaletada e montagem da bancada de testes de fluxo, até os experimentos voltados à obtenção de resultados termohidrodinâmicos e o equacionamento empregado nessa análise.

O capítulo de *Resultados* apresenta os dados obtidos nas análises das nanopartículas e dos compósitos, bem como nos experimentos com os microtrocares de calor fabricados com os compósitos desenvolvidos, evidenciando, em um primeiro momento, a viabilidade da proposta.

Por fim, as *Conclusões* sintetizam os principais pontos da pesquisa, destacando a relevância e a aplicabilidade do estudo, bem como apresentam sugestões e propostas para estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma revisão bibliográfica sistemática é essencial dentro da pesquisa científica, pois permite a construção de uma base teórica sólida, além de contribuir para a contextualização sobre o tema. Sendo assim, a presente pesquisa, procurando estudar os efeitos da incorporação de nanopartículas provenientes do processo de reciclagem de baterias de íons de lítio na matriz polimérica de PDMS aplicada em microtrocaadores de calor com micropilares, fará uso de um estudo da literatura que aborda, ainda que minimamente, esse tema, a fim de avaliar possíveis lacunas, analisar oportunidades, propor novas técnicas e, consequentemente, viabilizar a relevância da pesquisa.

2.1 BATERIAS ELETROQUÍMICAS: VISÃO GERAL

As baterias são dispositivos eletroquímicos essenciais nas tecnologias contemporâneas, por serem capazes de converter energia química em energia elétrica por meio de reações de oxirredução (MOSSALI *et al.*, 2020). O marco inicial do desenvolvimento desse equipamento foi a invenção da pilha proposta pelo italiano Alessandro Volta (1745–1827), entre o final do século XVIII e o início do século XIX. Desde então, as baterias evoluíram para acompanhar as necessidades energéticas e tecnológicas da sociedade, tornando-se fundamentais em equipamentos eletrônicos, veículos elétricos e híbridos, bem como em sistemas de armazenamento de energia elétrica.

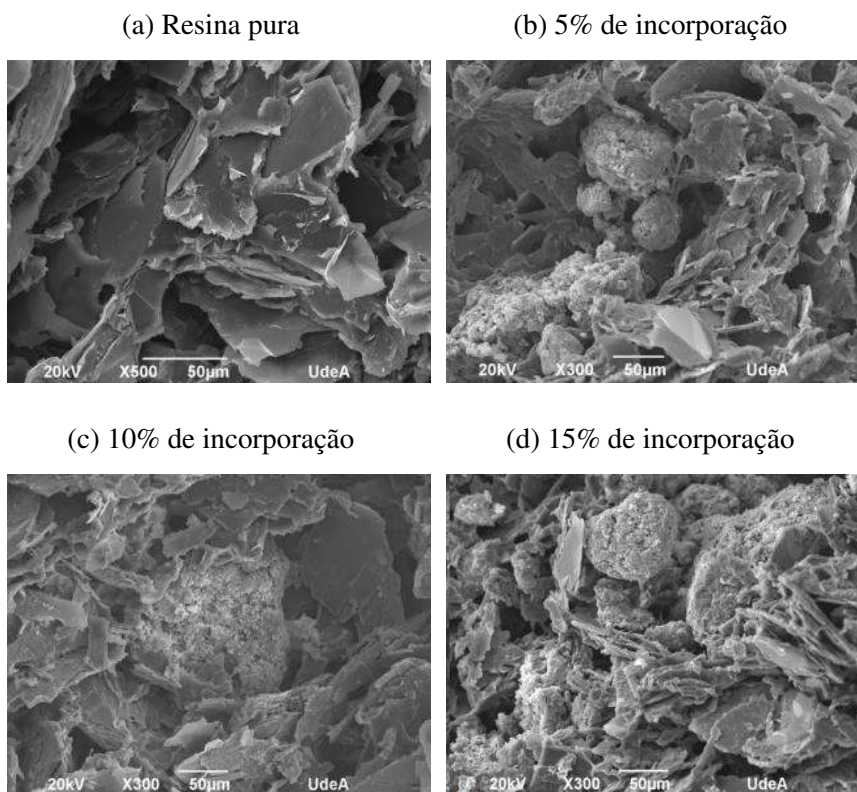
A classificação mais comum das baterias diz respeito à reversibilidade de suas reações químicas internas, o que está diretamente relacionado ao seu destino após o uso. As baterias do tipo primário são descartáveis, isto é, não são recarregáveis (CARDONA-VIVAS; CORREA; COLORADO, 2021), o que evidencia o impacto ambiental de seu descarte. Esse tipo de bateria, cujos principais exemplos são as de zinco-carbono e as alcalinas, é facilmente encontrado no comércio em razão do baixo custo (CARDONA-VIVAS; CORREA; COLORADO, 2021).

Estudos envolvendo baterias primárias têm sido desenvolvidos com o objetivo de mitigar os impactos negativos gerados pelo descarte incorreto. O trabalho de Cardona-Vivas, Correa & Colorado (2021), por exemplo, avalia a viabilidade de um compósito fabricado com resina vinílica-acrílica incorporada com grafite e óxidos de manganês e cobalto em forma de pó, provenientes de resíduos de baterias alcalinas e de zinco-carbono, em diferentes percentuais. Os compósitos elaborados foram submetidos a diversas técnicas de caracterização, incluindo análises de microscopia, estabilidade dimensional e testes mecânicos, demonstrando potencial para aplicações multifuncionais, especialmente em dispositivos eletrônicos.

Os resultados de microscopia são apresentados na Figura 6, que aborda os diferentes teores estudados, sendo o primeiro deles com a resina pura (Figura 6a), e os demais com: 5% (Figura 6b), 10% (Figura 6c) e 15% (Figura 6d) em massa dos resíduos de baterias.

Esse estudo permitiu identificar como ocorre a dispersão desses compostos na matriz amorfa

Figura 6 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da incorporação dos resíduos de baterias alcalinas e de zinco-carbono na resina vinílica-acrílica



Fonte: Adaptado de Cardona-Vivas, Correa & Colorado (2021).

da resina, destacando regiões concentradas de resíduo, como observado nas amostras de 5% e 10%, devido à viscosidade da resina e à dificuldade de dispersão, bem como uma melhor dispersão em 15%, obtida por meio de um processo mais eficaz de mistura mecânica.

Farzana *et al.* (2018b) apresentam uma abordagem ambientalmente responsável de reciclagem de baterias de zinco-carbono no fim de sua vida útil, visando à obtenção de nanopartículas de óxido de manganês (MnO) e de óxido de zinco (ZnO), por meio de processos térmicos de síntese e nanodimensionamento mais vantajosos e bem-sucedidos em comparação aos métodos convencionais. Nesse mesmo contexto, outra pesquisa de Farzana *et al.* (2018a) concentra-se na caracterização de nanopartículas de óxido de zinco (com dimensões de até 50 nm) obtidas por tratamento térmico, com enfoque nos aspectos ambientais e em aplicações ópticas promissoras.

Uma proposta inovadora, distante das aplicações tradicionais, é a utilização dos resíduos recuperados de baterias primárias na formulação de fertilizantes voltados aos desafios agrícolas. Valson *et al.* (2023) investigam os benefícios gerados na produção de trigo com a aplicação do nanofertilizante de nanossulfato de manganês *Mangnify*, obtido a partir de baterias primárias descartadas. A proposta, que visa corrigir a deficiência de manganês no solo, mostrou-se eficaz, promovendo aumento da produção, melhoria no rendimento regional e aprimoramento das características da cultura.

Por outro lado, as baterias secundárias são recarregáveis, o que permite múltiplos ciclos de

carga e descarga, contribuindo para sua maior vida útil e para a redução dos impactos ambientais decorrentes do descarte (SARDO *et al.*, 2025). Exemplos relevantes de baterias secundárias são as de chumbo-ácido, níquel-cádmio, níquel-hidreto metálico e, principalmente, as baterias de íons de lítio, chamadas de LIBs (acrônimo em inglês para *Lithium-ion Batteries*).

As baterias de íons de lítio foram introduzidas comercialmente em 1991 pela Sony, após um longo período de estudos envolvendo questões de segurança, desenvolvimento sustentável e desempenho (MOSSALI *et al.*, 2020). Desde então, essas baterias têm se destacado nas aplicações das últimas décadas (SEDERHOLM *et al.*, 2025), devido à sua alta densidade energética, eficiência e viabilidade em dispositivos portáteis e veículos elétricos.

As LIBs podem ser classificadas de acordo com a composição do cátodo (ZAPAROLLI, 2025), mais especificamente em relação aos óxidos precursores empregados, como ilustra a Figura 7.

Figura 7 – Principais tipos de baterias de íons de lítio e seus óxidos precursores

Substâncias	Tipo	Composição do cátodo			
 Óxido de lítio – Li_2O	NMC	 Li_2O	 NiO	 MnO_2	 CoO
 Óxido de níquel – NiO	NCA	 Li_2O	 NiO	 CoO	 Al_2O_3
 Óxido de manganês – MnO_2	LMO	 Li_2O	 MnO_2		
 Óxido de cobalto – CoO	LCO	 Li_2O	 CoO		
 Óxido de alumínio – Al_2O_3					
 Fosfato de ferro – FePO_4	LFP	 Li_2O	 FePO_4		

Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Zaparolli (2025).

Muito empregadas cotidianamente, as baterias LCO possuem o cátodo composto por óxidos de lítio e cobalto e o ânodo por grafite e/ou carbono, sendo comuns em aparelhos celulares, *smartphones*, *notebooks* e *tablets* devido à sua alta densidade energética e estabilidade de tensão elétrica. Entretanto, esse tipo de bateria apresenta baixa estabilidade térmica, estando associado a episódios de superaquecimento, além dos impactos ambientais inerentes ao descarte incorreto e à extração dos metais utilizados em sua composição (LEAL *et al.*, 2023).

O crescente desenvolvimento tecnológico explica a utilização das baterias em larga escala, o que evidencia desafios relacionados à extração das matérias-primas, ao descarte inadequado das tecnologias e ao gerenciamento dos resíduos produzidos. Os resíduos do tipo WEEE (Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos) incluem aparelhos celulares, computadores, *notebooks* – equipamentos que fazem uso de baterias –, além de eletrodomésticos e outras tecnologias que representam riscos significativos à saúde humana e ao meio ambiente (MROZIK *et al.*, 2021).

Diante disso, o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de métodos eficientes de reciclagem e gerenciamento sustentável tornaram-se essenciais para a minimização dos impactos negativos, a recuperação estratégica dos metais e a promoção de abordagens sustentáveis, como a economia circular, que visa maximizar o uso dos recursos e reduzir o desperdício e a extração mineral (SRINIVASAN; SHANTHAKUMAR; ASHOK, 2025).

2.1.1 Reciclagem de baterias: pesquisas, métodos e desenvolvimento sustentável

De acordo com Sederholm *et al.* (2025), o setor responsável pela reciclagem de baterias de íons de lítio ainda se encontra em fase inicial de desenvolvimento, uma vez que apenas cerca de 10% dessas baterias são efetivamente recicladas. As diferentes técnicas utilizadas nesse processo têm como objetivo comum recuperar o material ativo e separar os metais contidos nas células (SANTOS *et al.*, 2021).

Os processos empregados para a reciclagem das baterias de íons de lítio envolvem diferentes procedimentos, sendo que o pré-tratamento é essencial para as etapas subsequentes. O pré-tratamento se inicia com o descarregamento elétrico das baterias, que pode ocorrer por meios térmicos e úmidos, segundo Takacova *et al.* (2023). Os métodos úmidos consistem em expor os polos elétricos das baterias em soluções químicas salinas para descarga (SARDO *et al.*, 2025). Métodos criogênicos também têm sido aplicados para inativar as células das baterias (SARDO *et al.*, 2025), por meio do congelamento com nitrogênio líquido (TAKACOVA *et al.*, 2023). Esse procedimento é essencial para evitar curtos-circuitos que possam comprometer a integridade dos componentes da bateria (TAKACOVA *et al.*, 2023), produzir gases tóxicos (RAUTELA; YADAV; KUMAR, 2023) e causar episódios de explosão (MISHRA *et al.*, 2022).

Posteriormente, as baterias são submetidas à desmontagem manual (SARDO *et al.*, 2025), o que possibilita a separação de seus componentes internos, como cátodo, ânodo, separador, eletrólito, carcaça externa, entre outros (MISHRA *et al.*, 2022). Essa separação também pode ocorrer por métodos mecânicos, como trituração e moagem (SARDO *et al.*, 2025), que, embora facilitem a distinção do material ativo dos demais constituintes – da carcaça, por exemplo –, produzem fragmentos de diferentes tamanhos (MISHRA *et al.*, 2022). O material formado nessa etapa é denominado massa negra (MANNU *et al.*, 2026), o qual pode ser submetido a processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos de recuperação metálica (RINNE; LAPPALAINEN; LUNDSTRÖM, 2025), com diversos estudos voltados para a combinação desses métodos Sardo *et al.* (2025), como será abordado nas subseções seguintes.

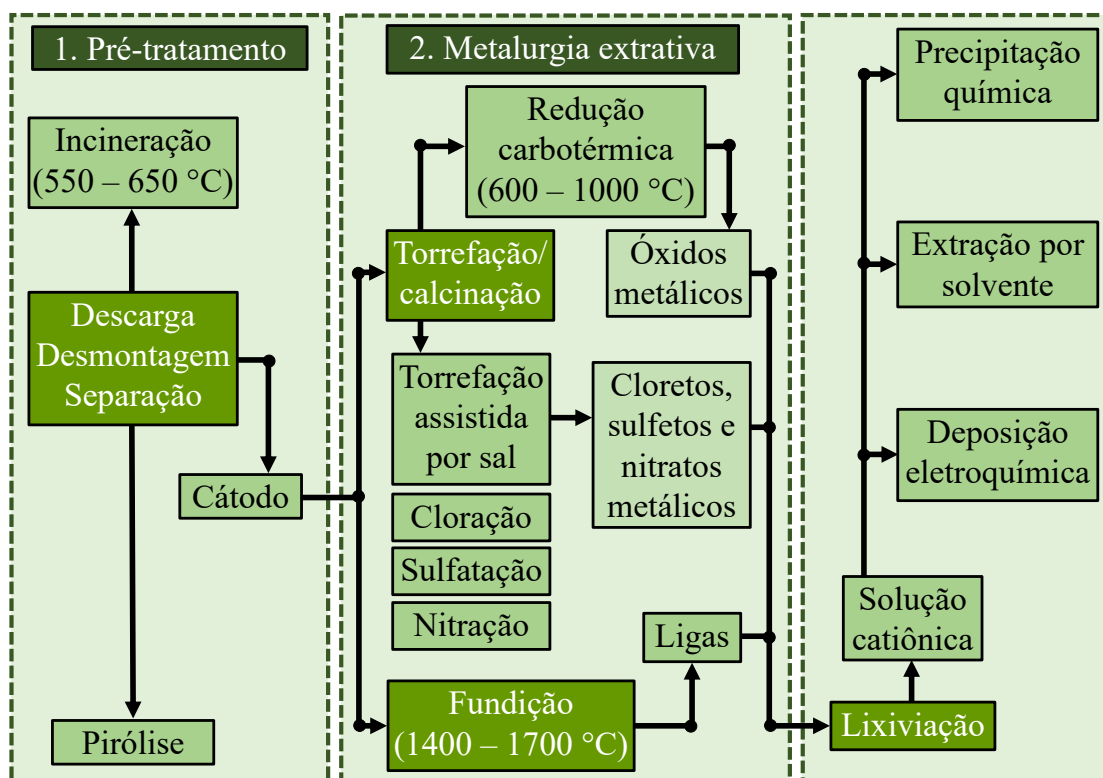
2.1.1.1 Pirometalurgia

A rota pirometalúrgica é a mais consolidada atualmente, segundo Latini *et al.* (2022). Essa prática consiste em aplicar altas temperaturas na bateria por inteiro. Inicialmente, as baterias são expostas a temperaturas inferiores, responsáveis pela evaporação do eletrólito. Posteriormente, com a aplicação das altas temperaturas em processos de torrefação e calcinação – que podem

atingir 1500 °C (MANNU *et al.*, 2026) –, os metais são fundidos, possibilitando a recuperação metálica de cobalto (Co), níquel (Ni) e cobre (Cu) na forma de ligas (RAUTELA; YADAV; KUMAR, 2023), que podem ser refinadas posteriormente por hidrometalurgia (SARDO *et al.*, 2025). Geralmente, o manganês (Mn) e o lítio (Li) são retidos na escória, sendo que o lítio se encontra ligado na forma de óxido (RAUTELA; YADAV; KUMAR, 2023).

Um fluxograma simplificado do processo pirometalúrgico de reciclagem de baterias de íons de lítio é apresentado na Figura 8, com destaque para suas principais etapas.

Figura 8 – Fluxograma simplificado do processo pirometalúrgico



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Sardo *et al.* (2025).

A reciclagem de baterias por meio desse processo está relacionada à baixa recuperação metálica que, associada ao elevado consumo energético, contribui para um cenário pouco sustentável, segundo Mannu *et al.* (2026).

Embora a pirometalurgia seja bastante versátil e abrangente quanto à sua aplicação em baterias (AL-ASHEH *et al.*, 2023), ela é responsável pela emissão de gases poluentes na atmosfera, o que demanda sistemas eficientes de tratamento, além de depender de outros processos de purificação do produto final (SARDO *et al.*, 2025).

Pensando na recuperação metálica integral em baterias de íons de lítio, Guoxing *et al.* (2016) desenvolveram um processo de fusão com pirolusita (MnO_2) e calcinação, capaz de produzir uma liga de cobalto, cobre, níquel e ferro (Co-Cu-Ni-Fe) e uma escória rica em manganês (Mn) e lítio (Li), recuperados com uma taxa de 79,86% e 94,85%, respectivamente, após um processo hidrometalúrgico com ácido sulfúrico (H_2SO_4).

2.1.1.2 Hidrometalurgia

As diretrizes do desenvolvimento sustentável na atualidade possibilitaram que novas técnicas fossem empregadas na reciclagem das baterias de íons de lítio, como é o caso da hidrometalurgia. Essa rota de reciclagem utiliza a lixiviação para a separação do material catódico das baterias (MOSSALI *et al.*, 2020). Diferentes parâmetros influenciam a eficiência do processo de lixiviação, como a concentração dos reagentes, o potencial hidrogeniônico (pH) e a temperatura (RAUTELA; YADAV; KUMAR, 2023).

De acordo com Mishra *et al.* (2022), alguns materiais encontrados nas baterias, como o alumínio (Al), são facilmente dissolvidos por soluções alcalinas – a exemplo do hidróxido de sódio (NaOH). Os componentes que não são dissolvidos por esse meio podem seguir para a lixiviação com ácidos inorgânicos e orgânicos.

Originalmente, a lixiviação era aplicada com ácidos inorgânicos capazes de dissolver os metais (MOSSALI *et al.*, 2020). Entre esses ácidos, destacam-se: ácido clorídrico (HCl), ácido sulfúrico (H₂SO₄), ácido nítrico (HNO₃) e ácido fosfórico (H₃PO₄), que têm sua eficiência aumentada pela adição de peróxido de hidrogênio (H₂O₂), como descrito por Swain *et al.* (2007). Urbanska (2020) obteve níveis de recuperação superiores a 87%, 99% e 91% para o cobalto (Co), lítio (Li) e níquel (Ni), respectivamente, usando uma solução de ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio.

A combinação de ácidos também tem sido investigada recentemente, como proposto por Chen *et al.* (2021), que utilizaram uma solução de HNO₃ e ácido ascórbico (C₆H₈O₆) – um ácido orgânico –, e obtiveram eficiências superiores a 82% de recuperação para lítio, cobalto, níquel e manganês.

Para promover uma abordagem ambientalmente responsável, livre do uso de ácidos inorgânicos – que produzem gases tóxicos e são corrosivos (MISHRA *et al.*, 2022) –, a utilização de ácidos orgânicos tem ganhado espaço, mostrando-se uma alternativa ambientalmente eficiente para a lixiviação.

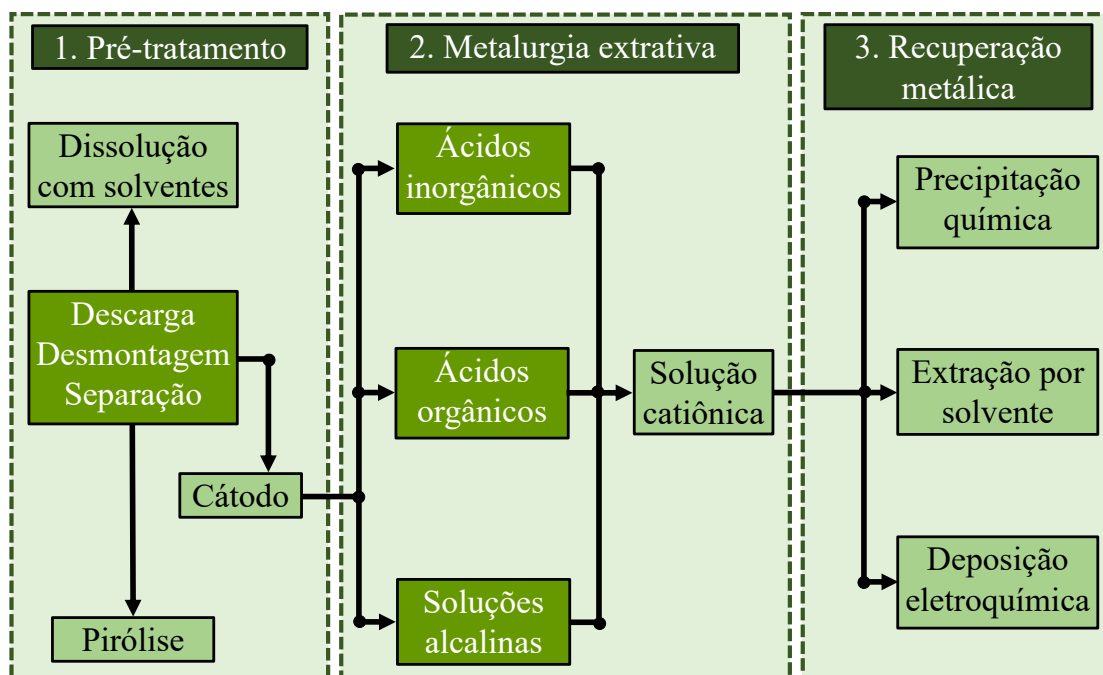
A aplicação do ácido ascórbico se destaca nas pesquisas, atingindo altas eficiências de recuperação, sendo 98% para o lítio e 95% para o cobalto, no estudo de Li *et al.* (2012).

O ácido láctico (C₃H₆O₃) apresentou índices de 100% e 97% para o lítio e o cobalto, respectivamente (ROSHANFAR; GOLMOHAMMADZADEH; RASHCHI, 2019). Outro estudo, com essa mesma solução, obteve taxas superiores a 97% para lítio, níquel, cobalto e manganês, conforme descrito por Li *et al.* (2017). O ácido acético (C₂H₄O₂) é outro candidato promissor, atingindo recuperação superior a 92% para manganês, cobalto e níquel, e quase 100% para o lítio (GAO *et al.*, 2018).

Um fluxograma simplificado do processo hidrometalúrgico de reciclagem de baterias de íons de lítio é apresentado na Figura 9, com destaque para suas principais etapas.

Um estudo relevante dentro da rota hidrometalúrgica foi proposto por Santos *et al.* (2021), que desenvolveram uma nova tecnologia, a *RecycLib*, aplicável a células de óxido de lítio-cobalto

Figura 9 – Fluxograma simplificado do processo hidrometalúrgico



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Sardo *et al.* (2025).

(LCO) e lítio-níquel-manganês-cobalto (NMC) de baterias no fim de vida útil. O processo se inicia com o descarregamento elétrico seguro dos dispositivos, contando com etapas de desmontagem e separação dos componentes, que posteriormente foram cortados em tiras. Essas tiras passaram, então, pelo processo hidrometalúrgico com uma solução diluída de hidróxido de metal alcalino. Os óxidos obtidos dessa etapa foram precipitados, filtrados e limpos com água deionizada, possibilitando a secagem final. Essa tecnologia promoveu altas taxas de recuperação do óxido metálico, sendo de 90% para as baterias LCO e 80% para as NMC, com pureza superior a 80%, representando uma alternativa ambientalmente sustentável para a reciclagem.

2.1.1.3 Outras técnicas promissoras

Diversas abordagens alternativas sobre a reciclagem e recuperação dos metais contidos nas baterias de íons de lítio têm sido estudadas nos últimos anos, em razão da urgência do tema na atualidade e da busca por superar as desvantagens dos métodos tradicionais.

A biolixiviação, tratada também como biohidrometalurgia, é um método hidrometalúrgico alternativo que utiliza microrganismos, como bactérias (quimiolítroficas e acidofílicas) e fungos, para a lixiviação e extração metálica nas baterias, segundo Zanoletti *et al.* (2024).

Sobre as bactérias acidofílicas, a *Acidithiobacillus ferrooxidans* tem apresentado índices de recuperação de 89%, 82%, 92% e 90% para lítio (Li), cobalto (Co), manganês (Mn) e níquel (Ni), respectivamente (ROY; SRINIVASAN; CAO, 2021). A *Acidithiobacillus thiooxidans* apresentou recuperação de 93% para o lítio e 53% para o manganês (NASERI; MOUSAVI, 2024).

Os fungos também se destacam nesse processo, entre eles o *Aspergillus niger*, com recupera-

ção de 100% para lítio, 94% para cobalto, 72% para manganês, 62% para alumínio, 45% para níquel e 38% para cobre (BAHALOO-HOREH; MOUSAVI; BANIASADI, 2018).

As condições ambientais influenciam esse processo, segundo Sardo *et al.* (2025), sendo comuns temperaturas entre 25 e 30 °C, durante períodos que podem chegar a até 1 mês (BAHALOO-HOREH; MOUSAVI; BANIASADI, 2018).

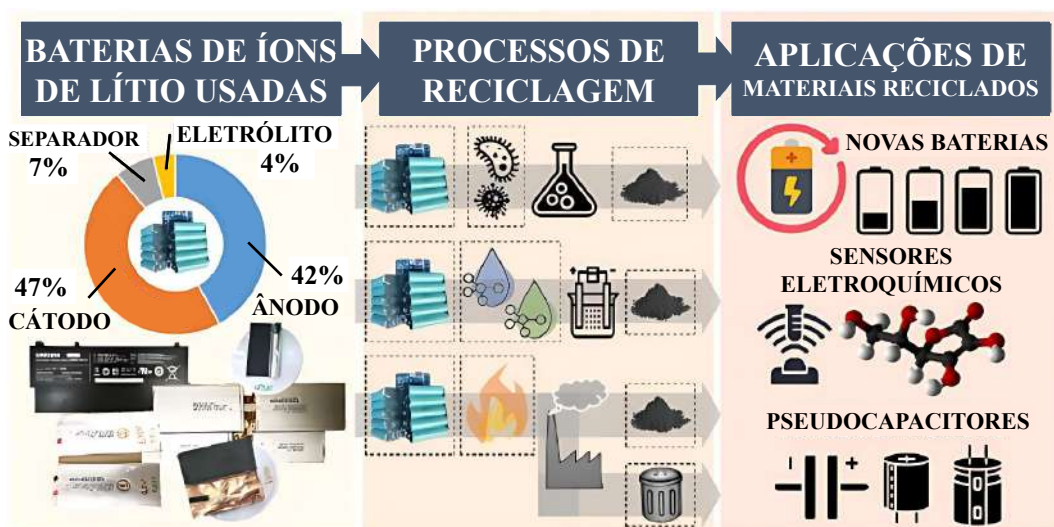
Outra estratégia emergente é a mecanoquímica que, de acordo com Sardo *et al.* (2025), é responsável por aplicar esforços mecânicos nos materiais sólidos da bateria para facilitar um posterior processo de lixiviação. Reações mecanoquímicas normalmente usam reagentes de comoagem, como o ácido etilenodiaminotetraacético (EDTA, sigla em inglês para *Ethylenediaminetetraacetic Acid*), para formação de compostos solúveis metálicos, que favorecem uma excelente recuperação de metais, como cobalto (98%) e lítio (99%) (WANG; ZHANG; ZHANG, 2016).

A solvometalurgia é uma alternativa recente para contornar as desvantagens da hidrometalurgia, utilizando solventes eutéticos profundos (DESSs, sigla em inglês para *Deep Eutectic Solvents*) e líquidos iônicos como agentes de lixiviação (ZANOLETTI *et al.*, 2024), o que promove altas taxas de recuperação do cátodo, como demonstrado por Suriyanarayanan *et al.* (2023), que empregaram N-metilureia combinada com acetamida – um DES não iônico – para obter uma recuperação superior a 97% de cobalto em baterias de íons de lítio.

2.1.2 Economia circular e inovação na reciclagem de baterias de íons de lítio

A reciclagem de baterias de íons de lítio surge como uma alternativa estratégica, não apenas para mitigar os impactos ambientais, mas também como uma oportunidade de reinserção dos materiais recuperados em novas cadeias produtivas. A Figura 10 apresenta as principais rotas atuais dos materiais obtidos da reciclagem desses dispositivos eletroquímicos no fim da vida útil.

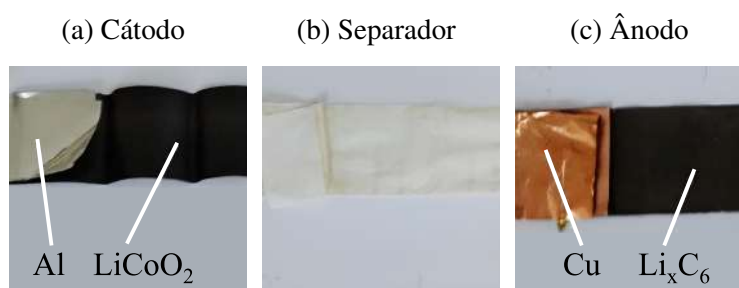
Figura 10 – Percurso comum do reaproveitamento de baterias de íons de lítio



Fonte: Adaptado de Leal *et al.* (2023).

Entre as aplicações desenvolvidas com os metais obtidos da reciclagem de baterias, como cobalto, níquel, lítio e manganês, destacam-se aquelas voltadas à síntese de novos cátodos para baterias de íons de lítio de segunda geração – processo denominado ressíntese, realizado a partir de óxidos metálicos com desempenho eletroquímico comparável ao das fontes primárias. Outra proposta é a recuperação do grafite do material anódico das baterias, que, após tratamentos termoquímicos, tem sido empregado em novas formulações de ânodos (LEAL *et al.*, 2023). A Figura 11 apresenta os materiais encontrados nas baterias de íons de lítio convencionais.

Figura 11 – Componentes e composição comum das baterias de íons de lítio



Fonte: Adaptado de Leal *et al.* (2023).

Ao longo do tempo, diversas propostas têm sido estudadas nesse sentido. Entre elas, Li *et al.* (2011) descrevem o desenvolvimento de um material eletroquímico por meio de um processo de lixiviação com ácido nítrico para recuperação e regeneração de cristais de óxido de lítio e cobalto obtidos de baterias de íons de lítio. O trabalho de Hanisch, Haselrieder & Kwade (2011) também se dedicou ao desenvolvimento de eletrodos de baterias a partir de materiais recuperados de baterias de íons de lítio no fim de sua vida útil. Essa recuperação foi inicialmente voltada para um processamento físico e, posteriormente, para tratamento químico com solvente específico.

Sa *et al.* (2015) utilizaram uma solução de lixiviação para recuperar um material catódico promissor – o $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ – visando à reinserção em baterias de íons de lítio. A obtenção desse ativo, por coprecipitação, revelou uma abordagem eficaz do ponto de vista eletroquímico, com perspectivas de ampliação comercial.

De modo similar, Yang, Xu & He (2017) realizaram a extração do mesmo material catódico e obtiveram altas taxas de recuperação de manganês (100%), cobalto (99%) e níquel (85%), separados do lítio pela ação do ácido di(2-etilhexil)fosfórico (D2EHPA, sigla em inglês para *Di(2-ethylhexyl)phosphoric Acid*) em querosene, resultando em elevado desempenho eletroquímico.

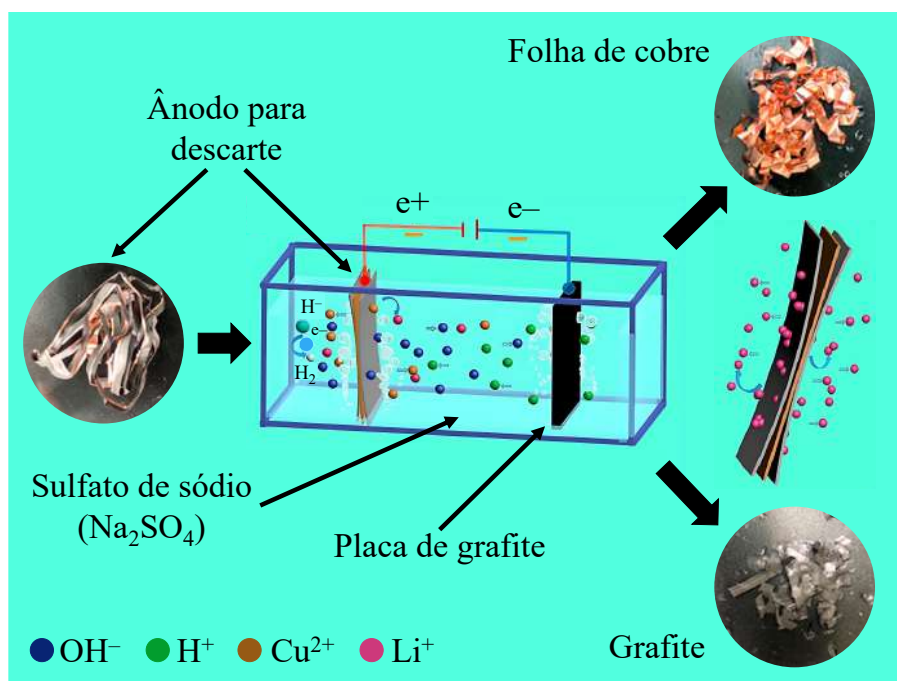
A pesquisa de Liu *et al.* (2018) apresenta uma nova abordagem metalúrgica para a ressintetização do óxido de lítio-níquel-cobalto-manganês – $\text{LiNi}_{0,5}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{0,3}\text{O}_2$, material catódico também denominado como LNCM. O material obtido destacou a viabilidade do método combinado para promover práticas ambientalmente seguras, além de demonstrar boa estrutura e desempenho eletroquímico semelhantes ao LNCM comercial, com altas taxas de recuperação metálica para níquel (93,33%), cobalto (97,78%) e manganês (98,77%).

A composição do ânodo das baterias é majoritariamente feita de grafite, podendo conter cobre e lítio, o que, embora tenha menor interesse econômico devido à sua abundância, também

tem sido objeto de estudos recentes (LEAL *et al.*, 2023). O estudo de Zhang *et al.* (2019a), por exemplo, valoriza a recuperação dos materiais catódico e anódico das baterias como prática fundamental para a reciclagem. A metodologia utilizou técnicas de pirólise para remover ligantes orgânicos e recuperar 98,23% dos materiais catódicos e 98,89% dos materiais anódicos, a uma temperatura de 500 °C por 15 minutos.

Nesse contexto, Cao *et al.* (2021) desenvolveram um processo eletroquímico inovador, com perspectiva ambiental, para a recuperação dos materiais anódicos de baterias de íons de lítio em desuso – especialmente o grafite e o cobre, como mostrado na Figura 12. O grafite recuperado foi reintegrado ao novo material anódico, revelando não apenas a eficácia do método, mas também o desempenho eletroquímico e a viabilidade econômica no gerenciamento dessas baterias.

Figura 12 – Processo inovador de dissolução do lítio e recuperação do cobre e grafite



Fonte: Adaptado de Cao *et al.* (2021).

Segundo Leal *et al.* (2023), a reciclagem de baterias torna os materiais recuperados aptos ao desenvolvimento de sensores eletroquímicos. O estudo de Gonçalves *et al.* (2015) dedicou-se ao desenvolvimento de um sensor de glicose não enzimático a partir do cobalto recuperado da reciclagem de baterias de íons de lítio. A proposta concentrou-se na eletrodeposição do cobalto em um substrato de aço inoxidável AISI 430 (sigla em inglês para *American Iron and Steel Institute*, que pode ser traduzida como Instituto Americano do Ferro e do Aço), demonstrando seu potencial e ótima sensibilidade analítica como sensor de glicose viável. Ribeiro, Freitas & Freitas (2021) também estudaram a recuperação do grafite e dos metais das baterias de íons de lítio para o desenvolvimento de sensores eletroquímicos de óxido de grafeno reduzido (rGO, sigla em inglês para *reduced Graphene Oxide*), os quais apresentaram melhorias das propriedades eletroquímicas (como a pseudocapacitância) e viabilizaram a proposta sustentável do sensor não

enzimático e funcional.

Outra linha de pesquisa bem sucedida é o uso dos óxidos obtidos da reciclagem de baterias de íons de lítio em catalisadores. Esses materiais têm demonstrado excelente atividade catalítica em reações químicas de decomposição de poluentes, oferecendo um caminho alternativo para a reciclagem, além de favorecer o desenvolvimento de tecnologias voltadas à remediação ambiental.

Nesse cenário, Lv *et al.* (2026) desenvolveram uma abordagem sustentável para contornar os efeitos negativos do gerenciamento de baterias de íons de lítio no fim de sua vida útil e os desafios das mudanças climáticas. A proposta envolve a criação de um catalisador trimetálico com alto desempenho de conversão catalítica de metano (CH_4) (98,01%) e dióxido de carbono (CO_2) (98,12%), desenvolvido a partir da recuperação de lítio por torrefação, e de níquel, cobalto e manganês por colixiviação em baterias.

Segundo Feng *et al.* (2024), uma das primeiras tecnologias aplicadas aos materiais recuperados de baterias de íons de lítio foi o uso como eletrocatalisadores, necessários para a geração sustentável de hidrogênio.

A pesquisa de Natarajan *et al.* (2017) propôs um método simples de recuperação de manganês e cobalto livres de surfactantes – metais de transição 3D encontrados em baterias de íons de lítio. O método desenvolvido demonstrou potencial na síntese de espinélio esférico de manganês-cobalto (MnCo_2O_4) e no desempenho eletrocatalítico da reação de evolução de oxigênio em meio alcalino.

Liu *et al.* (2021) projetaram um catalisador bifuncional desenvolvido a partir de um compósito de nitreto de cobalto tridimensional, obtido pela recuperação do cobalto de baterias de íons de lítio, mostrando eficiência na divisão da água. Utilizando tecnologia de reciclagem solvometalúrgica, Chen *et al.* (2024) recuperaram $\text{LiNi}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{O}_2$ para o desenvolvimento de um eletrocatalisador de hidróxido de níquel-cobalto-manganês voltado à reação de evolução de oxigênio – um processo eletroquímico de geração de oxigênio através da oxidação da água ou de íons de hidróxido.

Os metais de transição presentes nas baterias de íons de lítio, como níquel, cobalto e manganês, tornam ideais as técnicas de reciclagem desses equipamentos para recuperação metálica e aplicação em processos catalíticos (FENG *et al.*, 2024). Os fotocatalisadores são um exemplo dessa aplicação. Lou *et al.* (2024) investigaram uma proposta para solucionar dois problemas atuais: resíduos plásticos e baterias. Em seu estudo, foi desenvolvido um catalisador fototérmico para a reciclagem de poliésteres residuais, a partir do óxido de lítio e cobalto de baterias no fim de sua vida útil. O estudo resultou em uma metodologia eficaz para o gerenciamento desses resíduos, com perspectiva ambientalmente sustentável.

Propostas mais recentes também têm estudado a utilização dos produtos da reciclagem de baterias no desenvolvimento de supercapacitores e pseudocapacitores (LEAL *et al.*, 2023). A pesquisa de Schiavi *et al.* (2021), por exemplo, desenvolveu um processo que produz diretamente materiais de eletrodos nanoestruturados de alto desempenho para supercapacitores assimétricos,

mostrando-se viável para dispositivos avançados de armazenamento de energia. Aboelazm *et al.* (2018) investigaram a eletrodeposição aprimorada por campo magnético de nanoestruturas hierárquicas de óxido de cobalto obtido de baterias de íons de lítio usadas, destacando um método altamente eficiente na recuperação desse material e na melhoria de seu desempenho eletroquímico. O estudo de Kuku (2025) demonstrou a eficácia da reciclagem de baterias de íons de lítio por meio do desenvolvimento de eletrodos de capacitor assimétrico a partir de nanoflocos de óxido de cobre poroso e óxido de grafeno reduzido, obtidos dos resíduos das folhas de cobre e grafite, respectivamente.

Adicionalmente, o aproveitamento de compostos metálicos extraídos de baterias de íons de lítio representa um passo importante em diversas aplicações, como no campo dos compósitos e materiais estruturais. O reaproveitamento dos metais e o desenvolvimento de nanomateriais provenientes da reciclagem de baterias de íons de lítio têm se tornado uma área atrativa e apresentado uma nova vertente a ser explorada: a criação de polímeros reforçados e compósitos poliméricos com propriedades mecânicas e físicas adequadas para aplicações específicas – uma alternativa sustentável e economicamente viável para resíduos que, de outra forma, seriam descartados.

2.2 NANOTECNOLOGIA E COMPÓSITOS COM RESÍDUOS DE BATERIAS

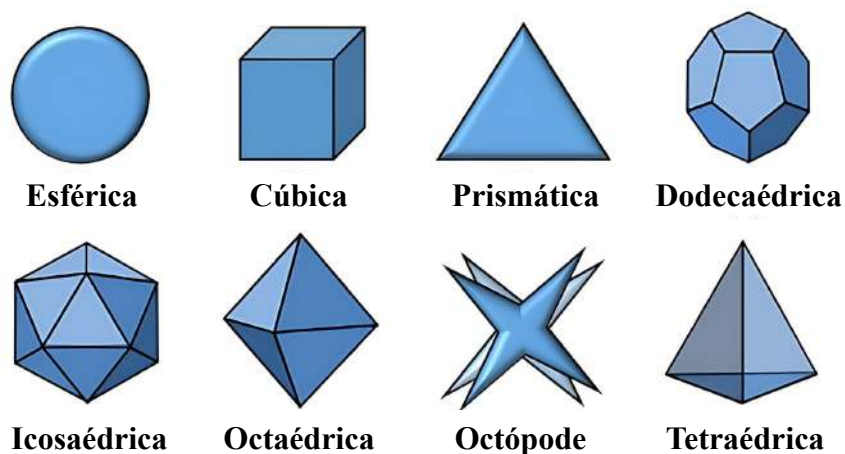
A nanotecnologia é uma área multidisciplinar que vem ganhando espaço nos últimos anos, especialmente relacionada ao desenvolvimento de novos produtos (FECHINE, 2020). As abordagens trazidas por esse setor envolvem a manipulação de materiais em escala nanométrica, isto é, entre 1 e 100 nanômetros (nm), o que equivale a 10^{-9} – 10^{-7} metro, e têm sido impulsionadas pelas políticas e pelo crescimento econômico dos países.

Uma classificação mais geral dos nanomateriais diz respeito à sua dimensionalidade estrutural, o que é fundamental para compreender suas propriedades e aplicações (HIMANEN; RINKE; FOSTER, 2018). Nanomateriais do tipo 0D (ou zero dimensional) possuem todas as dimensões em escala inferior à nanométrica (100 nm), como as nanopartículas que, por possuírem ampla área superficial em relação ao volume, facilitam a interação com outros materiais e resultam na alteração – na maioria das vezes benéfica – das propriedades físicas, térmicas e mecânicas em compósitos. Nanomateriais 1D (unidimensionais) possuem uma das dimensões em escala nanométrica, enquanto as demais são maiores. Entre os expoentes desse grupo estão os nanofios e nanotubos de carbono, amplamente aplicados na eletrônica. Nanomateriais 2D (bidimensionais) possuem escala nanométrica em duas de suas dimensões e apresentam-se, geralmente, na forma de filmes ou camadas de átomos, como é o caso do grafeno, uma camada de átomos de carbono dispostos hexagonalmente. Por fim, os nanomateriais 3D (tridimensionais) possuem escala nanométrica em todas as dimensões, podendo formar estruturas mais complexas, como aerogéis (FECHINE, 2020).

As nanopartículas podem assumir diversas geometrias, como apresentado na Figura 13;

entretanto, como mencionado anteriormente, são consideradas estruturas do tipo 0D, o que lhes confere propriedades físicas e mecânicas únicas, distintas daquelas encontradas nos materiais em macroescala (FECHINE, 2020).

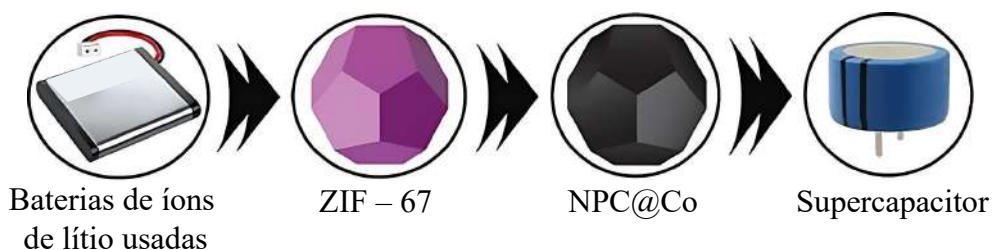
Figura 13 – Diferentes formatos geométricos das nanopartículas



Fonte: Adaptado de Fechine (2020).

No contexto da nanotecnologia, considerando as abordagens do desenvolvimento sustentável e da economia circular, especificamente quando o assunto é a reciclagem de baterias e a recuperação metálica de seus componentes, Chaudhary *et al.* (2022) propõem um método eficiente de lixiviação com ácido cítrico, capaz de recuperar, por precipitação posterior, o cobalto na forma de uma estrutura metal-orgânica porosa do tipo zeolítica imidazolato (ZIF – 67, acrônimo em inglês para *Zeolitic Imidazolate Framework – 67*), a partir do óxido de lítio e cobalto (LiCoO_2). Essa recuperação possibilita o desenvolvimento de um compósito nanoporoso de carbono/cobalto (NPC@Co, sigla em inglês para *Nanoporous Carbon/Cobalt*) e sua viabilidade de aplicação em supercapacitores, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Etapas do desenvolvimento de supercapacitores a partir de baterias de íons de lítio



Fonte: Adaptado de Chaudhary *et al.* (2022).

Outra alternativa nesse sentido é a utilização dos compostos obtidos da reciclagem das baterias como base para materiais nanoparticulados. Segundo Mandal & Kumar (2025), o óxido de grafeno (GO, sigla em inglês para *Graphene Oxide*) e o óxido de grafeno reduzido (rGO), quando incorporados como micro ou nanopartículas, tornam-se ideais para aplicações em sistemas de

armazenamento elétrico. A proposta dessa pesquisa foi desenvolver um nanocompósito de carbonato de cálcio (CaCO_3) dopado com rGO (em 5%), obtido a partir das hastes de grafite de baterias do tipo lápis. O nanocompósito fabricado, além de configurar-se como uma alternativa sustentável, apresenta ótimo desempenho eletroquímico, especialmente quanto à capacitância específica, sendo ideal para aplicações em supercapacitores.

De acordo com Iqbal, Harcen & Haque (2024), os compósitos são constituídos pela união de dois ou mais materiais distintos que atuam de forma sinérgica na criação de um novo material com desempenho superior em comparação aos materiais convencionais. Os benefícios obtidos pelos compósitos os tornam atraentes para aplicação em diferentes tecnologias.

A pesquisa de Zhao, Wu & Bai (2015) apresenta propostas e resultados relevantes nesse contexto, como a análise das propriedades térmicas dos compósitos formados pela matriz polimérica de polidimetilsiloxano (PDMS) preenchida com espuma (GF, sigla em inglês para *Graphene Foam*) e folha de grafeno (GS, sigla em inglês para *Graphene Sheet*), em 0,7% em peso.

Além das análises morfológicas e microestruturais, os resultados dessa pesquisa observaram o aumento da condutividade térmica do compósito (a 27 °C), sendo de $0,46 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ para o GS/PDMS e $0,56 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ para o GF/PDMS, em comparação com o polidimetilsiloxano puro, que apresentou $0,19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, demonstrando viabilidade no contexto do gerenciamento térmico.

Considerando a melhoria do desempenho de nanocompósitos baseados em grafeno, Ma *et al.* (2014) estudaram a modificação interfacial na forma de plaquetas de grafeno e sua integração em uma matriz polimérica do tipo epóxi, visando alcançar um nanocompósito com alta integridade estrutural, boa dispersão e melhoria das propriedades elétricas e mecânicas.

Sendo assim, é evidente o potencial inovador da abordagem sustentável de reaproveitamento dos resíduos de baterias, em especial quando utilizados como material de preenchimento em matrizes poliméricas. Nesse contexto, a seleção da matriz é de fundamental importância e deve considerar a avaliação do custo-benefício e questões relacionadas ao processamento, o que torna plausíveis as aplicações com o polidimetilsiloxano (PDMS), que, além de reunir essas características, tem sido utilizado em diversas aplicações científicas e tecnológicas atuais.

2.3 POLIDIMETILSILOXANO E SUAS ABORDAGENS NA ATUALIDADE

2.3.1 PDMS: características gerais e manuseio

O polidimetilsiloxano (PDMS) é um polímero elastomérico classificado como orgânico sintético, que apresenta características viscoelásticas (GIDDE; PAWAR, 2017). Estruturalmente, esse material é formado por unidades repetitivas de silício e oxigênio – Si-O-Si, chamadas de siloxanos (LIMA, 2025), com grupos metila (CH_3) ligados ao silício, o que confere elevada flexibilidade à cadeia polimérica, além de estabilidade térmica e química (WOLF; SALIEB-BEUGELAAR; HUNZIKER, 2018).

Sobre o manuseio desse material, Morbioli, Speller & Stockton (2020) identificam um obstáculo na fabricação de dispositivos de PDMS por meio de moldes: a inconsistência superficial. O problema mais recorrente desse fenômeno é o aprisionamento de bolhas de ar durante o manuseio da matriz polimérica, especialmente no processo de moldagem, que deve ser minimamente invasivo.

A viscosidade natural do polímero dificulta a eliminação de bolhas de ar e, para contornar esse efeito, o processo mais comum é a utilização de uma câmara de vácuo para desgaseificação (MORBIOLI *et al.*, 2019). Para que esse procedimento ocorra de maneira eficaz, o composto formado deve ser levado à câmara – dentro ou fora do molde final –, onde a diferença de pressão entre a bolha e o ambiente favorece sua subida à superfície e posterior colapso. Outros métodos menos comuns de desgaseificação utilizam equipamentos como centrífugas (LAFRATTA *et al.*, 2004) e sondas (LAKE *et al.*, 2015).

A reação de cura do PDMS à temperatura ambiente necessita de 48 horas (MORBIOLI; SPELLER; STOCKTON, 2020); entretanto, métodos mais rápidos, como o uso de fornos e estufas convencionais, podem reduzir esse tempo para poucas horas.

A escolha desse procedimento de cura térmica deve levar em consideração as limitações do molde, de forma a não comprometer sua integridade estrutural e dimensional. Abordagens mais recentes desenvolveram moldes metálicos – como o fabricado em alumínio por Yousuff *et al.* (2017) –, e até poliméricos – como proposto por Borg *et al.* (2023), que utilizaram moldes em PLA (sigla em inglês para *Polylactic Acid*, que pode ser traduzida como ácido polilático), e por Iuliano *et al.* (2020), que propuseram o uso de ABS (sigla em inglês para *Acrylonitrile Butadiene Styrene*, que pode ser traduzida como acrilonitrila butadieno estireno).

O uso de outras abordagens para a cura térmica do PDMS tem se mostrado eficaz na redução do tempo do processo, como é o caso da aplicação de radiação por micro-ondas (MORBIOLI *et al.*, 2019). Embora esse processo promova altas taxas de cura, reduzindo o tempo de fabricação de estruturas, pode estar relacionado à formação de regiões parcialmente curadas e deformações, devido à dificuldade de liberação da energia térmica superficial em curto período (MORBIOLI; SPELLER; STOCKTON, 2020).

Após a reação de cura, parte do composto de PDMS formado apresenta resquícios do pré-polímero que não reagiu e oligômeros de baixo peso molecular, que dependem da proporção de monômero e reticulador, podendo atingir 3% em massa quando a proporção utilizada é de 10:1 (MORBIOLI; SPELLER; STOCKTON, 2020). Esses resquícios, que podem comprometer a dinâmica fluidica em certas aplicações, normalmente são eliminados com a aplicação de solventes adequados, dada a constatação do inchamento da matriz polimérica em contato com solventes orgânicos (LEE; PARK; WHITESIDES, 2003).

Uma estratégia utilizada para a redução dos oligômeros de baixo peso molecular na matriz polimérica é prolongar a cura térmica do PDMS por meio de um processo de envelhecimento térmico (EDDINGTON; PUCCINELLI; BEEBE, 2006), o que, embora vantajoso nesse aspecto, inviabiliza prototipações rápidas do polímero.

2.3.1.1 O PDMS Sylgard™ 184 – Dow Corning®

Quando o assunto é microfabricação, os elastômeros têm se mostrado como uma alternativa com grande potencial em relação aos materiais convencionais, como vidro e silício (ILIESCU *et al.*, 2012). Esses polímeros são facilmente manuseáveis, e o polidimetilsiloxano (PDMS) é o mais conceituado nesse quesito, representando mais de 10% das pesquisas na área (MORBIOLI; SPELLER; STOCKTON, 2020).

Dentre os modelos comercialmente disponíveis, o PDMS Sylgard™ 184, da Dow Corning®, aparece com maior frequência em pesquisas relacionadas ao desenvolvimento tecnológico em micro e macroescala, segundo Lima (2025). A proporção recomendada entre monômero e reticulador é de 10:1, segundo Morbioli, Speller & Stockton (2020), que reitera que essa prática é bem-sucedida em diversos estudos. Ainda de acordo com esse guia prático de prototipagem, proposto por Morbioli, Speller & Stockton (2020), a proporção do agente de cura modifica a densidade de reticulação do material e, por conseguinte, suas propriedades mecânicas (WANG; VOLINSKY; GALLANT, 2014).

O PDMS Sylgard™ 184 é um elastômero incolor de polidimetilsiloxano, disponível comercialmente na forma bicomponente líquida, composta por base e agente de cura (reticulador), os quais devem ser incorporados por mistura mecânica ou manual (THE-DOW-CHEMICAL-COMPANY, 2024).

Esse composto possibilita a cura térmica de forma estável em temperatura ambiente ou mediante aquecimento. Segundo o fabricante, a cura ocorre sem reação exotérmica e de maneira independente da espessura da geometria a ser fabricada. Após a cura, obtém-se um elastômero flexível, capaz de operar na faixa de -45 a 200 °C e que apresenta propriedades desejáveis para diferentes tecnologias (THE-DOW-CHEMICAL-COMPANY, 2024).

Estudos recentes para o PDMS Sylgard™ 184 tornaram possíveis medições de diversos parâmetros e propriedades, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades complementares do PDMS Sylgard™ 184 reportadas na literatura

Propriedade	Valor	Referência
Difusividade térmica [$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	0,1454	Correa <i>et al.</i> (2025)
Módulo de elasticidade [MPa]	~1–3	Johnston <i>et al.</i> (2014)
Transmitância (390–780 nm) [%]	74–75	Sales <i>et al.</i> (2021)

Fonte: Dados compilados da literatura descrita (2026).

A Tabela 2 apresenta algumas outras propriedades adicionais fornecidas pelo fabricante do PDMS Sylgard™ 184.

Tabela 2 – Propriedades físico-químicas do PDMS Sylgard™ 184 – Dow Corning®

Propriedade	Valor
Viscosidade (base) [Pa·s]	5,1
Viscosidade (mistura) [Pa·s]	3,5
Condutividade térmica [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,27
Massa específica (curado) [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	1,03
Tempo de cura a 25 °C [h]	48
Cura térmica a 100 °C [min]	35
Cura térmica a 125 °C [min]	20
Cura térmica a 150 °C [min]	10
Coefficiente de expansão térmica linear [$\text{ppm}\cdot\text{°C}^{-1}$]	340
Resistência à tração [MPa]	6,7
Temperatura máxima de operação contínua [°C]	150

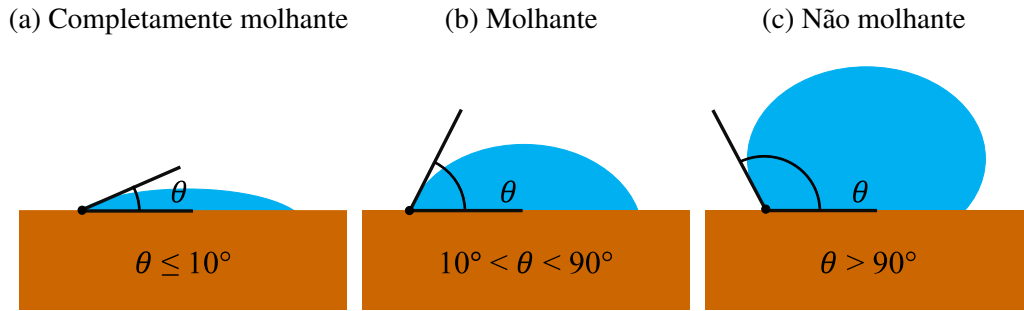
Fonte: Adaptado de The-Dow-Chemical-Company (2024).

2.3.2 Hidrofobicidade do PDMS

A hidrofobicidade do PDMS pode limitar aplicações que requerem contato com material biológico, o que tem aberto margem, entre outros aspectos, para estudos tecnológicos de modificação superficial (GOKALTUN *et al.*, 2017). Essa hidrofobicidade pode comprometer o preenchimento, por ação capilar, de microcanais, a depender da aplicação (WOLF; SALIEB-BEUGELAAR; HUNZIKER, 2018).

Vilaronga (2024) indica que a análise do ângulo de contato de uma superfície com um fluido (θ), em [°], é essencial para classificar a sua molhabilidade, que pode caracterizar a superfície como completamente molhante (Figura 15a), molhante (Figura 15b) ou não molhante (Figura 15c). A hidrofobicidade está relacionada à tendência de superfícies apolares em repelir a água, enquanto superfícies hidrofílicas apresentam afinidade com as moléculas de água. Esse comportamento reflete a interação superfície-água e permite sua categorização em função do ângulo de contato em: hidrofílica ($\theta < 90^\circ$), hidrofóbica ($\theta > 90^\circ$) ou super-hidrofóbica ($\theta > 150^\circ$) (ZANCAN, 2017). Dito isso, o ângulo de contato de superfícies de PDMS com a água é cerca de 108° , o que confirma sua hidrofobicidade, segundo Gokaltun *et al.* (2019).

Figura 15 – Classificação da molhabilidade de superfícies baseada no ângulo de contato



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Vilaronga (2024).

2.3.2.1 Modelos matemáticos de previsão do ângulo de contato

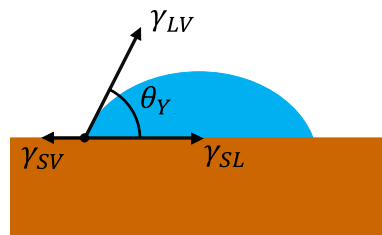
De acordo com Zancan (2017), a hidrofobicidade e a hidrofilicidade de superfícies são fatores que dependem das interações das interfaces líquido-gás, sólido-gás e sólido-líquido, em fenômenos que envolvem ligações de Van der Waals e pontes de hidrogênio.

No início do século XIX, Thomas Young estudou o ângulo de contato com base no equilíbrio de forças nos pontos de contato das interfaces, estabelecendo um equacionamento que não considerava a rugosidade superficial do sólido (ZANCAN, 2017). O Modelo de Young é apresentado na Equação 2.1, cujos parâmetros são representados na Figura 16.

$$\cos(\theta_Y) = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (2.1)$$

Nessa equação, γ representa a tensão superficial nas interfaces sólido-gás (índice: SV), sólido-líquido (SL) e líquido-gás (LV), todas expressas em $[N \cdot m^{-1}]$, enquanto θ_Y é o ângulo de contato proposto pelo modelo, em $[\circ]$.

Figura 16 – Tensões superficiais na gota sobre a superfície de acordo com o Modelo de Young



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Particheli (2015).

Para suprir essa limitação do modelo anterior, Robert Wenzel, em 1936, propôs um modelo que considerasse a rugosidade da superfície por meio de um fator de rugosidade (r), sempre maior que 1, definido pela razão entre a área real da superfície e a área lisa contida nela (ZANCAN, 2017). Esse modelo adota um comportamento penetrante do líquido nas irregularidades superficiais, sendo expresso na Equação 2.2, na qual θ_W é o ângulo de contato proposto pelo Modelo de Wenzel, em $[\circ]$ (WENZEL, 1936).

$$\cos(\theta_W) = r \cdot \cos(\theta_Y) \quad (2.2)$$

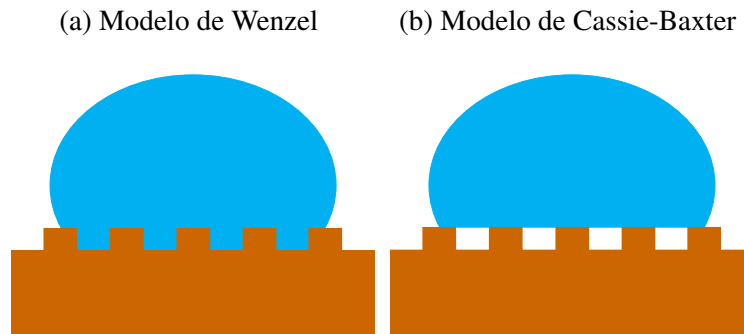
Uma terceira abordagem foi estudada em 1944 por Cassie e Baxter, que também levaram em consideração as irregularidades e rugosidades da superfície. Esse modelo descreve o ângulo de contato formado no caso da não penetrabilidade total do líquido na superfície, fazendo com que a gota se posicione nas regiões mais altas da superfície e forme bolsas de ar entre o líquido e o sólido. A Equação 2.3, mostrada a seguir, apresenta a definição do ângulo de contato pelo Modelo de Cassie-Baxter (θ_{CB}), em $[\circ]$ (CASSIE; BAXTER, 1944).

$$\cos(\theta_{CB}) = [\beta \cdot \cos(\theta_Y)] - (1 - \beta) \quad (2.3)$$

Nessa equação, β é a fração de área sólida em contato com o líquido, adimensional $[-]$.

Uma comparação entre esses dois últimos modelos é apresentada na Figura 17, com destaque para o Modelo de Wenzel (Figura 17a) e o Modelo de Cassie-Baxter (Figura 17b).

Figura 17 – Penetrabilidade da gota na superfície rugosa de acordo com os Modelos de Wenzel e de Cassie-Baxter



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Coninck, Dunlop & Huillet (2011).

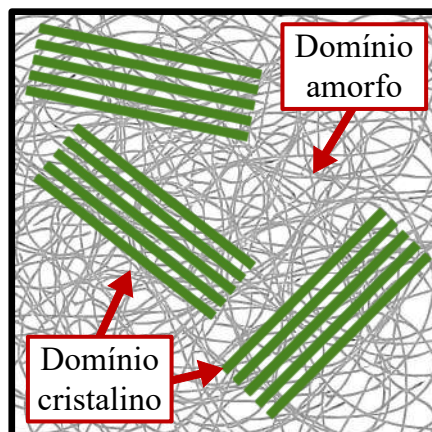
2.3.3 Mecanismos das propriedades de polímeros – discussão

2.3.3.1 Transferência de calor: condutividade térmica e calor específico

Os materiais poliméricos possuem, de maneira geral, valores muito baixos de condutividade térmica, o que classifica a maioria dos polímeros como isolantes térmicos (GUO *et al.*, 2020). Essa propriedade térmica depende de sua estrutura, pois a predominância de regiões amorfas cerceia os modos vibracionais da matriz (HUANG; QIAN; YANG, 2018).

Na Figura 18 é apresentada a estrutura típica da maioria dos materiais poliméricos. Nela, é possível observar a presença de regiões cristalinas – onde existe alinhamento – e regiões amorfas, nas quais as cadeias poliméricas se organizam de forma aleatória e entrelaçada.

Figura 18 – Representação do domínio amorfo e cristalino em uma matriz polimérica



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Huang, Qian & Yang (2018).

No domínio cristalino, o alinhamento das cadeias poliméricas promove uma melhor transferência de calor, em razão da proximidade entre as cadeias (GUO *et al.*, 2020). No domínio amorfo, o fenômeno é contrário e, aliado à elevada massa relativa das moléculas e à polidispersividade, cria-se um cenário de isolamento térmico.

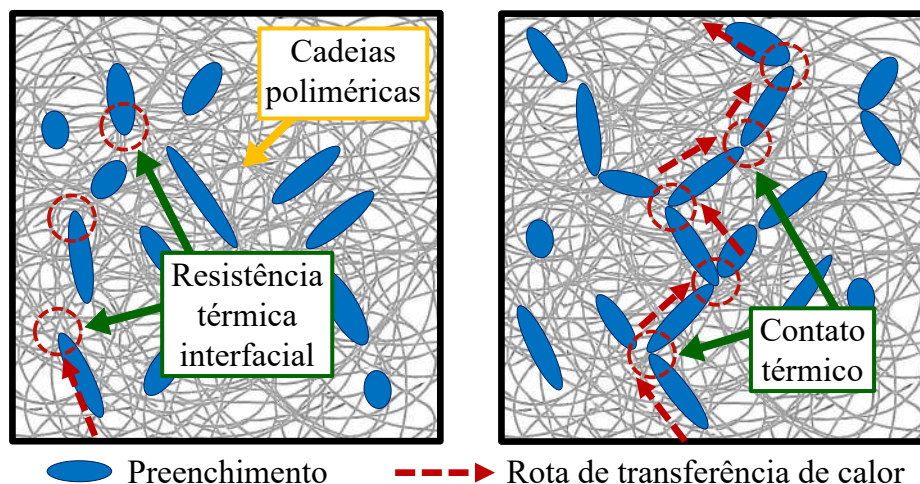
No contexto da condução térmica, Kim, Hong & Jang (2019) afirmam que a propagação do fônon é responsável pela transferência de calor, na qual essa onda atômica atua como transportadora de energia térmica. Em materiais sólidos, a condutividade térmica está atrelada à movimentação e à velocidade dos fônons, o que, para os metais, favorece os altos índices de condutividade térmica. Por outro lado, o espalhamento dos fônons na matriz polimérica, em conjunto com o baixo domínio cristalino e a presença de impurezas, compromete sua transferência de calor.

Uma alternativa, bastante abordada em pesquisas recentes, é a utilização de materiais de preenchimento com alta condutividade térmica para o desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica, e os avanços nanotecnológicos atuais permitiram uma melhor compreensão dos fenômenos de transferência de calor envolvidos na inserção de nanopartículas com propriedades térmicas em polímeros, abordando aspectos que vão além do material, envolvendo também sua morfologia e topologia (HUANG; QIAN; YANG, 2018).

Embora o teor de nanopartículas influencie diretamente o resultado final da condutividade térmica do compósito, observa-se que altos índices de preenchimento contribuem para a formação de uma rede termicamente condutora, que, devido à formação de um caminho de menor resistência térmica, facilita a transferência de calor, o que dificilmente ocorre em baixas concentrações (HUANG; QIAN; YANG, 2018). Essa é a teoria do caminho da condução térmica (GUO *et al.*, 2020), a mais aceita para explicar o fenômeno da transferência de calor em compósitos, e ilustrada na Figura 19.

Figura 19 – Rota de transferência de calor em compósitos poliméricos

Sem rede termicamente condutora Com rede termicamente condutora



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Huang, Qian & Yang (2018).

Segundo essa teoria, baixas cargas de preenchimento formam uma estrutura “mar-ilha” entre as nanopartículas condutoras, o que reduz significativamente a condutividade térmica (GUO *et al.*, 2020).

A percolação térmica é outro mecanismo usado para descrever esse fenômeno de transferência de calor. Nessa teoria, a formação da rede termicamente condutora no material ocorre apenas a partir de uma concentração crítica de partículas condutoras, a qual não é fácil de ser determinada (GU *et al.*, 2014), nem condiz com diferentes estudos, que sugerem um aumento gradual da condutividade térmica.

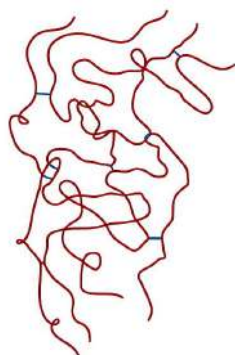
2.3.3.2 Carregamento e ruptura: propriedades mecânicas

Os elastômeros possuem propriedades que os diferenciam dos demais materiais, entre as quais se destaca a elasticidade, que possibilita altos índices de deformação e o retorno à forma original, devido à sua estrutura naturalmente amorfa formada por cadeias moleculares com ligações cruzadas e cadeias espiraladas (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

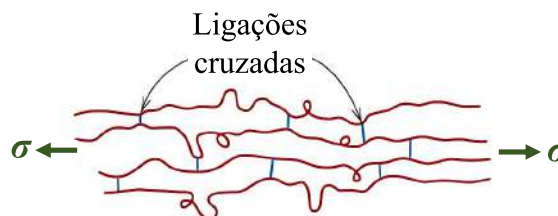
Quando um carregamento de tração é aplicado aos elastômeros, ocorre um desenrolamento parcial das cadeias poliméricas, seguido do alinhamento no sentido da tensão aplicada. Ao cessar a carga, essas estruturas retornam à posição original, enrolando-se novamente (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). O mecanismo que ocorre nos polímeros é apresentado na Figura 20, destacando a configuração das cadeias poliméricas sem aplicação de tensão (Figura 20a) e os efeitos da deformação elástica sob tensão (Figura 20b).

Figura 20 – Carregamento em cadeias poliméricas

(a) Sem aplicação de tensão



(b) Deformação elástica sob tensão



Fonte: Adaptado de Callister & Rethwisch (2016).

Sendo assim, a análise das propriedades dos polímeros – em especial do PDMS – é essencial para viabilizar diferentes propostas tecnológicas, bem como para compreender os mecanismos responsáveis pela melhoria desses parâmetros por meio do desenvolvimento de compósitos funcionais.

2.3.4 Nanocompósitos de PDMS: estrutura, propriedades e aplicações avançadas

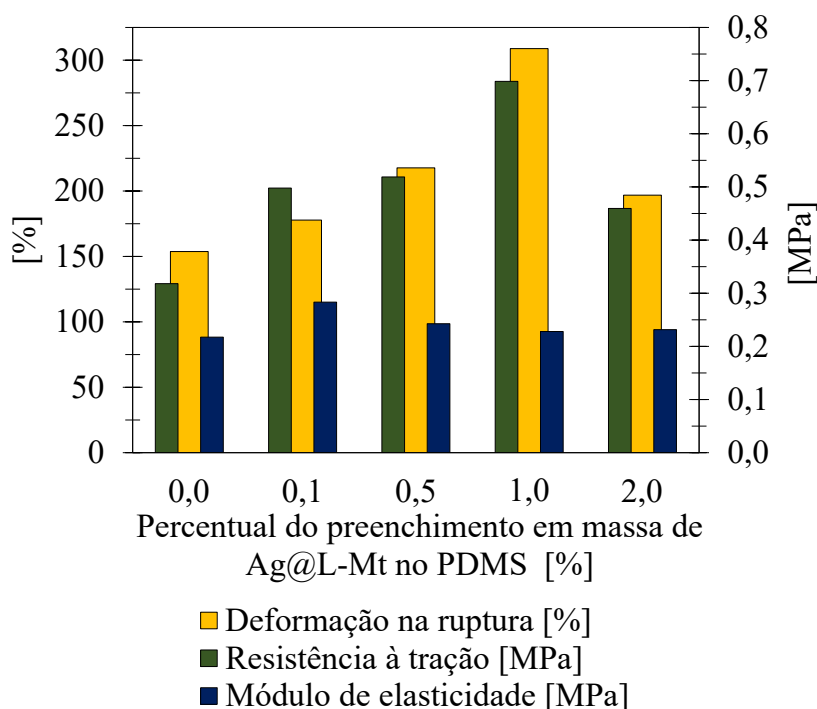
Estudos recentes demonstram que compósitos de PDMS com nanopartículas apresentam avanços notáveis em diversas áreas. Orikasa *et al.* (2024) exploram o desenvolvimento e a caracterização de compósitos de dissulfeto de tungstênio (WS_2) e PDMS, fabricados por liofilização seguida por infiltração assistida por vácuo. Os resultados dessa pesquisa evidenciam a proposta e a necessidade do desenvolvimento de dispositivos flexíveis de dissipação térmica, exibindo condutividade térmica de $0,11 \pm 0,01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, em comparação com $0,07 \pm 0,01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ do PDMS puro estudado. As análises mecânicas demonstraram um aumento no módulo de elasticidade de 156,14%, enquanto as elétricas apresentaram um aumento de 7329 vezes na condutividade elétrica.

Dentro das abordagens de gerenciamento térmico em eletrônicos deformáveis, Bark *et al.* (2021) estudaram uma alternativa para a condução elétrica parasitária observada em microcompósitos de EGaIn (acrônimo em inglês para *Eutectic Gallium-Indium*, que pode ser traduzida como liga de gálio-índio eutético) em elastômeros: o desenvolvimento de um compósito termicamente condutor com EGaIn de superfície modificada por ultrassom. Essa modificação superficial possibilitou melhor dispersão das partículas no PDMS, resultando em um compósito que mantém propriedades elétricas isolantes (baixa perda dielétrica) enquanto oferece condutividade térmica aprimorada, atingindo $1,16 \pm 0,09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ com 44% em volume de EGaIn.

No setor médico, o aperfeiçoamento de nanocompósitos poliméricos tem sido estudado para a administração de medicamentos. O uso de PDMS agregado com nanopartículas de prata (Ag) e montmorilonita modificada com lecitina (Ag@L-Mt) tem sido empregado para, além de melhorar as propriedades do material, garantir biocompatibilidade e viabilidade microbiológica.

A caracterização microestrutural desse compósito, estudada por Huang *et al.* (2022), apontou boa dispersão e distribuição do material particulado na matriz polimérica. As análises térmicas e mecânicas indicaram, respectivamente, boa estabilidade térmica e aumento da resistência à tração e do alongamento na quebra dos nanocompósitos, como mostrado na Figura 21. No contexto médico, a eficiência antibacteriana viabilizou a proposta, juntamente com a biocompatibilidade do compósito.

Figura 21 – Propriedades mecânicas obtidas para os compósitos de PDMS/Ag@L-Mt



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Huang *et al.* (2022).

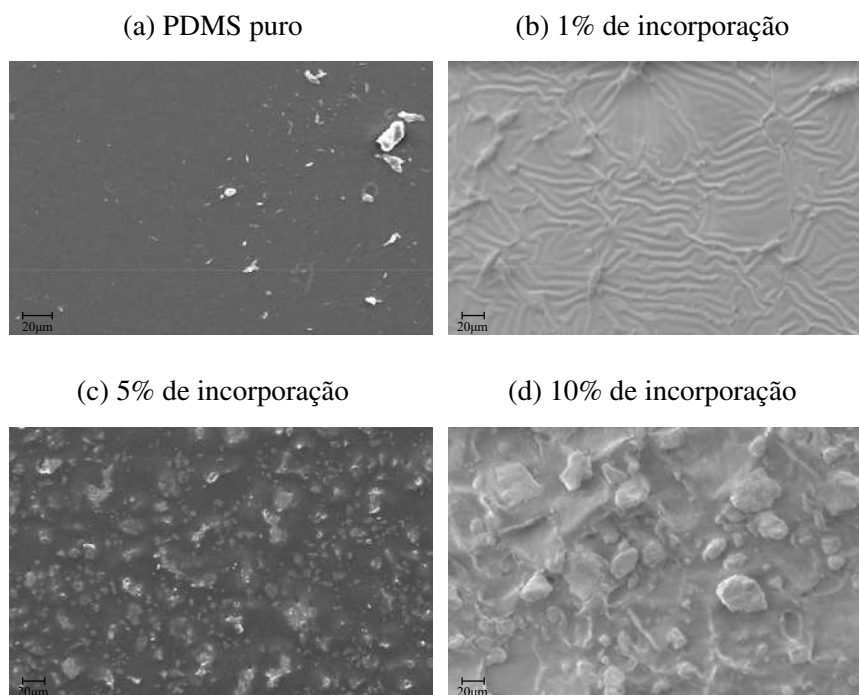
De acordo com Onyekanne *et al.* (2022), os compósitos poliméricos no setor biomédico devem atender, além das propriedades físicas, à biocompatibilidade, essencial para aplicações no corpo humano. Nesse contexto, nanocompósitos de PDMS são ótimos candidatos. O estudo proposto analisa o desenvolvimento de compósitos de PDMS e magnetita (nanopartículas de óxido de ferro do tipo Fe_3O_4 , de alta pureza, com diâmetro médio de 15–20 nm), nas concentrações de 1%, 5% e 10% em massa. O processo de incorporação envolveu mistura mecânica, degaseificação para retirada de bolhas de ar, vertimento em moldes e cura térmica.

A caracterização desses compósitos revelou uma distribuição não homogênea de nanopartículas na matriz polimérica, marcada por aglomerações e microfissuras à medida que aumentava a concentração do reforço. Termicamente, observou-se maior estabilidade do compósito em comparação com o PDMS puro. Mecanicamente, o comportamento tensão-deformação dos espécimes testados mostrou-se aparentemente frágil, sendo que a aglomeração das nanopartículas pode ter influenciado os menores resultados de resistência para a amostra de 10%. Por outro lado, o módulo de elasticidade apresentou crescimento progressivo, atingindo $1,873 \pm 0,01$ MPa, $2,043 \pm 0,1$ MPa, $2,234 \pm 0,14$ MPa e $2,544 \pm 0,05$ MPa para as amostras de PDMS puro, 1%, 5%

e 10%, respectivamente. Essa proposta inovadora tem sido significativa para o tratamento do câncer mamário por técnicas de hipertermia localizada e ablação fototérmica.

Os resultados de microscopia são apresentados na Figura 22, que aborda os diferentes teores estudados, sendo o primeiro deles referente ao PDMS puro (Figura 22a), e os demais com: 1% (Figura 22b), 5% (Figura 22c) e 10% (Figura 22d) em massa de magnetita.

Figura 22 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da incorporação de magnetita no PDMS



Fonte: Adaptado de Onyekanne *et al.* (2022).

De acordo com Diekmann, Omelan & Giese (2021), a incorporação de nanocargas em matrizes poliméricas, embora produza nanocompósitos com propriedades melhoradas, está relacionada à formação de aglomerados e falhas de distribuição em sua estrutura. Na pesquisa desenvolvida por eles, foram estudados diferentes pré-tratamentos em nanotubos de carbono multicamadas (CNTs) para intensificar a dispersão no PDMS (PDMS Sylgard™ 184). O método proposto testou a agitação de CNTs por ondas sonoras de alta frequência (ultrassom) – um processo denominado sonicação – com solventes como tetrahidrofurano (THF), acetona e clorofórmio para pré-dispersão, enquanto ácido oleico, dodecilbenzeno sulfonato de sódio (SDBS, sigla em inglês para *Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate*) e éter laurílico polioxietileno (Brij35) foram empregados para funcionalização física durante o processo. O procedimento seguiu com evaporação e adição do polímero, e os compósitos desenvolvidos foram submetidos a técnicas de caracterização microestrutural, espectroscópica, mecânica e térmica.

Os resultados evidenciaram o aumento da condutividade elétrica do compósito e a necessidade de etapas de pré-dispersão para reduzir aglomerados no nanomaterial. Por outro lado, resíduos do solvente (em especial do THF) causaram amolecimento do compósito e, conseqüentemente,

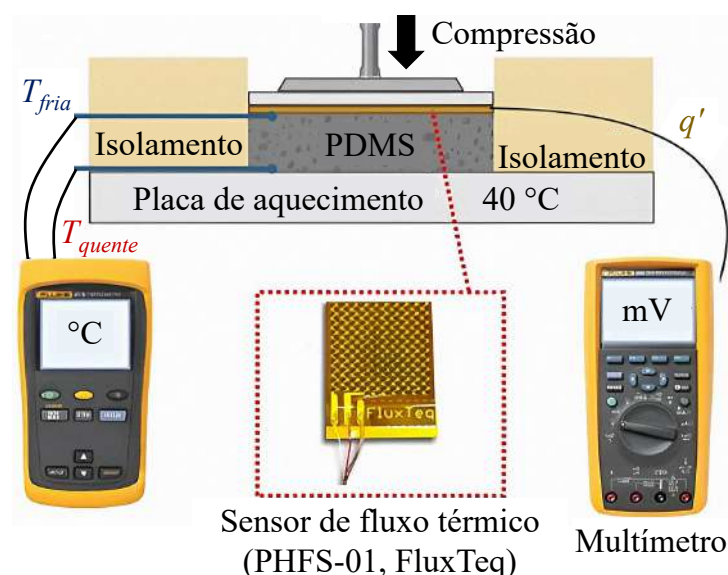
redução das propriedades mecânicas, embora a dispersão fosse melhor. O uso de elementos de funcionalização, apesar de melhorar ligeiramente a condutividade elétrica, prejudicou a adesão do solvente (no caso do ácido oleico), enquanto os surfactantes não apresentaram melhorias significativas e comprometeram a dispersão.

Soe *et al.* (2023) complementam que a distribuição não homogênea das nanopartículas na matriz polimérica é responsável por fenômenos como agregação e aglomeração, impactando diretamente o alcance das propriedades elétricas, térmicas e mecânicas esperadas no desenvolvimento de um nanocompósito.

No contexto óptico, Cho *et al.* (2022) estudaram o desenvolvimento de nanocompósitos transparentes com índices de refração ajustáveis. A proposta envolveu a incorporação de nanopartículas de zircônia modificada superficialmente (ZrO_2) na matriz polimérica do PDMS. Os resultados contribuíram para alta transparência do compósito, excelente transmitância e altos índices de refração.

Pensando em propriedades ajustáveis, Hejazi & Trabzon (2024) concentraram-se no desenvolvimento e caracterização de um compósito de PDMS poroso flexível, incorporado por um processo cíclico de revestimento por imersão e secagem de amostras porosas de PDMS com nanoplaquetas de grafeno. A caracterização térmica foi avaliada pela medição do fluxo de calor em regime permanente e gradiente térmico, em um sistema que possuía aquecimento das amostras, sensor de fluxo de calor e termopares tipo K de medição, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Sistema experimental para caracterização térmica sob compressão dos compósitos

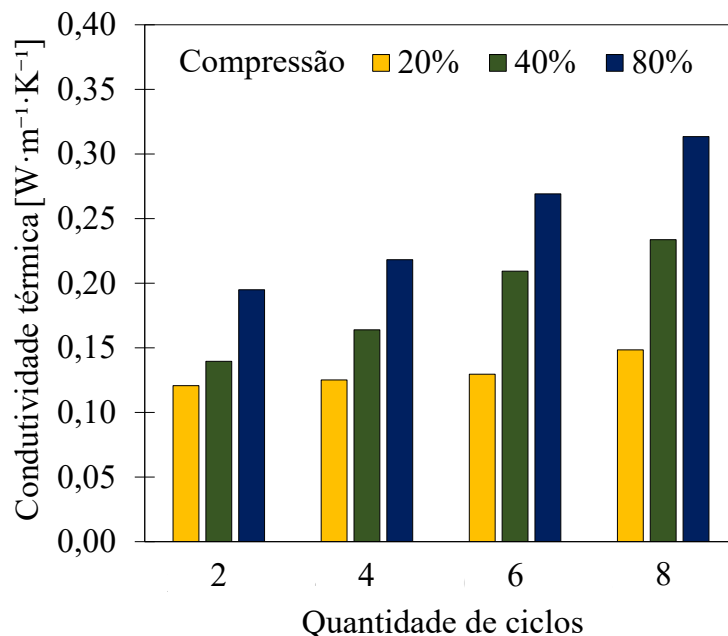


Fonte: Adaptado de Hejazi & Trabzon (2024).

A análise das propriedades térmicas do compósito evidenciou que o aumento da condutividade térmica está diretamente associado à quantidade de ciclos e à taxa de compressão aplicada. Enquanto cada ciclo é responsável por depositar mais nanoplaquetas de grafeno, a compressão favorece a sobreposição desse material de preenchimento, reduzindo as descontinuidades da malha termicamente condutora e intensificando a transferência de calor, o que valida o aumento

da condutividade em cerca de 110% entre a compressão mínima (20%) e máxima (80%) para o caso de 8 ciclos, mostrado na Figura 24.

Figura 24 – Condutividade térmica dos compósitos de PDMS/nanoplaquetas de grafeno



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Hejazi & Trabzon (2024).

Na eletrônica, Huang *et al.* (2023) investigaram o desenvolvimento de nanocompósitos de PDMS reforçado com grafeno e nanotubos de carbono, buscando entender a influência do nanomaterial nas propriedades mecânicas e elétricas do PDMS. Dentro dessa perspectiva, Cavas *et al.* (2018) estudaram uma aplicação alternativa para esse compósito: desenvolver um revestimento marítimo voltado para a liberação de bioincrustação. O processo envolveu três diferentes métodos de dispersão das nanopartículas na matriz polimérica, evidenciando que a sonicação das misturas do agente de reticulação e nanotubos de carbono com xileno – feitas separadamente e posteriormente adicionadas e agitadas à resina – apresentou melhor resultado de incorporação, contribuindo para o aumento da resistência mecânica do compósito.

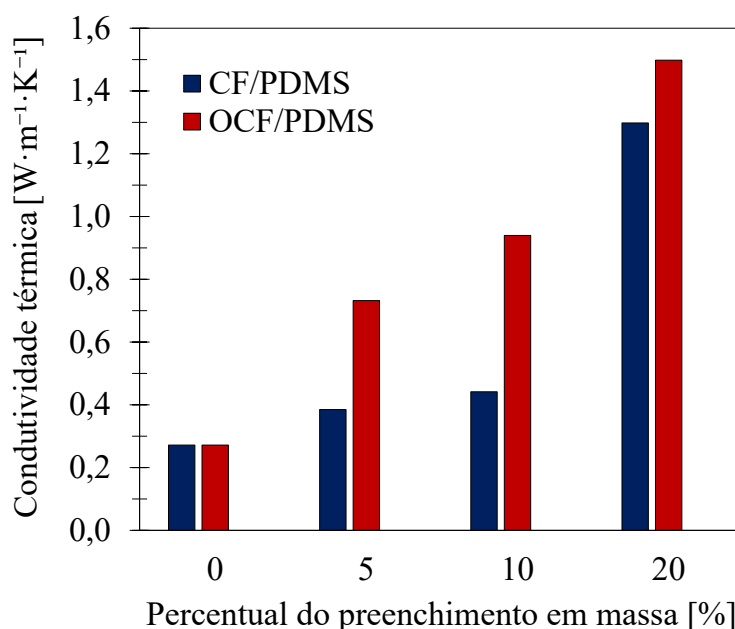
Pensando na melhoria das propriedades mecânicas, térmicas e químicas do PDMS, Katz *et al.* (2022) investigaram a incorporação de adsorventes reativos, como dióxido de titânio (TiO_2) nanoestruturado (~ 4 nm) dentro de sílica mesoporosa na matriz polimérica. A proposta, voltada para o desenvolvimento de compósitos com potencial catalítico, de degradação de poluentes e para aplicações microfluídicas, apresentou, no melhor dos casos, o dobro do módulo de elasticidade em comparação ao PDMS puro. Quanto às propriedades térmicas, observou-se maior estabilidade térmica e aumento das temperaturas de degradação.

Dentro da abordagem do dióxido de titânio, Yang *et al.* (2017) estudaram a modificação superficial de nanopartículas desse material por método sol-gel para incorporação em PDMS e desenvolvimento de membranas híbridas. A conclusão foi favorável ao método de modificação, que gerou boa dispersão e evitou aglomerações. Em relação à estabilidade térmica, a menor perda

de peso observada na análise termogravimétrica evidenciou que a adição das nanopartículas modificadas melhorou a estabilidade térmica, devido ao empacotamento da cadeia polimérica.

Quanto à alta demanda por gerenciamento térmico e à aplicação de materiais de interface térmica, especialmente relacionada à condutividade térmica, Ma *et al.* (2021) investigaram uma estratégia para melhorar essa propriedade em compósitos de silicone. A proposta estudou o alinhamento vertical de fibras de carbono (CFs, sigla em inglês para *Carbon Fibers*) modificadas com nanopartículas magnéticas de óxido de ferro, sob campo magnético, para formar compósitos orientados (OCFs, sigla em inglês para *Oriented Carbon Fibers*). Os resultados ótimos para o compósito com 20% em massa de OCFs na matriz do PDMS apresentaram condutividade de $1,51 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 1,16 vez maior que o compósito CF/PDMS sem orientação e 5,59 vezes maior que os valores do polímero puro, como mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Condutividade térmica dos compósitos CF/PDMS e OCF/PDMS



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Ma *et al.* (2021).

Liu *et al.* (2018) apresentaram abordagem similar, aplicando campo elétrico de corrente alternada em um compósito de PDMS incorporado com nanopartículas de argila em percentuais de peso entre 1% e 9%. O objetivo foi estudar os efeitos do alinhamento das nanopartículas na matriz polimérica, sendo esse bem-sucedido, de acordo com análises microscópicas e espectroscópicas. De maneira geral, os compósitos apresentaram melhorias mecânicas no módulo de elasticidade, em comparação com a matriz pura, e a condutividade térmica também foi melhorada devido à formação de caminhos termicamente condutores pelas nanopartículas no PDMS.

No desenvolvimento de revestimentos de nanocompósitos, Sharif *et al.* (2020) focaram em nanopartículas de óxido de grafeno modificado – usando 3-aminopropiltietoxissilano (APTES) – incorporadas na matriz polimérica do PDMS. A proposta visava melhorar as propriedades dos revestimentos e apresentou melhores resultados de condutividade e estabilidade térmica, além de

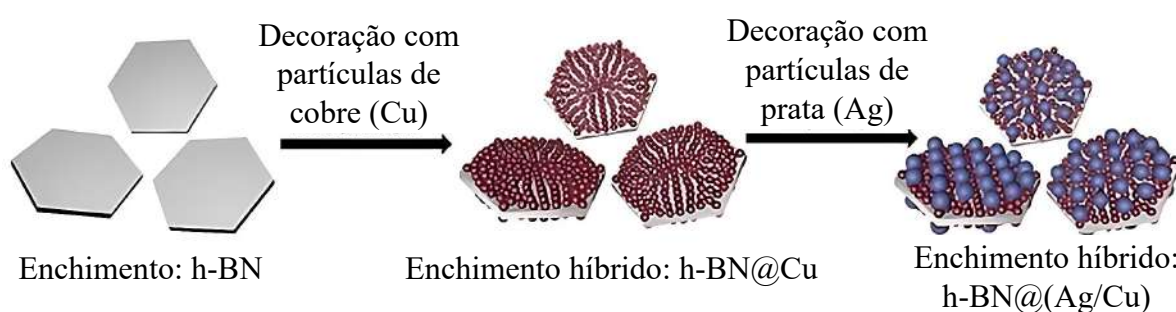
maior hidrofobicidade, observada pelo aumento do ângulo de contato, em comparação com o PDMS puro e aquele agregado com óxido de grafeno.

Kumar *et al.* (2024), propondo soluções anticorrosivas para materiais metálicos, desenvolveram um revestimento fabricado com compósito de resina epóxi, PDMS e nanopartículas de grafeno (GnPs, sigla em inglês para *Graphene nanoparticles*) em diferentes proporções (0,5–3% em massa). Os resultados das análises indicaram que baixas proporções de grafeno (1% em massa) já proporcionam melhorias significativas em opacidade, desempenho térmico, hidrofobicidade e características morfológicas.

De acordo com Kumar *et al.* (2025), a inserção de nanomateriais no PDMS visa superar limitações desse polímero. Este trabalho investigou PDMS com nanoconchas de prata nos percentuais de 1%, 2% e 3% em massa. Os resultados indicaram condutividade térmica de $0,357 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ para o percentual mais alto, em comparação com $0,175 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ do PDMS puro, um aumento de 104% que evidencia uma abordagem promissora em aplicações de gerenciamento e dissipação térmica.

Zhao *et al.* (2022) destacaram a necessidade de novas abordagens para gerenciamento térmico de eletrônicos e propuseram aumentar a condutividade térmica em compósitos de PDMS por meio da incorporação de híbridos hexagonais de nitreto de boro (h-BNs, sigla em inglês para *hexagonal - Boron Nitride*) revestidos com nanopartículas de prata (Ag) e cobre (Cu). Essa modificação superficial ocorre por um processo de decoração em duas etapas, como mostrado na Figura 26.

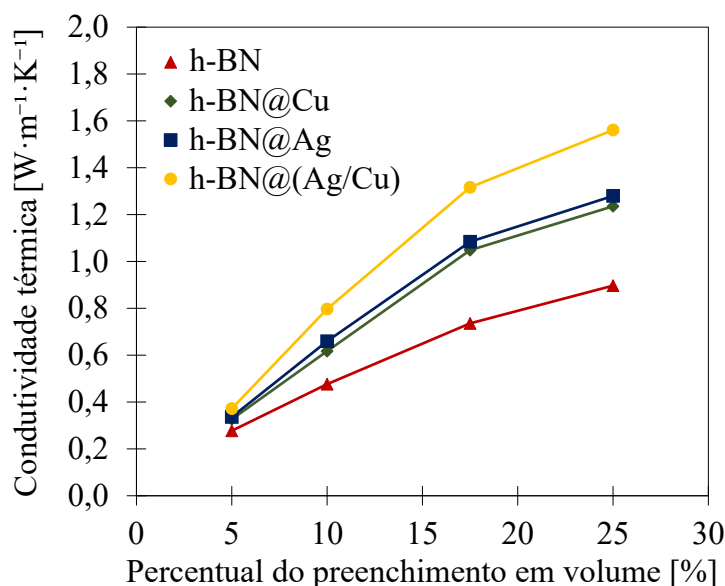
Figura 26 – Modificação superficial e desenvolvimento dos compósitos h-BN@(Ag/Cu)



Fonte: Adaptado de Zhao *et al.* (2022).

Os compósitos apresentaram boas propriedades dielétricas de isolamento e resultados térmicos interessantes, identificando aumento da condutividade térmica com o incremento do teor de preenchimento, comparando PDMS puro, h-BN, h-BN@Cu, h-BN@Ag e h-BN@(Ag/Cu) (o preenchimento final), como mostra a Figura 27. Essa modificação ocorre pela formação gradual de uma rede de condução térmica no compósito, relacionando positivamente esse parâmetro ao percentual de preenchimento.

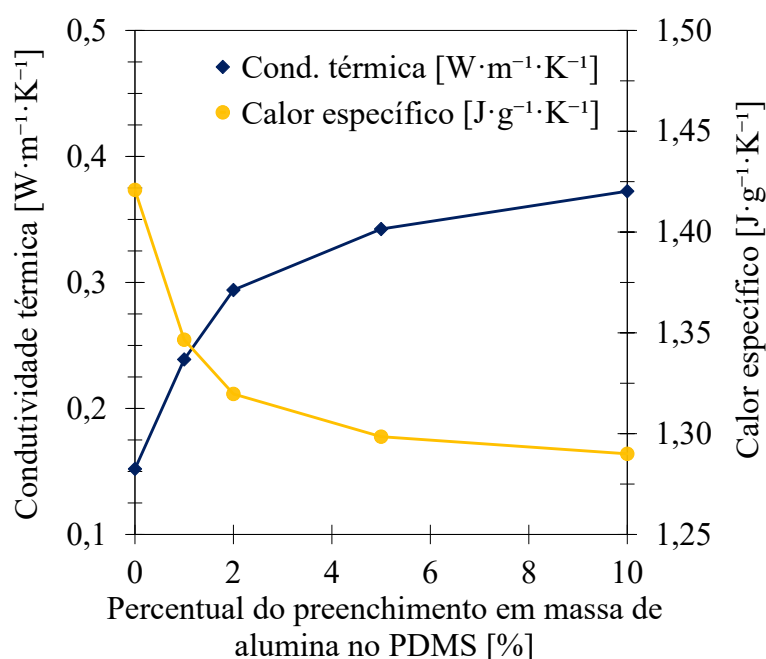
Figura 27 – Comparação da condutividade térmica entre h-BN, h-BN@Cu, h-BN@Ag e h-BN@(Ag/Cu)



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Zhao *et al.* (2022).

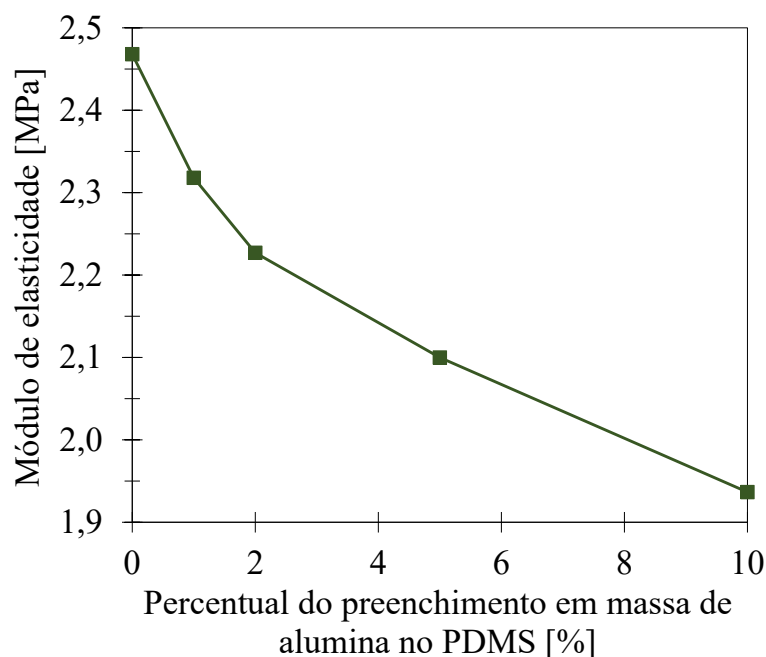
Pensando no setor microfluídico, Yi *et al.* (2014) descrevem uma alternativa que promete viabilizar o PDMS no cenário térmico: a inserção de alumina (Al_2O_3) termicamente condutora na matriz polimérica. Os compósitos desenvolvidos contêm 1%, 2%, 5% e 10% em massa de nanopartículas, comparados com o polímero puro. A abordagem ampla desse trabalho possibilitou a análise das propriedades térmicas, como mostrado na Figura 28, e mecânicas (Figura 29).

Figura 28 – Propriedades térmicas: condutividade e calor específico – PDMS/ Al_2O_3



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Yi *et al.* (2014).

Figura 29 – Propriedade mecânica: módulo de elasticidade – PDMS/ Al_2O_3



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Yi *et al.* (2014).

Os resultados indicam um aumento da condutividade térmica e diminuição do calor específico, proporcionais ao aumento da concentração, sugerindo a melhoria das propriedades térmicas causada pela incorporação. É possível identificar também que o comportamento exponencial dessas propriedades indica a aproximação de uma região de estabilização no compósito com 10%. Sobre as propriedades mecânicas, o estudo voltou-se para a análise do módulo de elasticidade, que decai com o acréscimo das nanopartículas, indicando a redução da rigidez do compósito.

Riccucci *et al.* (2021) trazem uma abordagem geral para o desenvolvimento de compósitos visando melhorar a condutividade térmica do PDMS. Diferentes materiais de preenchimento foram estudados quanto ao impacto na matriz polimérica para aplicações em materiais de interface térmica. Foram empregados os seguintes tipos de preenchimento:

- Metálico (proporções de 5%, 10% e 15% em volume):

Cobre: pó esferoidal (CuS, sigla em inglês para *Spheroidal Copper*) (10–25 μm , pureza de 98%) e pó dendrítico (CuD, sigla em inglês para *Dendritic Copper*) (<45 μm , pureza de 99,7%); e

Níquel: pó (NiP) (3–7 μm , pureza de 99,8%) e pó (NiL) (<45 μm , pureza de 99,8%);

- Cerâmico (proporções de 2,2%, 4,4% e 6,6% em volume): nitreto de boro (BN, sigla em inglês para *Boron Nitride*) (<150 nm, pureza de 99%);

- À base de carbono:

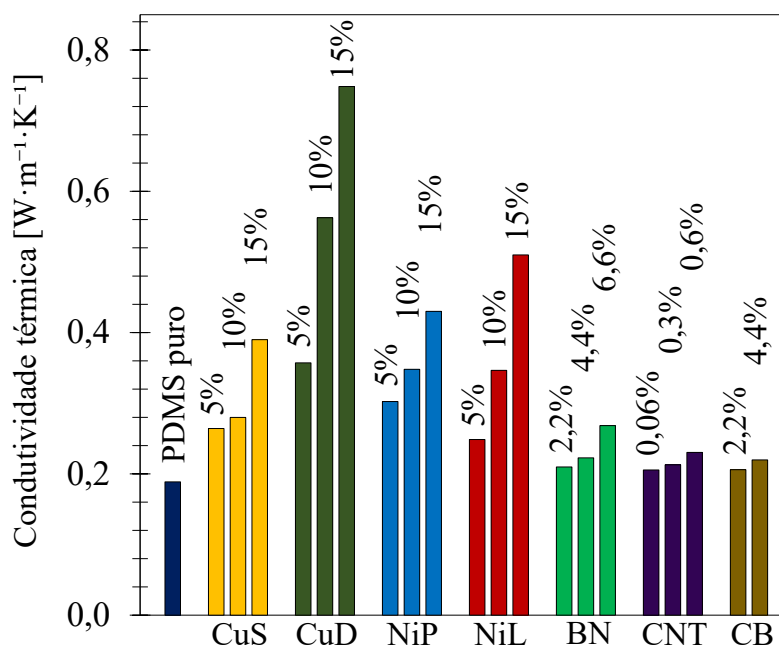
Nanotubos de carbono (CNTs) (proporções de 0,06%, 0,3% e 0,6%, pureza de 90%); e

Negro de fumo (CB, sigla em inglês para *Carbon Black*) (<500 nm, proporções de 2,2% e 4,4%).

A Figura 30 apresenta os resultados de condutividade térmica obtidos para esse conjunto de compósitos. Em comparação com a condutividade térmica do PDMS puro ($0,19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), o preenchimento metálico apresentou melhores resultados térmicos, com destaque para o cobre dendrítico, que mostrou incremento de cerca de 300%, evidenciando a importância da forma e tamanho das partículas de preenchimento para criar vias condutoras eficazes, observadas também para o níquel.

O preenchimento cerâmico com nitreto de boro mostrou aumento sutil na condutividade térmica, independentemente do percentual de preenchimento, devido ao formato das partículas, que dificulta a formação de uma rede térmica. Quanto ao preenchimento à base de carbono, a difícil trabalhabilidade dos nanotubos induziu baixos percentuais de incorporação, limitando os resultados térmicos, mas ainda apresentando desempenho melhor que o preenchimento cerâmico.

Figura 30 – Condutividade térmica obtida para os diferentes tipos de preenchimento



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Riccucci *et al.* (2021).

Dentro dessa perspectiva, Yao *et al.* (2020) desenvolveram um esqueleto leve, tridimensional e termicamente alinhado para melhorar a condutividade térmica da matriz polimérica do PDMS. A solução mostrou-se termicamente viável, com resultados de $3,87 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ com apenas 8,35% de enchimento volumétrico, representando uma metodologia capaz de superar desafios de gerenciamento térmico em eletrônicos.

Esses resultados evidenciam o grande potencial dos nanocompósitos de PDMS em aplicações de gerenciamento térmico, o que pode se estender a dispositivos eletrônicos e dissipadores térmicos compactos, por exemplo. A motivação dessa inovação tecnológica busca combinar as

propriedades desse polímero – como a flexibilidade e o fácil manuseio – com a condutividade térmica exibida pelos nanomateriais de preenchimento, o que abre margem para questões relacionadas à homogeneização e à dispersão, aos métodos de fabricação e, principalmente, à escolha do nanomaterial, fortalecendo e validando sua viabilidade no setor.

2.4 MICROTROCADORES DE CALOR

Os microtrocaadores de calor têm sido amplamente estudados com o objetivo de aprimorar o desempenho em sistemas de dissipação térmica, considerando parâmetros como rugosidade superficial e inserção de micropilares, cuja análise das características geométricas e do arranjo se mostra imprescindível. A modificação de superfícies por meio de microcanais e micropilares tem contribuído para o aumento da dissipação de calor e para a melhoria do desempenho térmico em comparação a superfícies lisas (DAMLE, 2021).

Damle & Joshi (2023) destacam que o projeto de micropilares deve considerar tanto a queda de pressão quanto o coeficiente de transferência de calor e que, embora essa tecnologia represente uma melhoria no bombeamento passivo, que ocorre por ação capilar, ela provoca uma queda de pressão considerável quando o fluxo é forçado.

2.4.1 Canais: critérios de classificação de escala

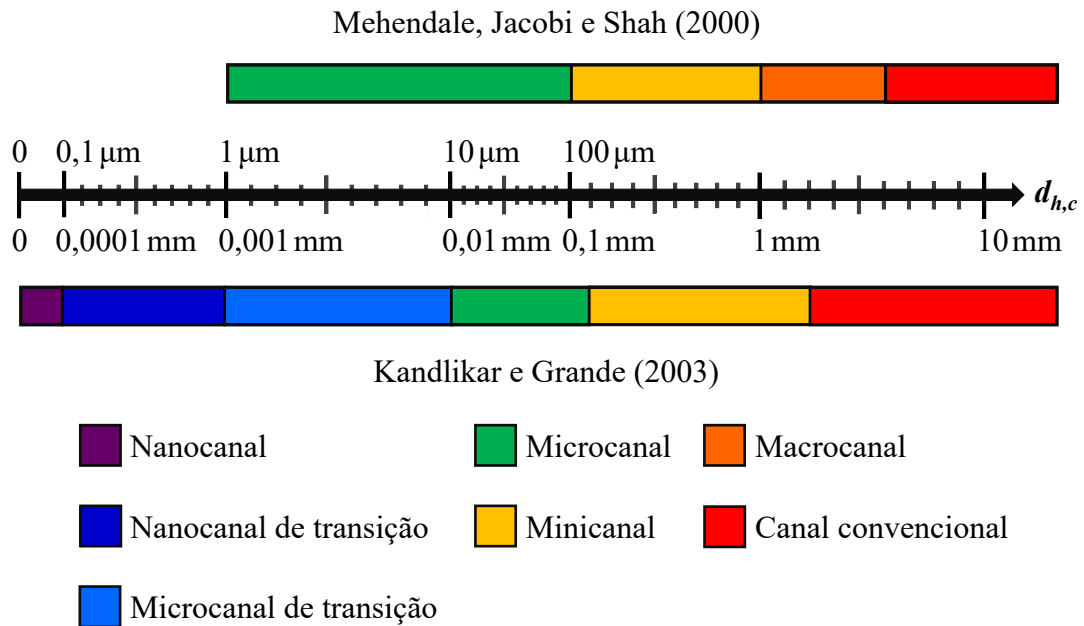
O desempenho de trocadores de calor é um princípio que deve ser levado em consideração no projeto e no desenvolvimento desse tipo de dispositivo térmico, sendo que, de acordo com Nunes (2023), é essencial classificar a geometria dos canais por onde o fluido de trabalho atravessa em função da escala de tamanho.

Nascimento (2012), voltado para uma abordagem teórica e experimental da transferência de calor em dissipadores térmicos com microcanais, enfatiza que o diâmetro hidráulico e o formato geométrico da seção transversal desses canais estão diretamente relacionados ao escoamento promovido. Dentre essas geometrias, Nunes (2023) destaca os formatos trapezoidais, retangulares, circulares e triangulares.

Nunes (2023) também enfatiza que não existe um consenso geral e amplamente aceito para a definição de macro e microescala. Uma alternativa bastante promissora nesse sentido é a análise baseada no diâmetro hidráulico dos canais ($d_{h,c}$) (ZAGO, 2019).

Dentre os estudos voltados às características geométricas dos canais, mais especificamente ao diâmetro hidráulico ($d_{h,c}$), destaca-se o trabalho de Mehendale, Jacobi & Shah (2000). Outra pesquisa bastante significativa no ramo foi a de Kandlikar & Grande (2003), mais abrangente que a anterior e considerando, desta vez, o efeito da rarefação de gases. A classificação obtida por esses trabalhos é apresentada na representação esquemática da Figura 31. Segundo Zago (2019), o método de fabricação é um parâmetro pouco significativo nos projetos.

Figura 31 – Representação da classificação dos canais pelo diâmetro hidráulico ($d_{h,c}$) em diferentes estudos

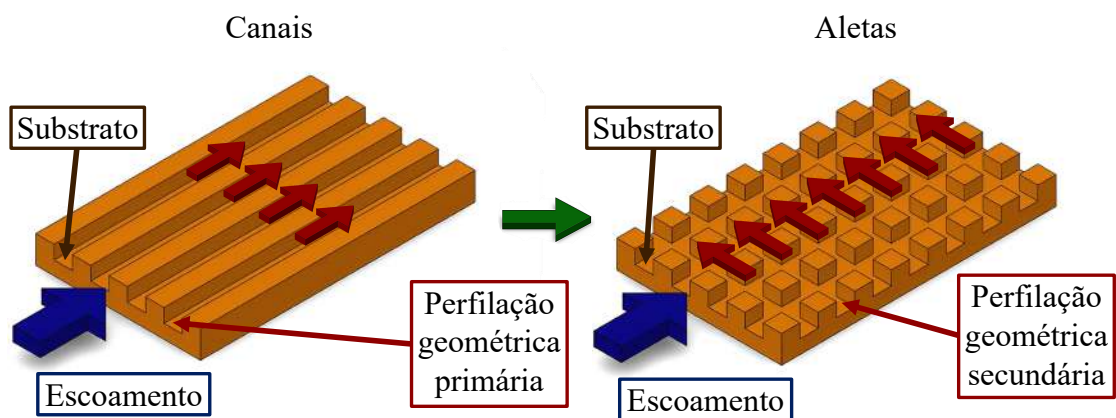


Fonte: Elaborado pelo autor, com base na literatura descrita (2026).

2.4.2 Aletas

Seguindo a mesma linha de raciocínio do desenvolvimento de superfícies modificadas para intensificar a troca térmica por meio de canais, Nunes (2023) propõe um segundo seccionamento sobre os canais primários, dando origem a novas estruturas com perfis de aletas que, por apresentarem uma área superficial superior à anterior, são responsáveis por aprimorar os fenômenos térmicos envolvidos. A comparação entre essas estruturas é trazida na Figura 32, que destaca o exemplo da implementação de aletas quadradas na superfície de troca térmica.

Figura 32 – O desenvolvimento das aletas quadradas a partir de uma superfície com canais



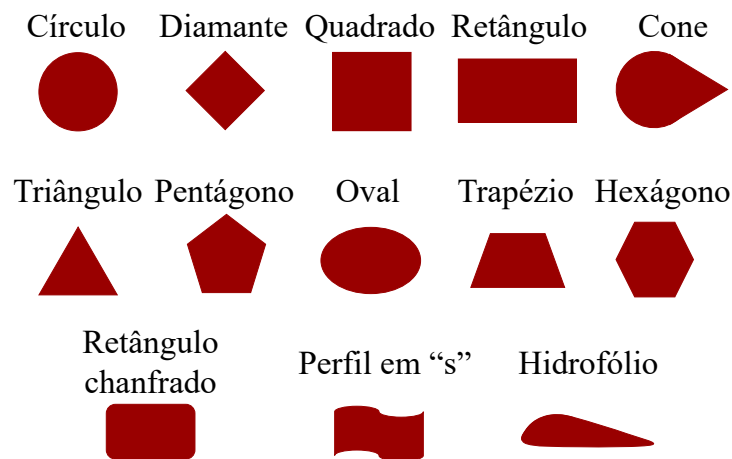
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Essas estruturas são extensões superficiais do substrato de troca térmica, comumente denominadas aletas ou pilares, ou, mais especificamente para o presente contexto, microaletas e

micropilares (NUNES, 2023). Diversos parâmetros têm sido estudados nesse sentido, buscando alternativas voltadas ao desempenho desses sistemas no gerenciamento térmico de alta compactidade, entre eles o formato (LI *et al.*, 2020), o distanciamento (NUNES, 2023) e o arranjo (MCNEIL *et al.*, 2014).

De acordo com Zhou *et al.* (2020), o aperfeiçoamento dos processos de fabricação possibilitou a produção de microaletas em diferentes formatos para sistemas de gerenciamento térmico, como ilustra a representação trazida na Figura 33.

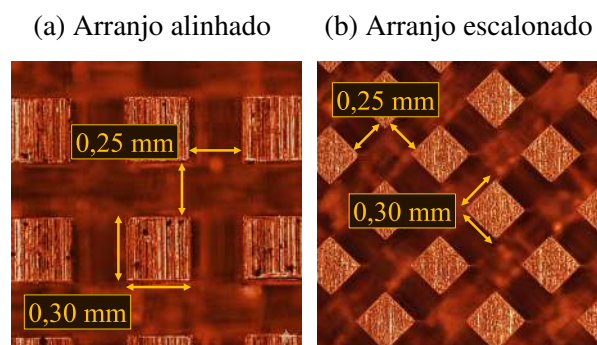
Figura 33 – Diferentes seções transversais das microaletas em trocadores de calor



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Mohammadi & Koşar (2018).

A pesquisa de Nunes (2023), que fornece uma revisão consistente e encorpada sobre o assunto, também aponta que os arranjos alinhado e escalonado lideram os estudos na atualidade. Na configuração alinhada, os micropilares estão dispostos paralelamente entre as fileiras, o que significa que cada pilar se encontra inteiramente posicionado atrás do anterior, formando uma passagem direta para o escoamento. Por outro lado, o arranjo escalonado dispõe os micropilares das fileiras consecutivas com um desvio lateral em relação à adjacente, induzindo obstáculos ao escoamento (MOHAMMADI; KOŞAR, 2018). A Figura 34 aborda como ocorre a disposição das microaletas nos diferentes arranjos, destacando o alinhado (Figura 34a) e o escalonado (Figura 34b).

Figura 34 – Microaletas de cobre em dissipadores de calor



Fonte: Adaptado de Nunes (2023).

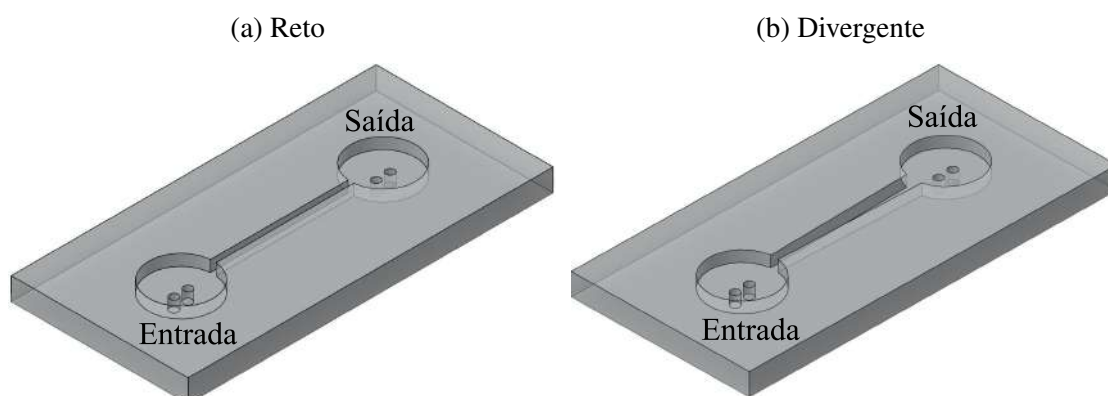
2.5 PDMS NO GERENCIAMENTO TÉRMICO

Aplicações envolvendo o PDMS no setor de gerenciamento térmico têm se destacado na atualidade. De acordo com Ong & KuShaari (2020), os metais, até então, eram preferíveis nesse contexto devido à sua alta condutividade térmica; porém, devido à sua elevada densidade, aumentam o peso da estrutura como um todo, o que abre margem para o desenvolvimento de novos materiais termicamente condutores.

O uso de materiais poliméricos é uma alternativa interessante para solucionar essa questão, embora possuam condutividade térmica inferior à dos metais. Além disso, Ong & KuShaari (2020) identificam diversos benefícios associados aos polímeros no desenvolvimento de sistemas de transferência de calor, como resistência à corrosão e à incrustação, capacidade de operar com escoamentos bifásicos e flexibilidade, essenciais nesse cenário.

Alugoju, Dubey & Javed (2023) investigaram o desempenho da transferência de calor em um dissipador térmico com microcanais reto e divergente fabricados em PDMS. A pesquisa proposta utilizou uma bomba de seringa, sensores de pressão do tipo diferencial e termopares para avaliar a queda de pressão no microcanal e as temperaturas na entrada e na saída. Acerca do escoamento, a configuração divergente mostrou-se mais estável, em contraste com a reversão do fluxo que ocorreu no microcanal reto, que também apresentou maior queda de pressão. Na análise térmica, o microcanal divergente também se destacou, apresentando coeficiente de transferência de calor superior em 13% ao reto, nas mesmas condições. A Figura 35 exemplifica os dissipadores térmicos desenvolvidos no estudo, com detalhes para o microcanal reto (Figura 35a) e divergente (Figura 35b).

Figura 35 – Representação dos trocadores de calor com microcanal reto e divergente

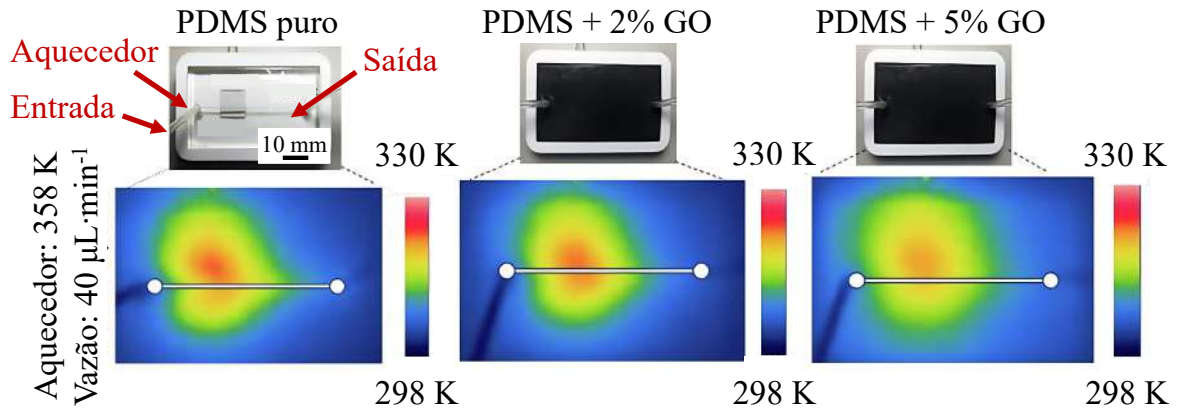


Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Alugoju, Dubey & Javed (2023).

Outro estudo bastante similar foi proposto por Luo *et al.* (2022), que aborda o desenvolvimento de um dissipador térmico fabricado com um nanocompósito formado por PDMS e óxido de grafeno (GO). A pesquisa analisou os efeitos na transferência de calor provocados pela inserção de 2% e 5% de óxido de grafeno no PDMS, em comparação com o polímero puro, destacando o aumento da condutividade térmica e a redução do calor específico proporcional ao

acréscimo do material condutor, o que culminou em resultados superiores de dissipação térmica, como mostra a Figura 36.

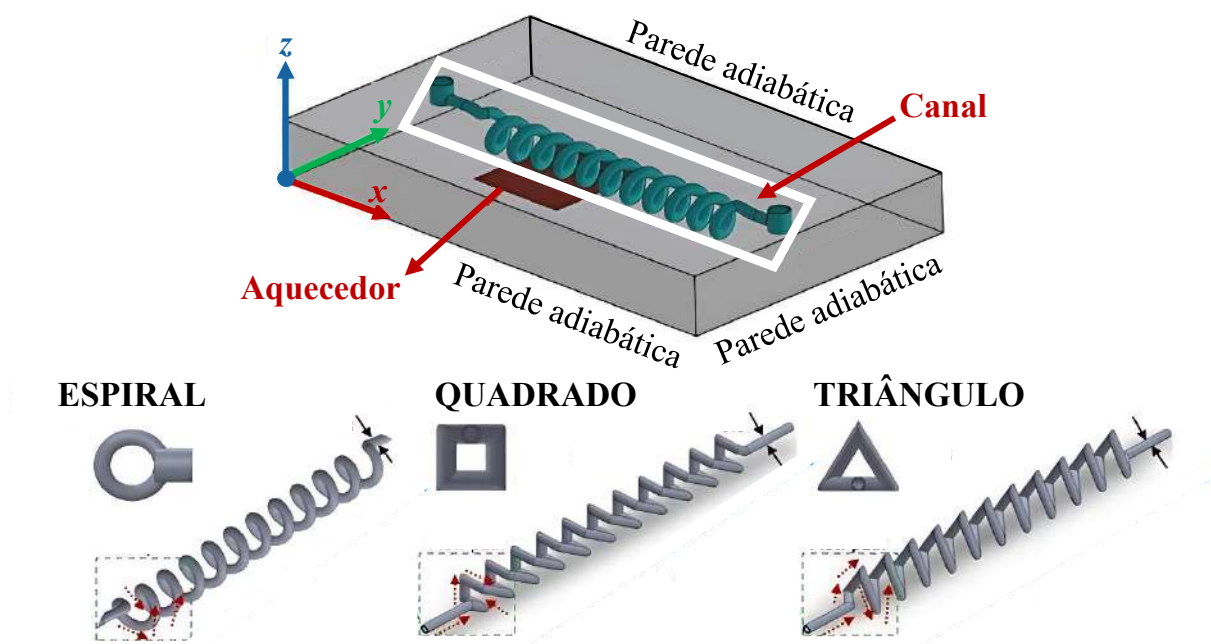
Figura 36 – Dissipadores térmicos e seus campos de temperatura na superfície superior



Fonte: Adaptado de Luo *et al.* (2022).

Luo, Vishwakarma & Panigrahi (2024) trouxeram uma abordagem inovadora da aplicação do nanocompósito de PDMS e grafeno em 5% de massa, desenvolvendo microtrocadores de calor com microcanais em formato de espiral, quadrado e triângulo, como mostra a Figura 37. Os experimentos foram conduzidos com uma fonte de calor constante e diferentes fluxos volumétricos na faixa de 40 a 400 $\mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ de água deionizada. A avaliação térmica utilizou câmeras de infravermelho para detecção das regiões quentes e termopares para medição da temperatura na entrada e na saída.

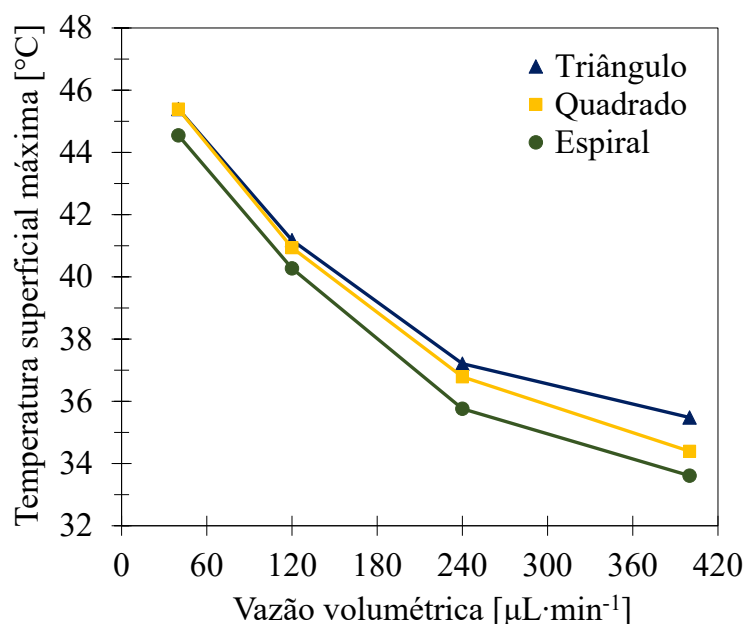
Figura 37 – Diferentes formatos de seção transversal dos microcanais – PDMS/grafeno (5%)



Fonte: Adaptado de Luo, Vishwakarma & Panigrahi (2024).

Os resultados apontaram que os microcanais em formato de espiral apresentaram desempenho superior aos formatos quadrado e triangular, como é possível observar na Figura 38. A temperatura no ponto mais quente desse tipo de microcanal foi inferior à das demais geometrias; observou-se também uma maior diferença entre as temperaturas de entrada e saída e um maior coeficiente de transferência de calor, indicando melhor dissipação térmica do microcanal espiral. O estudo ainda endossa que as quinas dos formatos em triângulo e quadrado contribuíam para a formação de microvórtices e zonas de estagnação, fatores hidrodinâmicos que reduzem o desempenho dos dispositivos. No formato em espiral, por sua vez, esses fenômenos eram minimizados, favorecendo a transferência de calor como um todo.

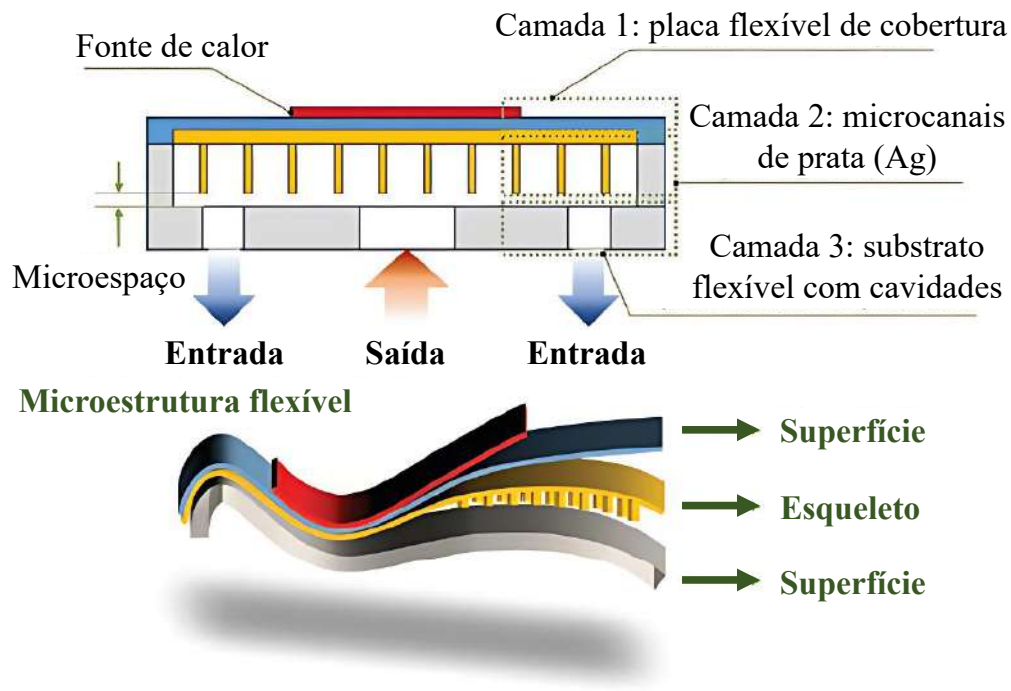
Figura 38 – Comparação da temperatura superficial máxima para os diferentes formatos de seção transversal dos microcanais – PDMS/grafeno (5%)



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Luo, Vishwakarma & Panigrahi (2024).

Cai *et al.* (2024) reforçam a necessidade do desenvolvimento de sistemas de dissipação térmica para dispositivos flexíveis. Sendo assim, desenvolveram um dissipador de calor que combina a flexibilidade do PDMS com microcanais dúcteis de prata, como mostra a Figura 39. O delineamento inovador permitiu atingir uma densidade de potência térmica dissipada de $5 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, em comparação com $3,4 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ obtidos nas mesmas condições para microcanais fabricados exclusivamente com PDMS, representando um aumento de aproximadamente 47% em comparação com sistemas fabricados apenas com PDMS.

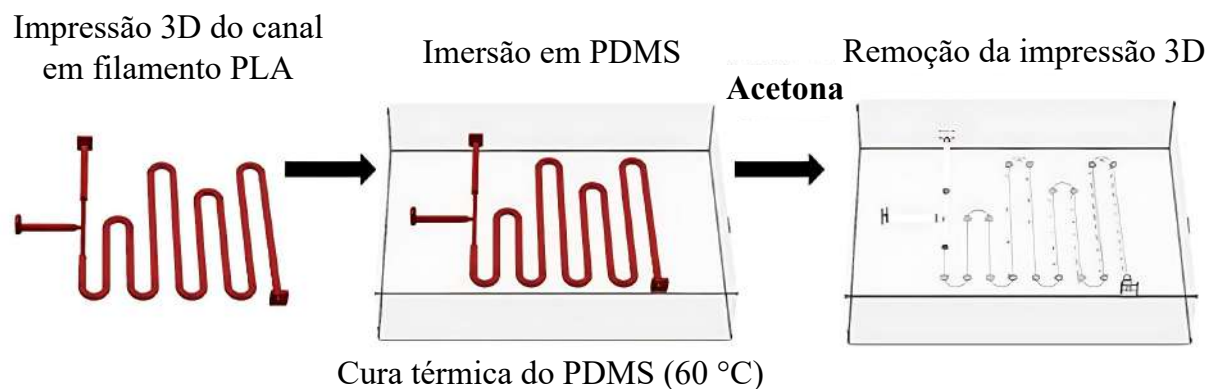
Figura 39 – Dissipador de calor flexível desenvolvido com microcanais dúcteis de prata



Fonte: Adaptado de Cai *et al.* (2024).

Os parâmetros superficiais em dispositivos microfluídicos também têm sido investigados nos estudos mais recentes, como é o caso da pesquisa de Acosta-Cuevas *et al.* (2023), voltada para a rugosidade em microcanais e sua influência no escoamento. O estudo empregou diferentes métodos de fabricação, entre eles, a litografia de PDMS com filamento PLA (ácido polilático). Esse método consistiu no desenvolvimento da geometria do canal usando o filamento e imergindo-o na matriz polimérica. Após a cura, o filamento era removido da matriz, revelando o microcanal formado, como mostra a Figura 40.

Figura 40 – Método de fabricação de microcanais de PDMS por litografia

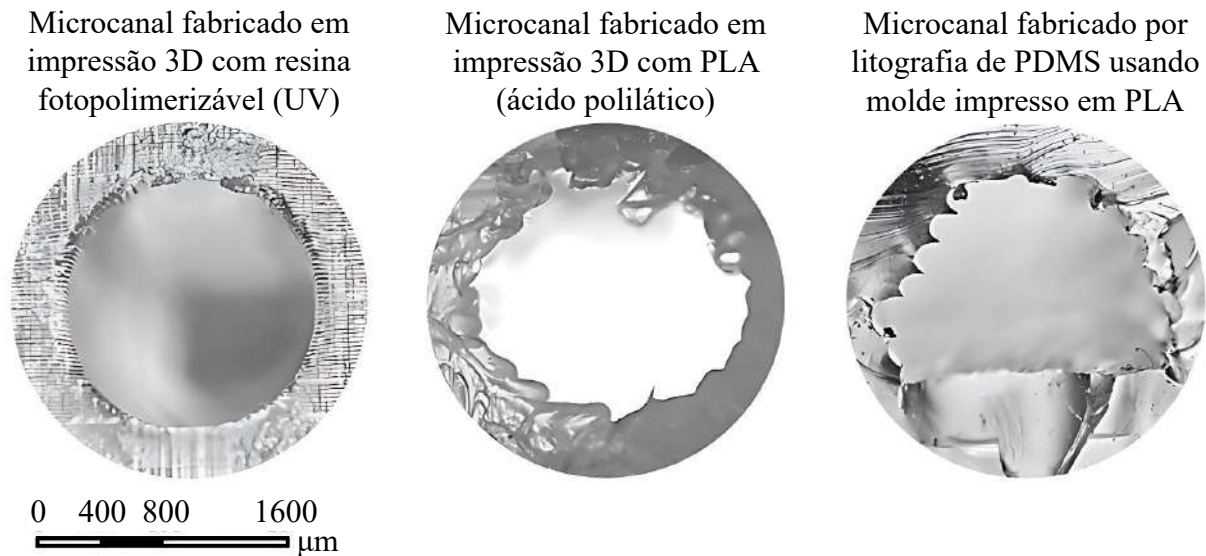


Fonte: Adaptado de Acosta-Cuevas *et al.* (2023).

Os microcanais formados pela litografia apresentaram grandes irregularidades superficiais em função da deposição do PLA, especialmente na região de afunilamento das entradas e nas

curvas. A pesquisa enfatiza que moldes fabricados com filamento necessitam de um tratamento superficial, como o uso de acetona, ou reconfiguração das propriedades de impressão, garantindo que as irregularidades da impressão não se propaguem para o polímero. Os resultados superficiais obtidos para os métodos desenvolvidos nessa pesquisa são apresentados na Figura 41.

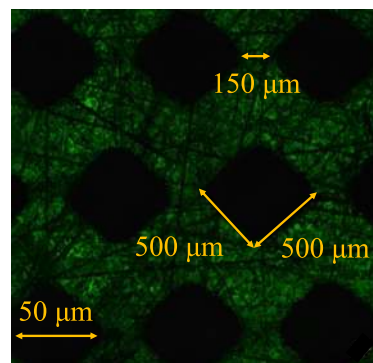
Figura 41 – Seção transversal dos microcanais de PDMS em diferentes técnicas de fabricação



Fonte: Adaptado de Acosta-Cuevas *et al.* (2023).

Reforçando as soluções de gerenciamento térmico propostas por compósitos de PDMS termicamente condutores, Correa *et al.* (2025) desenvolveram microtrocares de calor com micropilares diamantados em arranjo escalonado, fabricados em PDMS incorporado com nanopartículas hexagonais bidimensionais de nitreto de boro (h-BN), ilustrados na Figura 42. A proposta se baseou na melhoria das propriedades térmicas do PDMS e sua viabilidade no cenário da transferência de calor. Para isso, foram comparados microtrocares de calor com o polímero puro e outro acrescido de 20% em massa de nanopartículas.

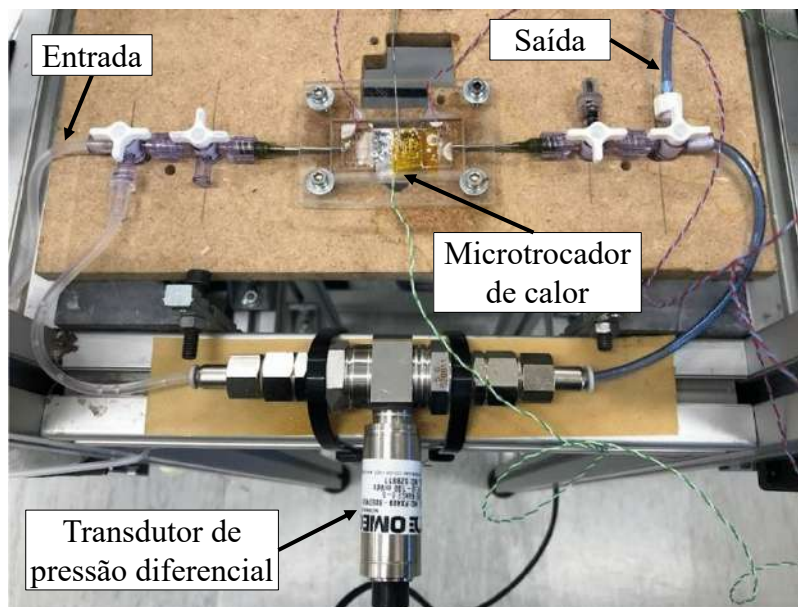
Figura 42 – Imagem microscópica dos micropilares – PDMS + 20% h-BN



Fonte: Adaptado de Correa *et al.* (2025).

Nessa pesquisa, os autores realizaram uma análise termohidrodinâmica desses microtroca- dores de calor, para isso, empregaram um sistema de monitoramento térmico e de avaliação da queda de pressão por meio de um transdutor de pressão diferencial localizado externamente à seção de testes, como mostra a Figura 43. Esse tipo de configuração considera que a queda de pressão associada aos dutos que transportam o fluido de trabalho é desprezível quando comparada à queda de pressão na região microaletada.

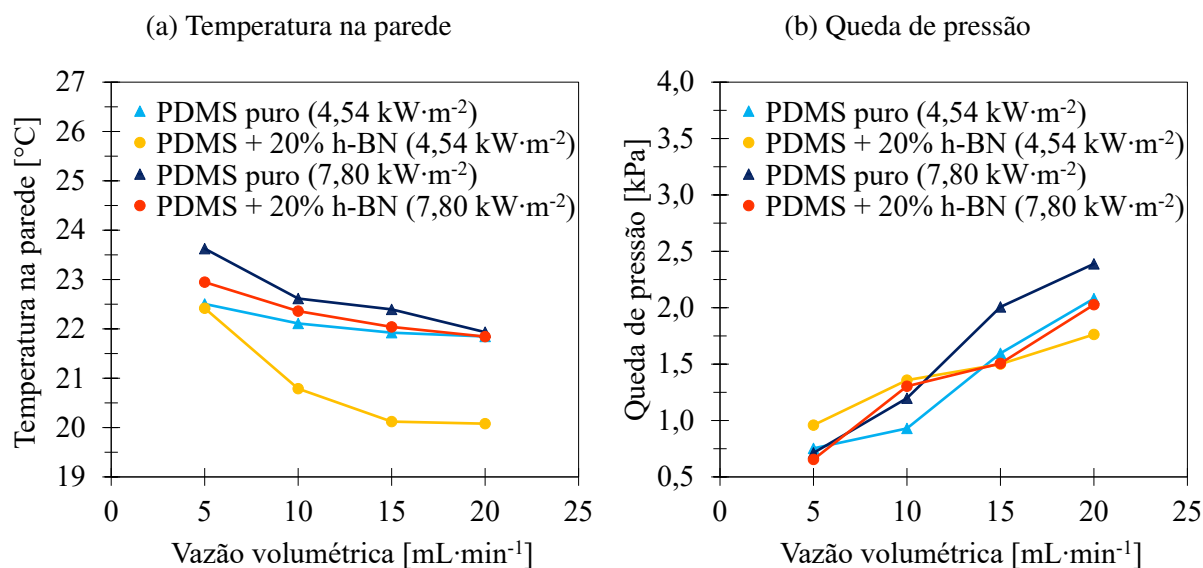
Figura 43 – Aparato experimental dos testes termohidrodinâmicos para microtrocaadores de calor



Fonte: Adaptado de Correa *et al.* (2025).

Os resultados foram favoráveis para o compósito desenvolvido, indicando aumento na dissipação térmica, que ocorreu pela redução da temperatura da superfície microaletada e da interface com a fonte de aquecimento. Esse efeito é resultado do aumento da condutividade térmica do compósito, superior em 83% em comparação com o PDMS puro. Outra constatação importante diz respeito à queda de pressão da região aletada, que teve aumento proporcional à vazão volumétrica, indicando também que as nanopartículas não afetam de forma significativa o atrito na parede e, portanto, a queda de pressão. Esses resultados são apresentados na Figura 44.

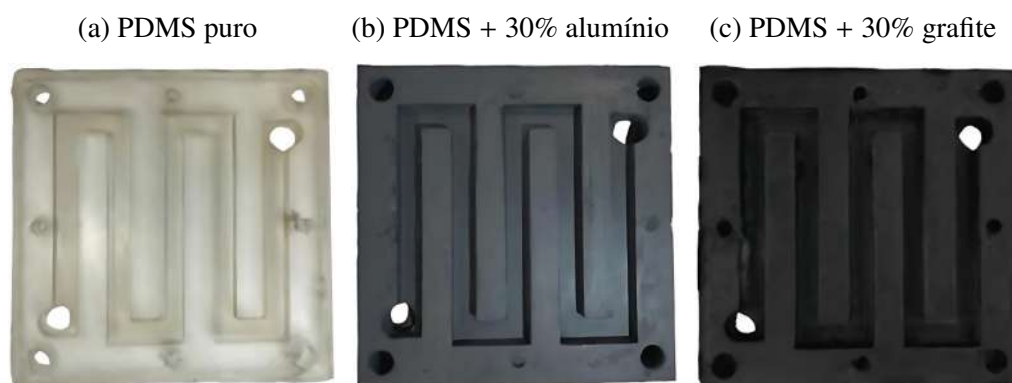
Figura 44 – Resultados termohidrodinâmicos



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Correa *et al.* (2025).

Outra proposta inovadora foi estudada por Souza *et al.* (2025). Esse projeto investigou o desempenho térmico de trocadores de calor em formato de serpentina, fabricados com compósitos poliméricos de PDMS, sendo um dispositivo de PDMS puro (Figura 45a), um com 30% em massa de nanopartículas de alumínio (Figura 45b) e outro com 30% em massa de grafite reciclado (Figura 45c). A técnica utilizou moldes 3D em filamento plástico de engenharia para a fabricação dos trocadores de calor, que operaram em escoamento monofásico com água deionizada.

Figura 45 – Trocadores de calor em formato de serpentina desenvolvidos

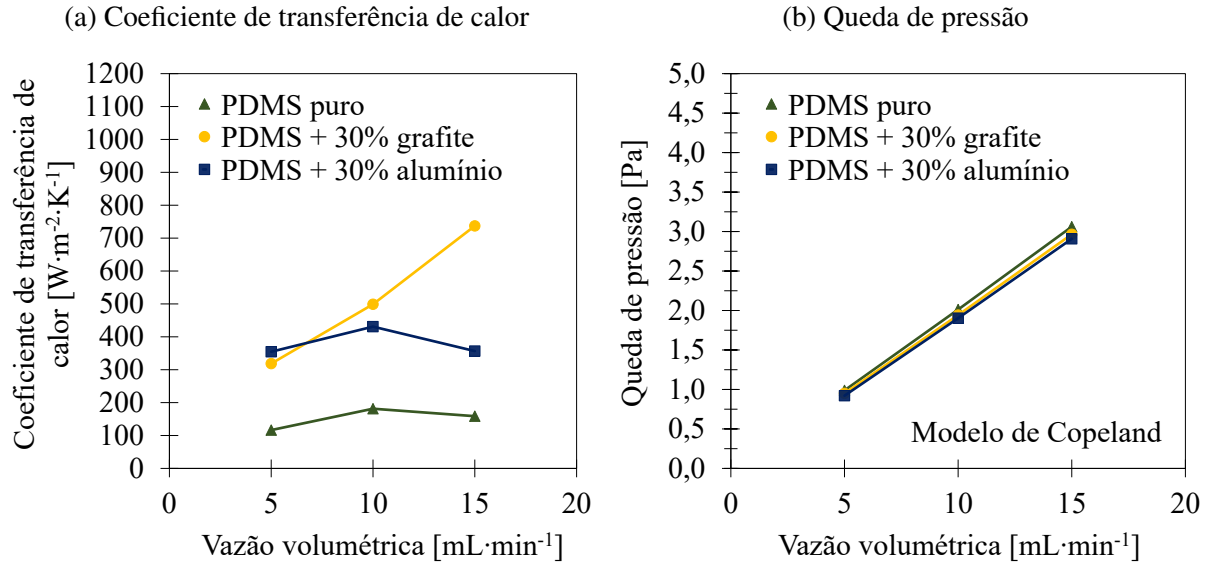


Fonte: Adaptado de Souza *et al.* (2025).

Como parte dos resultados, observou-se um aumento da condutividade térmica dos compósitos, sendo 50,2% para o preenchimento de alumínio e 166,8% para o grafite, em comparação com o PDMS puro. Quanto aos resultados térmicos, os compósitos apresentaram maiores diferenças de temperatura entre entrada e saída, sendo que o compósito de grafeno exibiu melhores resultados de transferência de calor (Figura 46a). Sobre a queda de pressão, foram observadas pequenas diferenças entre as serpentinhas e, devido ao fato de os sensores de pressão não terem

captado variações maiores que sua incerteza, foi aplicado o Modelo de Copeland (COPELAND, 2000) (Figura 46b).

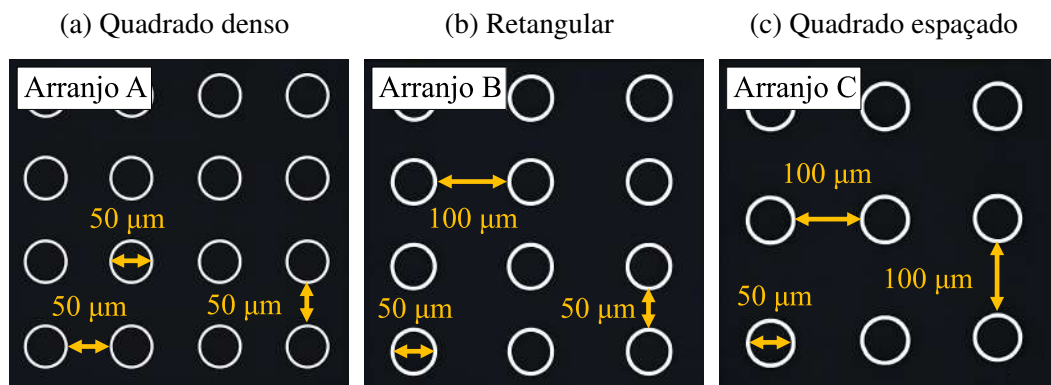
Figura 46 – Resultados termohidrodinâmicos das serpentinhas



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Souza *et al.* (2025).

Damle & Joshi (2023) investigaram o desempenho termofluidodinâmico de microtrocadores de calor fabricados em PDMS com diferentes arranjos de micropilares cilíndricos com 60 μm de altura, ilustrados na Figura 47. Esse estudo empregou o fluido dielétrico FC-3283 para promover escoamento mono e bifásico, avaliando parâmetros como queda de pressão e coeficiente de transferência de calor.

Figura 47 – Arranjos de micropilares cilíndricos avaliados

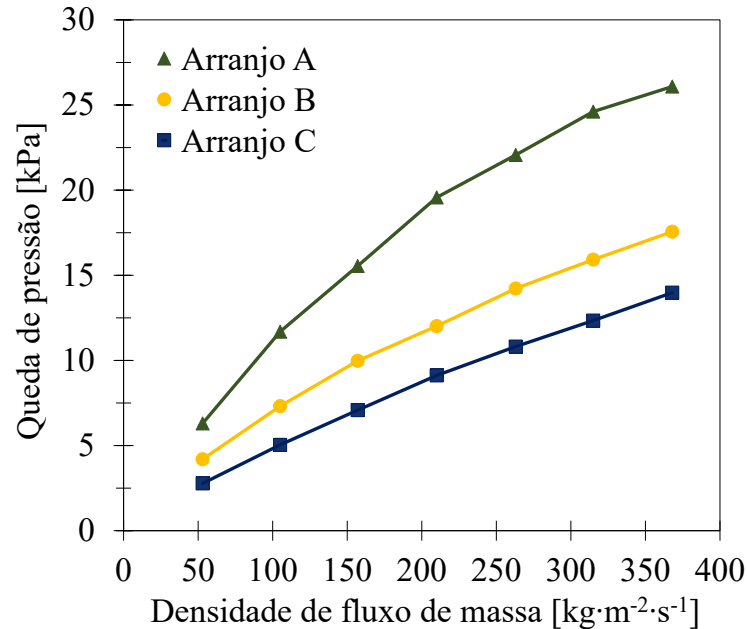


Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Damle & Joshi (2023).

Este estudo demonstrou que a densidade de micropilares influencia no aspecto térmico, uma vez que a quantidade de pilares está diretamente relacionada à área de transferência de calor. Para este caso, a temperatura da parede inferior corrobora essa justificativa. Sobre a queda de pressão, é possível constatar que esse parâmetro aumenta com o fluxo mássico, sendo que a

geometria mais densa apresentou maiores quedas de pressão, em detrimento da superfície menos densa, como mostra a Figura 48.

Figura 48 – Queda de pressão para os diferentes arranjos de micropilares cilíndricos

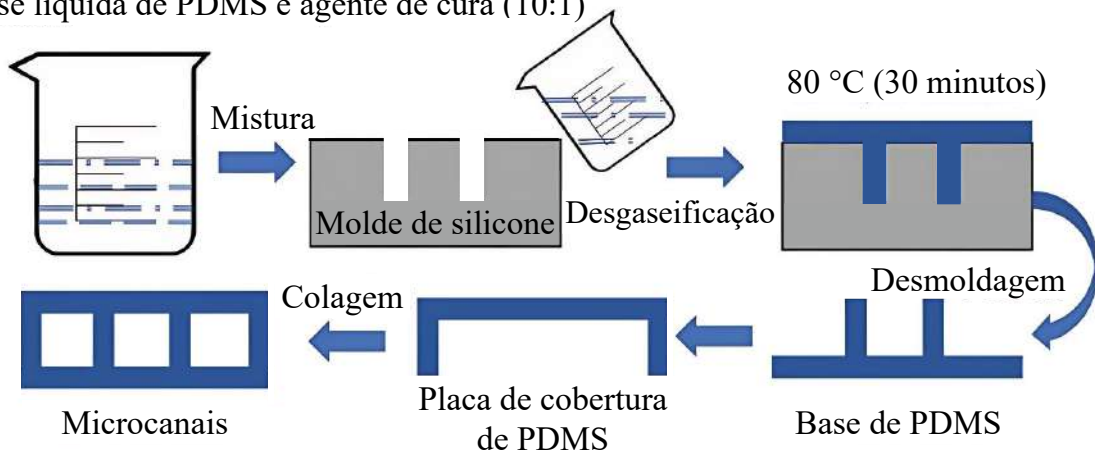


Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Damle & Joshi (2023).

Outro estudo, bastante completo sobre o assunto, foi o de Ye *et al.* (2022). Essa pesquisa se voltou para a avaliação experimental da transferência de calor e das características do fluxo em microtrocaadores de calor fabricados em PDMS, com três diferentes arranjos de micropilares: único, horizontal e vertical. O processo de fabricação desses trocadores de calor é apresentado na Figura 49, que destaca as etapas de mistura, desgaseificação, despejamento no molde, cura térmica e montagem do dispositivo. Os micropilares, com diâmetro de 0,4 mm e espaçamento de 1 mm, estavam dispostos em um canal com 3 mm de largura, 30 mm de comprimento e 0,4 mm de altura.

Figura 49 – Manuseio do polímero e fabricação dos microtrocaadores de calor

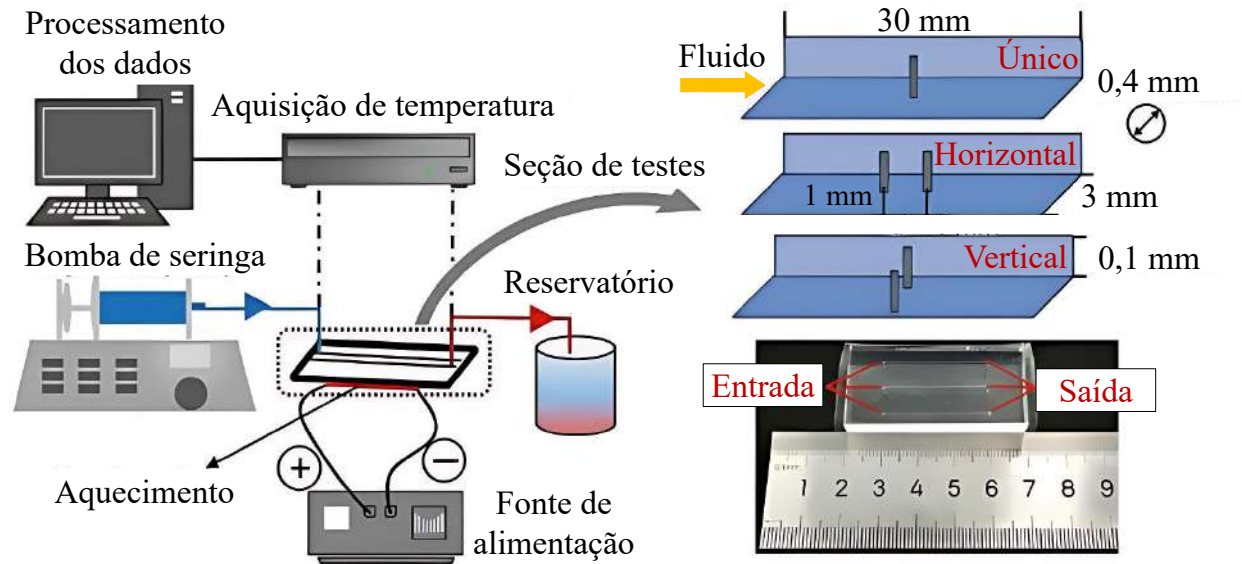
Base líquida de PDMS e agente de cura (10:1)



Fonte: Adaptado de Ye *et al.* (2022).

Uma representação da bancada e seção de testes desenvolvidas nesse estudo é trazida na Figura 50, que conta com termopares do tipo T para monitoramento térmico do fluido de trabalho que, neste caso, foi água deionizada. Essa ilustração também dá detalhes dos micropilares e sua disposição nos microtrocadores de calor.

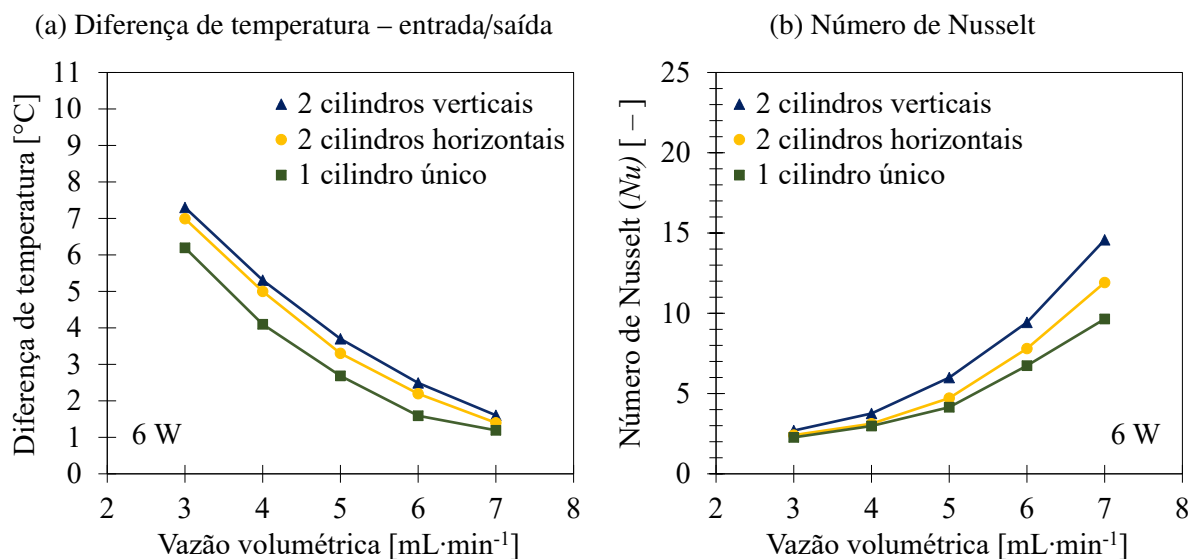
Figura 50 – Bancada e seção de testes



Fonte: Adaptado de Ye *et al.* (2022).

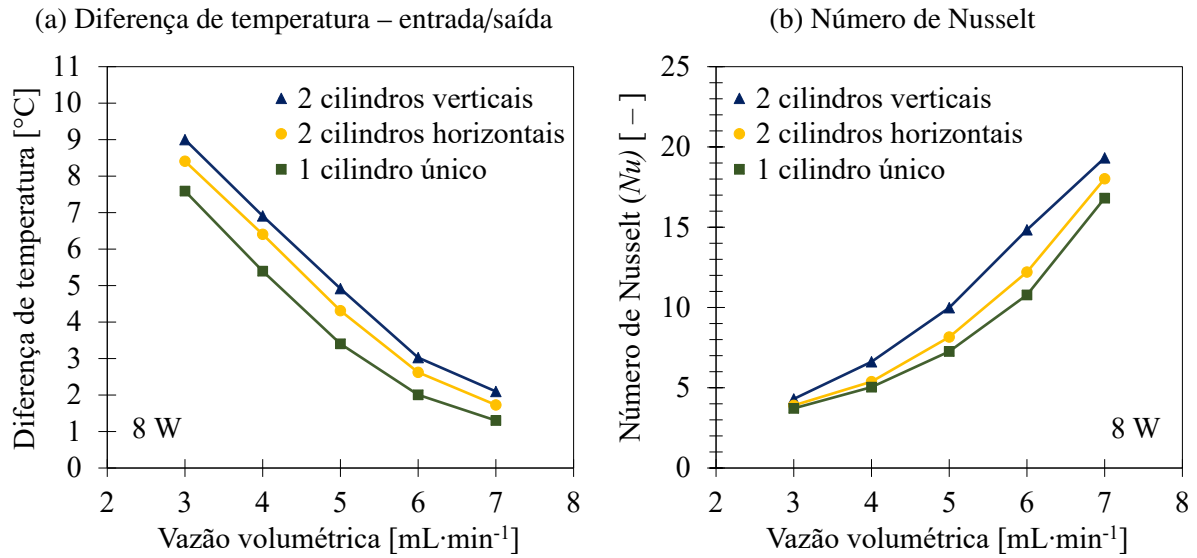
Os resultados desse estudo apresentaram desempenhos superiores para o arranjo formado pelos micropilares organizados verticalmente, tanto na diferença de temperatura do fluido de trabalho entre a entrada e a saída (Figuras 51a e 52a) quanto no número de Nusselt (Nu) (Figuras 51b e 52b), com a aplicação de 6 e 8 W de potência elétrica no sistema de aquecimento, respectivamente.

Figura 51 – Resultados térmicos obtidos – 6 W



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Ye *et al.* (2022).

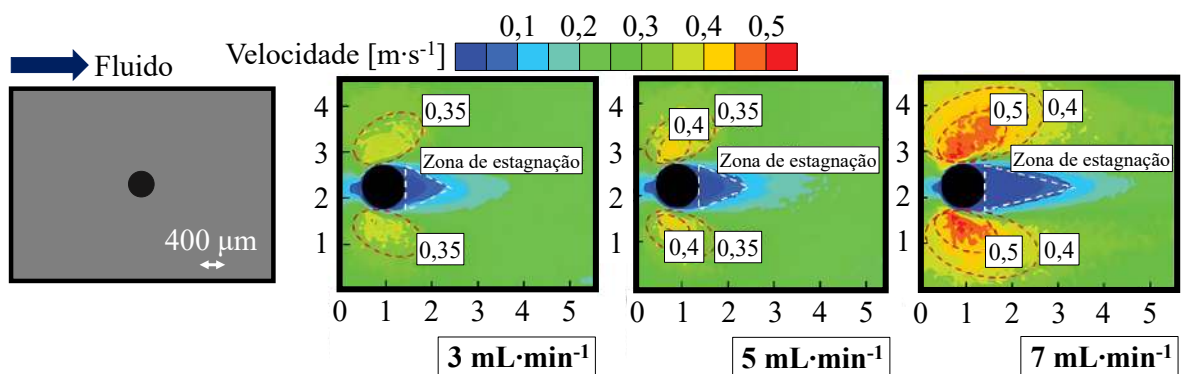
Figura 52 – Resultados térmicos obtidos – 8 W



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Ye *et al.* (2022).

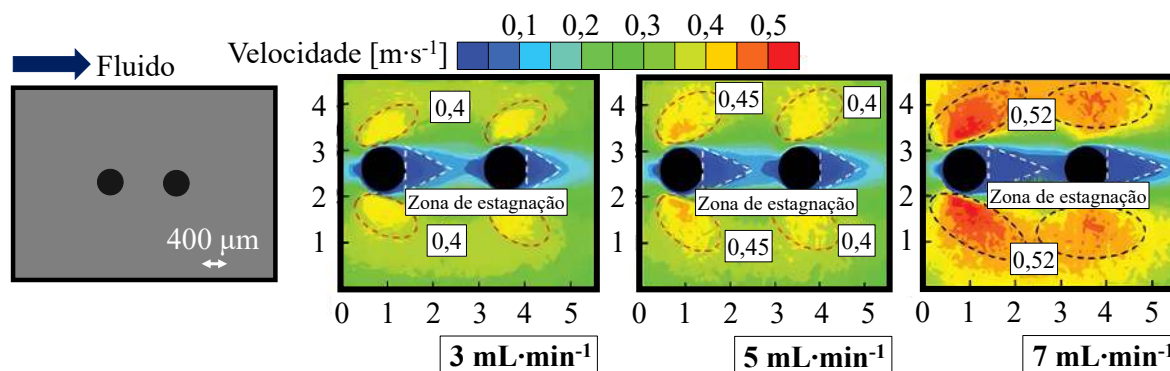
Uma abordagem inovadora trazida por Ye *et al.* (2022) é utilizar um equipamento de velocimetria de imagem de micropartículas, o micro-PIV (sigla em inglês para *Particle Image Velocimetry*), capaz de monitorar o fluxo nos trocadores de calor. O arranjo formado pelo micropilar único apresentou uma região de alta velocidade em suas laterais e uma zona de estagnação a jusante do pilar (Figura 53). O arranjo horizontal apresentou uma configuração semelhante à do pilar único, sendo que a zona de estagnação no segundo pilar é inferior à primeira (Figura 54). Por sua vez, o arranjo vertical apresenta um comportamento único, marcado por maiores velocidades máximas em todas as vazões, o que intensifica a transferência de calor por convecção e corrobora os resultados observados (Figura 55).

Figura 53 – Distribuição da velocidade para o arranjo com micropilar único



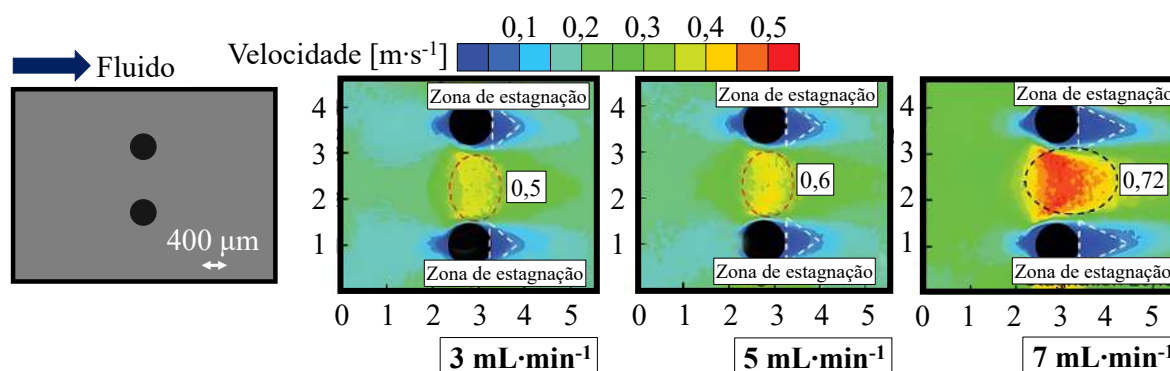
Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Ye *et al.* (2022).

Figura 54 – Distribuição da velocidade para o arranjo de dois micropilares dispostos horizontalmente



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Ye *et al.* (2022).

Figura 55 – Distribuição da velocidade para o arranjo de dois micropilares dispostos verticalmente



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Ye *et al.* (2022).

2.6 DESFECHO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Por meio da revisão bibliográfica, entende-se que a questão do gerenciamento dos resíduos elétricos e eletrônicos gerados pela atual sociedade torna preocupante a manutenção dos ecossistemas e, por conseguinte, a saúde e a sobrevivência dos seres vivos. As alternativas levantadas para o tratamento desses resíduos – especialmente das baterias, que compõem grande parte deles – têm avançado na atualidade, o que culminou em processos e técnicas mais eficientes do ponto de vista da recuperação metálica, além de trazer à tona abordagens cada vez mais sustentáveis, tratando o tema de forma completa e precisa. Dentro desse contexto, é sabido que a rota hidrometalúrgica é o grande expoente, e a utilização de soluções lixiviadoras com menor impacto ambiental representa um passo considerável no processo, o que requer a ampliação de estudos e pesquisas que viabilizem a proposta do ponto de vista do custo-benefício, garantindo um tratamento ambientalmente responsável para as baterias no fim de sua vida útil.

A respeito dos compostos obtidos na reciclagem das baterias – em especial das LIBs –, percebe-se que os esforços atuais para sua reintrodução na cadeia produtiva se concentram no desenvolvimento de novas baterias – um processo denominado ressíntese. Esse processo, embora bastante importante no tratamento desse resíduo, cerceia o potencial inovador e tecnológico dos materiais encontrados nas baterias. Baseado nisso, diversos estudos têm se voltado para a aplicação dessa recuperação em outras tecnologias, como, por exemplo, o desenvolvimento de pseudocapacitores, catalisadores e sensores de alto desempenho – o que representa um olhar relevante e alternativo sobre o tema. Buscando intensificar e estender a gama de aplicações dos compostos, a nanotecnologia se apresenta como um setor essencial para o desenvolvimento de estruturas nanométricas, o que pode facilitar e viabilizar o uso dos produtos dessa reciclagem em outras tecnologias – uma abordagem ainda bastante escassa.

Considerando que a reciclagem das baterias pode favorecer o desenvolvimento de compostos em escala nanométrica, uma possibilidade emergente é a utilização destes para a fabricação de nanocompósitos. As matrizes poliméricas têm ganhado espaço em estudos na atualidade, em especial o polidimetilsiloxano (PDMS) – elastômero versátil, de fácil manuseio e alto custo-benefício –, e a incorporação de nanopartículas obtidas da reciclagem de baterias de íons de lítio nesse elastômero ainda é pouco estudada. Esse tipo de material formado promete combinar a flexibilidade e o baixo peso do PDMS com o potencial de condução térmica dos compostos metálicos obtidos das baterias, fortalecendo alternativas inovadoras no setor do gerenciamento térmico. Acerca dos nanocompósitos de PDMS, diversos estudos têm reportado o aumento das propriedades térmicas com a incorporação de partículas de caráter metálico e, se forem aplicadas partículas obtidas do reaproveitamento de resíduos elétricos potencialmente tóxicos em desuso – como é o caso das baterias –, isso representará um passo importante em direção ao desenvolvimento sustentável. No que tange aos nanocompósitos de PDMS, têm sido observados também fenômenos de aglomeração e dispersão ineficiente, o que requer, necessariamente, análises morfológicas, estruturais e topológicas das estruturas com eles fabricadas, bem como caracterizações das propriedades físicas e químicas alcançadas.

Dentro do cenário de gerenciamento térmico, o aperfeiçoamento de microdissipadores de calor é bastante relevante, buscando suprir as necessidades do setor. Os experimentos envolvendo esses trocadores de calor reúnem análises térmicas e hidrodinâmicas que viabilizam a sua utilização em diferentes tecnologias, e analisar dispositivos térmicos fabricados em nanocompósitos de PDMS com partículas obtidas da reciclagem de baterias apresenta-se como uma proposta.

Assim sendo, o presente trabalho buscou analisar, do ponto de vista termohidrodinâmico, microtrocadores de calor com arranjos alinhado e escalonado de micropilares, fabricados em compósitos de PDMS com partículas recuperadas da reciclagem de baterias de íons de lítio em fim de vida útil, em diferentes percentuais. A pesquisa utilizou uma rota hidrometalúrgica sustentável para a obtenção do material nanoparticulado, além de contar com diferentes técnicas de caracterização do composto e das superfícies fabricadas, criando um cenário ideal e inovador para a introdução do nanocompósito no setor de gerenciamento térmico.

3 METODOLOGIA

Nesta pesquisa, foram avaliadas quatro combinações formadas pela matriz polimérica de polidimetilsiloxano (PDMS), incluindo uma amostra de PDMS puro e outras três, na forma de compósitos, contendo diferentes concentrações de nanopartículas obtidas a partir do processo de reciclagem de baterias de íons de lítio no final de sua vida útil. Doravante, essas combinações são identificadas como:

- PDMS – 0: mistura homogênea de PDMS com 0% de concentração de nanopartículas, isto é, PDMS puro;
- PDMS – 5: mistura homogênea de PDMS com 5% de concentração de nanopartículas;
- PDMS – 10: mistura homogênea de PDMS com 10% de concentração de nanopartículas; e
- PDMS – 15: mistura homogênea de PDMS com 15% de concentração de nanopartículas.

Importa salientar que essas concentrações foram calculadas com base na massa de PDMS, sem considerar a adição do agente de cura, o qual foi incorporado após a homogeneização da mistura inicial.

A fim de explicar todas as etapas desenvolvidas nessa pesquisa, a Metodologia foi dividida em duas partes principais. Enquanto uma foca nos aspectos de fabricação e caracterização das amostras, a outra trata da fabricação e dos testes com os microtrocares de calor desenvolvidos.

3.1 HIDROMETALURGIA: OBTENÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS

Nesta pesquisa, foram utilizadas baterias de íons de lítio no fim da vida útil (Figura 56a) como matéria-prima para a produção de nanopartículas de óxidos metálicos. Para isso, aplicou-se a tecnologia *RecycLib* patenteada pelo *Center for Advanced and Sustainable Technologies* (CAST) (SANTOS *et al.*, 2021), da UNESP – FESJ – Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista (SP).

As baterias utilizadas para a obtenção das nanopartículas foram do tipo secundário (isto é, baterias recarregáveis), de polímero de íons de lítio, fabricadas pela Ningde Amperex Technology Limited, modelo JK50, e comumente empregadas em aparelhos celulares das marcas Motorola e Lenovo. As células de íons de lítio desses dispositivos de armazenamento elétrico apresentam, em sua composição, os elementos listados na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição das células de íons de lítio da bateria JK50 – Ningde Amperex Technology Limited

Componente da célula	Nome químico comum	Concentração [%]
Eletrodo positivo	Óxidos litiados de cobalto, óxidos litiados de manganês e/ou outros óxidos metálicos proprietários	10–50
Eletrodo negativo	Grafite e/ou carbono	5–30
Ligantes	Fluoreto de polivinilideno (PVDF) e/ou politetrafluoretileno (PTFE)	0–5
Sal do eletrólito	Sal de lítio (hexafluorofosfato de lítio e tetrafluoroborato de lítio)	0–5
Solvente do eletrólito	Solventes orgânicos: carbonato de etileno, carbonato de dietila, carbonato de dimetila, carbonato de etilmetila e carbonato de propileno	5–20
Outros componentes	Cobre	2–15
	Alumínio	2–40
	Níquel	0–5
	Negro de fumo	0–2
	Polietileno (PE) e/ou polipropileno (PP)	1–5

Fonte: Adaptado de Lenovo (2020).

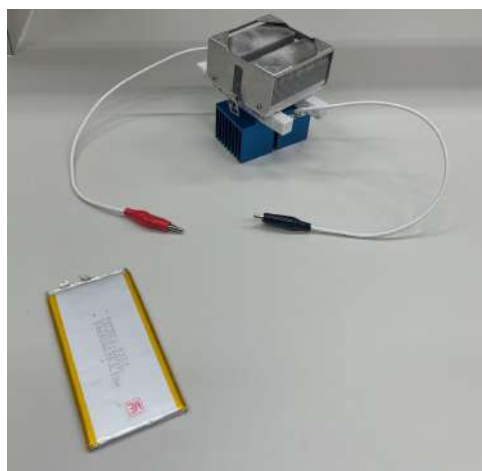
O processo iniciou-se com a descarga elétrica segura das baterias, realizada por meio de um sistema de resistores elétricos com dissipador térmico (Figura 56b). Em seguida, as baterias foram desmontadas manualmente e desenroladas para exposição de suas folhas metálicas internas, das quais foi separado o cátodo – composto por alumínio com óxido de lítio e cobalto aderido. As folhas que contêm o material catódico foram cortadas em tiras para facilitar o manuseio e aumentar a eficiência da etapa de extração do óxido (Figura 56c). A extração ocorreu pela imersão do material catódico na solução patenteada pelo CAST e baseada em um hidróxido de metal alcalino, caracterizando um processo hidrometalúrgico, realizado em equipamento de lavagem ultrassônica (marca Ultronique) (Figura 56d).

Figura 56 – Etapas iniciais de obtenção das nanopartículas

(a) Bateria de íons de lítio – JK50



(b) Sistema de descarregamento elétrico



(c) Corte das folhas metálicas internas



(d) Imersão do material catódico na solução



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Após a extração (Figura 57a), o material foi submetido a etapas de centrifugação (Bench Centrifuge, marca KASVI, modelo K14-5000M) (Figuras 57b e 57c) e de lavagem com água deionizada (Figura 57d), com o objetivo de aumentar sua concentração.

Figura 57 – Etapas de purificação da mistura

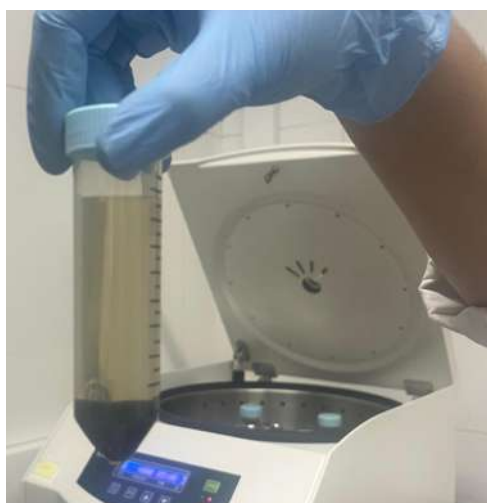
(a) Finalização do processo de extração



(b) Centrifugação



(c) Separação obtida da centrifugação



(d) Processo de lavagem



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Em seguida, o composto resultante foi aquecido em uma chapa aquecedora com agitador magnético (marca Fisatom, modelo 752A) (Figura 58a), para a remoção inicial da água deionizada presente na mistura, sendo posteriormente seco em estufa térmica com circulação de ar (marca MyLabor Equipamentos, modelo SSDc) (Figura 58b).

O composto particulado obtido passou, então, por uma etapa de peneiramento em peneira granulométrica (marca Bertel), com abertura de 48 mesh (aproximadamente 0,3 mm) (Figura 58c), a fim de reter possíveis partículas de maior tamanho. Essas etapas tiveram como objetivo eliminar impurezas e, ao final, obter um óxido metálico, na forma de óxido de lítio e cobalto (LiCoO_2) de alta pureza, com propriedades físico-químicas adequadas a novas aplicações

tecnológicas (Figura 58d).

Figura 58 – Etapas finais da obtenção das nanopartículas

(a) Chapa aquecedora com agitador magnético



(b) Secagem em estufa térmica



(c) Peneira granulométrica



(d) Composto obtido armazenado



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Vale ressaltar que os materiais das baterias não utilizados nesta pesquisa foram destinados a outras rotas de reaproveitamento e reciclagem, reforçando uma abordagem integral de desenvolvimento sustentável e o compromisso com a preservação do meio ambiente.

3.2 DESENVOLVIMENTO DOS COMPÓSITOS

Diversos testes foram realizados com o objetivo de determinar as principais características dos materiais envolvidos nesta pesquisa. Com foco especial na avaliação da influência das

nanopartículas na matriz polimérica de PDMS, a Tabela 4 apresenta os ensaios executados.

Tabela 4 – Caracterização das amostras

Categoria de apreciação	Medição	Material
Análise por técnicas de microscopia e espectroscopia	Composição química Morfologia	Nanopartículas PDMS – 0, 5, 10 e 15
Caracterização física	Densidade (ρ_n)	Nanopartículas
Caracterização térmica	Calor específico à pressão constante (c_p)	PDMS – 0, 5, 10 e 15
	Condutividade térmica (k)	PDMS – 0, 5, 10 e 15
Caracterização mecânica	Curva σ - ε	PDMS – 0, 5, 10 e 15
	Tensão limite de escoamento (σ_{lp})	PDMS – 0, 5, 10 e 15
	Tensão de ruptura (σ_{rup})	PDMS – 0, 5, 10 e 15
	Módulo de elasticidade (E)	PDMS – 0, 5, 10 e 15
	Deformação na ruptura (ε_{rup})	PDMS – 0, 5, 10 e 15
Caracterização superficial dos microtrocaadores de calor	Ângulo de contato (θ)	PDMS – 0, 5, 10 e 15: arranjo alinhado e arranjo escalonado

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com o objetivo de discutir cada medição realizada, as seguintes seções descrevem o processo de fabricação das amostras e, em seguida, as técnicas empregadas nas respectivas análises e caracterizações.

3.2.1 Manuseio do compósito e desenvolvimento das amostras

A fabricação das amostras foi realizada no laboratório do Núcleo de Estudos em Transferência de Calor e Nanotecnologia (NEST-n), localizado no Hangar Tecnológico da UNESP – FESJ – Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista (SP), onde estão disponíveis os equipamentos necessários ao processo, como balança de precisão, agitador mecânico, dessecador, bomba de vácuo, estufa térmica de secagem, entre outros, além do polímero polidimetilsiloxano (PDMS) e seu respectivo agente de cura.

Inicialmente, os recipientes e instrumentos laboratoriais foram submetidos a um processo de higienização, utilizando uma solução detergente e, posteriormente, álcool isopropílico, com o objetivo de evitar qualquer interação ou reação indesejada do polímero durante a fabricação das amostras.

O polímero utilizado foi o PDMS SylgardTM 184 *Silicone Elastomer Base* (Figura 59a), da empresa Dow Corning®, combinado com o agente de cura, que foi adicionado na proporção

usual de 10% da massa do polímero (10:1). Com o auxílio de uma balança de precisão (marca Dubësser, modelo ATY224R), a massa do bquer de vidro foi previamente tarada, e o PDMS foi então acrescentado ao recipiente utilizando uma seringa médica graduada (Figura 59b). O valor registrado na balança foi monitorado para o cálculo da massa do agente de cura e da quantidade correspondente de nanopartículas.

Após a determinação das proporções percentuais, as nanopartículas foram incorporadas ao PDMS com o auxílio de uma espátula (Figura 59c).

Figura 59 – Etapas iniciais da fabricação das amostras

(a) PDMS e agente de cura (b) Medição da massa de PDMS (c) Inserção das nanopartículas



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

A matriz polimérica contendo as nanopartículas foi homogeneizada utilizando um agitador mecânico (marca Dubësser – Marte Científica, modelo OneSense®) com velocidade angular de 2000 rpm durante 20 minutos, garantindo uma mistura visualmente uniforme. Somente após esta homogeneização é que o agente de cura foi adicionado e novamente misturado ao composto (Figura 60).

Figura 60 – Homogeneização com agitador mecânico



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

O composto resultante foi então transferido para um dessecador, cujo objetivo é a eliminação das bolhas de ar geradas durante o processo de homogeneização. Este equipamento consiste

em um recipiente isolado, interligado a uma bomba de vácuo (marca Primatec, modelo 121), responsável por extrair o ar do seu interior (Figura 61a). Embora o processo seja relativamente demorado (cerca de 1 hora), sua execução é essencial para garantir a ausência de bolhas de ar, as quais poderiam comprometer as caracterizações subsequentes. Durante o procedimento, as bolhas de ar emergem à superfície do composto, onde colapsam devido ao vácuo formado no interior do dessecador (Figura 61b).

Figura 61 – Processo de retirada de bolhas de ar do composto formado

(a) Bomba de vácuo e dessecador (b) Bolhas de ar na superfície do composto



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Um molde cilíndrico com diâmetro de 25 mm e altura de 7,5 mm foi projetado (Figura 62a) e desenvolvido por impressão 3D em resina UV (referindo-se à cura por luz ultravioleta) da marca Anycubic, modelo Standard Resin (Figura 62b), no Laboratório de Aeronáutica 2 da UNESP – FESJ – Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista (SP). A geometria apresenta espessura de parede de 2,5 mm e é nela que o composto foi vertido após o processo anterior (Figura 62c), onde eventuais bolhas superficiais, de dimensões muito pequenas nesse estágio, foram eliminadas com o auxílio de uma agulha de aço fina e com diâmetro de 0,5 mm.

Figura 62 – Preparação das amostras nos moldes

(a) Modelo 3D (b) Moldes impressos em resina (c) Despejo do composto



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

O composto, já inserido no molde, foi transferido para uma estufa digital de esterilização e se-

cagem (marca Dubësser – SolidSteel, modelo SSD-21L), na qual permaneceu a uma temperatura de 80 °C durante 1 hora, garantindo a cura completa das amostras (Figura 63a).

Após a secagem, as amostras foram retiradas da estufa e deixadas à temperatura ambiente, condição ideal para o manuseio. Nesse momento, foram cuidadosamente desenformadas com o auxílio de gabaritos milimetricamente calibrados – que serviram como lâminas, a fim de evitar quebras e assegurar a integridade geométrica das amostras (Figura 63b). Por fim, as amostras foram acondicionadas em polietileno expandido (EPE, sigla em inglês para *Expanded Polyethylene*), e devidamente identificadas de acordo com os teores de nanopartículas, para evitar qualquer confusão durante as caracterizações (Figura 63c). Todo esse procedimento foi repetido para cada amostra, respeitando o percentual específico de nanopartículas.

Figura 63 – Etapas finais da fabricação das amostras

(a) Amostras na estufa de secagem e cura



(b) Desmoldagem das amostras



(c) Identificação das amostras para caracterização



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

3.3 CARACTERIZAÇÕES DAS AMOSTRAS

3.3.1 Análises laboratoriais por técnicas de microscopia e espectroscopia: nanopartícula obtida e compósitos desenvolvidos

A etapa inicial da caracterização das nanopartículas e dos compósitos desenvolvidos consistiu na análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), realizada na UNESP – FEIS – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (SP). Essa análise constitui uma etapa complementar que permite avaliar a morfologia e a microestrutura, possibilitando a verificação da distribuição, do tamanho e da forma das nanopartículas e sua incorporação na matriz polimérica de PDMS, o que corrobora os resultados esperados quanto às propriedades térmicas e mecânicas.

Por meio desse tipo de análise, é possível identificar a qualidade dessa incorporação, evidenciando defeitos, porosidades e aglomerações que possam comprometer a adesão das nanopartículas ao material.

Complementarmente, o uso da Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X (EDS, sigla em inglês para *Energy Dispersive Spectroscopy*) possibilitou determinar a composição química dos constituintes dos compósitos, evidenciando os elementos específicos presentes nas nanopartículas obtidas da reciclagem de baterias de íons de lítio, como o cobalto.

3.3.2 Caracterização física das nanopartículas obtidas: densidade (ρ_p)

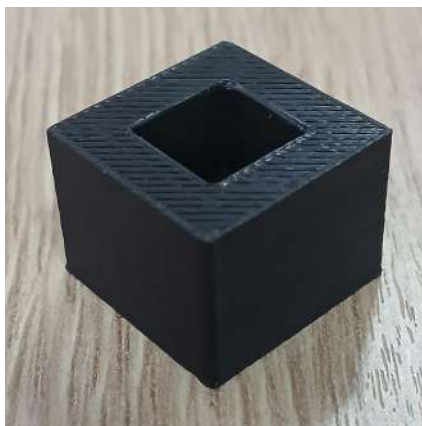
Para complementar as análises que envolvem as características das nanopartículas e o seu potencial no desenvolvimento de nanocompósitos de matriz polimérica, optou-se por medir sua densidade.

O processo de obtenção dessa propriedade teve caráter experimental e consistiu em preencher com nanopartículas um receptáculo cúbico de volume conhecido. Essa geometria foi projetada em *software* de engenharia e fabricada por técnicas de impressão 3D em filamento plástico, como mostra a Figura 64. Para a determinação da incerteza volumétrica do recipiente, considerou-se que o volume do cubo (V), em $[\text{cm}^3]$, é expresso pela função potencial $V = l^3$, na qual l representa a medida de sua aresta, isto é, 1 cm, que, por sua vez, está associada à resolução do instrumento de medição, $s_l = 0,002$ cm. Pelo método da propagação, a incerteza do volume (s_V) é obtida pela derivada dessa função em relação a l , o que pode ser expresso pela Equação 3.1.

$$s_V = 3 \cdot l^2 \cdot s_l \quad (3.1)$$

Substituindo os valores experimentais, é possível encontrar que $s_V = 0,006 \text{ cm}^3$, o que representa apenas 0,6% do volume do recipiente.

Figura 64 – Recipiente desenvolvido para medição da densidade das nanopartículas



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Previamente, a massa desse recipiente foi medida utilizando uma balança de precisão com incerteza de $\pm 0,0001$ g (marca Dub  sser, modelo ATY224R). Esse valor foi posteriormente subtraído das medi  es. Dando seguimento, o interior da geometria foi preenchido com as nanopartículas, que eram compactadas com o auxílio de uma estrutura em formato transversal quadrado, o mesmo da geometria. Após a máxima compacta  o e o nivelamento das nanopartículas, esse conjunto era levado para aferi  o da massa, a qual era descontada da obtida apenas pelo recipiente e dividida pelo volume ocupado, possibilitando o cálculo da densidade das nanopartículas (ρ_p), em $[\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$. Esse procedimento foi repetido inúmeras vezes, contando com o esvaziamento, a limpeza, a pesagem e o preenchimento do recipiente com as nanopartículas.

3.3.3 Caracteriza  o térmica

Com o objetivo de avaliar as propriedades térmicas adquiridas pela inser  o de nanopartículas provenientes da reciclagem de LIBs na matriz polimérica de PDMS, foram realizados experimentos laboratoriais para a caracteriza  o térmica das amostras.

3.3.3.1 Capacidade térmica (C_p) e calor específico    pressão constante (c_p)

O primeiro parâmetro avaliado foi a capacidade térmica    pressão constante das amostras, por meio de ensaios conduzidos no Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano), integrante do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), localizado em Campinas (SP). O procedimento foi conduzido e orientado pela Dr.^a Maria Luíza Braunger, mestre em Física e doutora em Ciência e Tecnologia dos Materiais, em conjunto com o especialista em medidas elétricas, Sr. Leirson Daniel Palermo.

De maneira simplificada, a capacidade térmica (C_p), em $[\text{J}\cdot\text{K}^{-1}]$, representa a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de todo um corpo (ou amostra) em 1°C (ou 1 K). Quando a massa desse corpo (ou amostra)    considerada nessa análise,    possível obter o calor específico (c_p) do material, expresso em $[\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ (BERGMAN, 2019). A partir dessa defini  o,

é possível prever o comportamento térmico esperado de um material destinado a aplicações que envolvem transferência de calor, como é o caso dos microtrocares térmicos fabricados com compósitos de PDMS agregados com nanopartículas obtidas do processo de reciclagem de baterias de íons de lítio.

A determinação da capacidade térmica foi realizada utilizando o sistema PPMS[®] (sigla em inglês para *Physical Property Measurement System*[®], que pode ser traduzida como Sistema de Medição de Propriedades Físicas), da marca Quantum Design, modelo DynaCool[™], ilustrado na Figura 65.

Figura 65 – PPMS[®] – DynaCool[™]



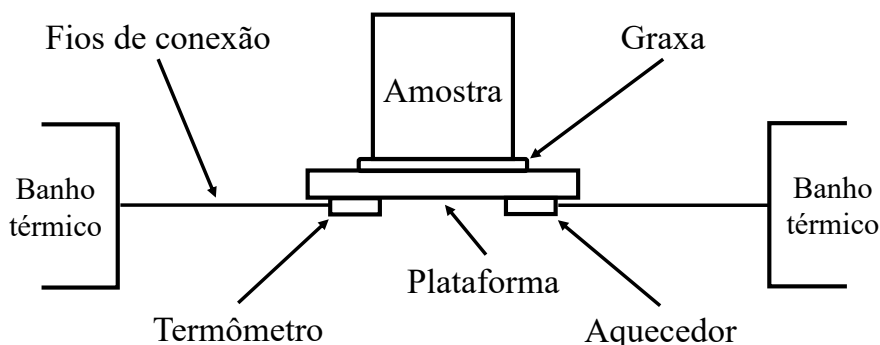
Fonte: Arquivo pessoal (2026).

A opção de capacidade térmica do sistema PPMS[®] mede este parâmetro utilizando uma técnica que controla a aplicação e remoção de calor (dQ), em [J], nas amostras em intervalos de tempo definidos, enquanto monitora simultaneamente a variação de temperatura (dT), em [°C], conforme mostrado na Equação 3.2 (QUANTUM-DESIGN, 2017).

$$C_p = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_p \quad (3.2)$$

Nesse equipamento, delicados filamentos alimentam um aquecedor e um termômetro acoplado à plataforma da amostra, como mostra a Figura 66 (QUANTUM-DESIGN, 2017). O processo consiste na obtenção dos parâmetros da chamada *adenda* e, posteriormente, da própria amostra, que deve ter, preferencialmente, massa entre 1 e 200 mg.

Figura 66 – Elementos do sistema PPMS para leitura da capacidade térmica



Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Quantum-Design (2017).

Para garantir a confiabilidade das medições térmicas, o porta-amostras foi previamente limpo com tolueno, um solvente orgânico eficiente, responsável por remover impurezas e resíduos de graxa de medições anteriores, conforme ilustrado na Figura 67.

Figura 67 – Processo de limpeza do porta-amostras

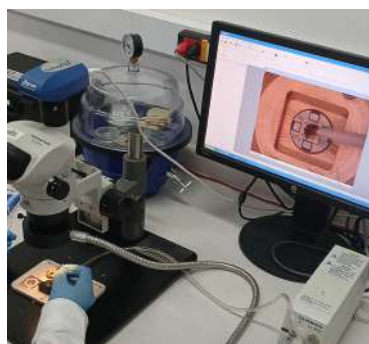


Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Uma pequena quantidade de graxa do tipo H foi aplicada sobre a plataforma de safira que compõe o porta-amostras, da qual partem os filamentos (Figuras 68a, 68b e 68c). De acordo com os responsáveis, esse tipo de graxa garante o contato térmico adequado entre a amostra e a plataforma, além de ser apropriada para aplicações em temperaturas iguais ou superiores à temperatura ambiente. É importante ressaltar que, durante esse procedimento, utiliza-se uma bomba de vácuo de baixa intensidade para estabilizar a plataforma do porta-amostras e evitar danos aos filamentos durante o manuseio.

Figura 68 – Deposição da graxa do tipo H no porta-amstras

(a) Aplicação da graxa



(b) Visão do porta-amstras



(c) Visão microscópica da graxa

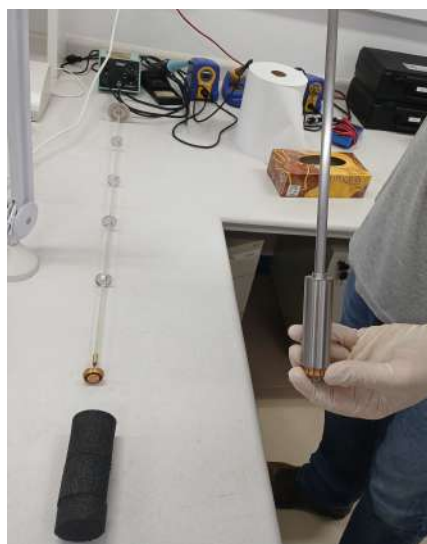


Fonte: Arquivo pessoal (2026).

O conjunto é transportado até o equipamento com o auxílio de uma garra (Figura 69a), que também facilita sua inserção no interior do sistema (Figura 69b). Uma vez posicionado, um abafador térmico cobre o porta-amstras, garantindo a manutenção de uma temperatura uniforme na câmara de medição. Em seguida, a tampa superior do equipamento é fechada, permitindo o início dos testes.

Figura 69 – Introdução do porta-amstras no equipamento

(a) Fixação do porta-amstras na garra



(b) Inserção no equipamento



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

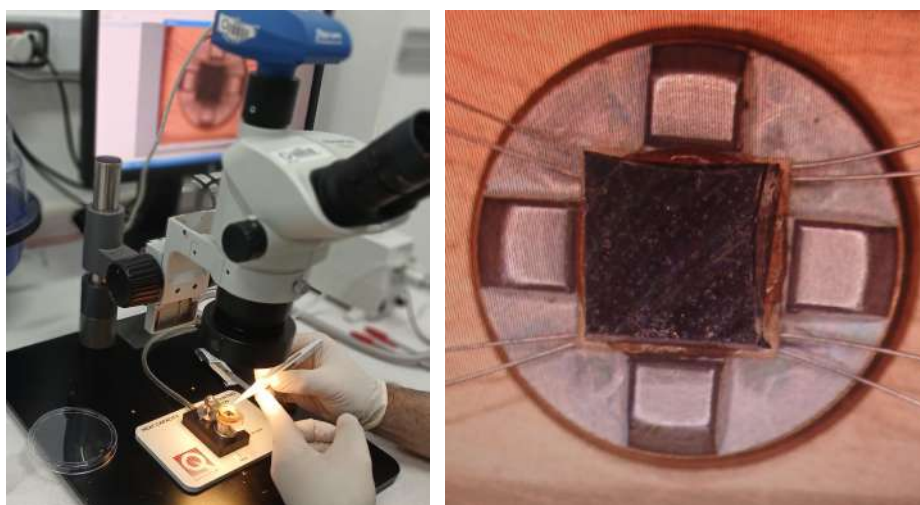
A configuração do equipamento foi realizada sob orientação dos responsáveis e baseou-se na definição de uma temperatura mínima e máxima para o procedimento. No presente estudo, a faixa térmica escolhida foi de 290 K a 340 K, considerada ideal para aplicações envolvendo microtrocares de calor. Outro parâmetro definido foi o número de intervalos dentro dessa faixa em que o equipamento realizaria as leituras; neste caso, optou-se por cinco intervalos (290 K, 302,5 K, 315 K, 327,5 K e 340K). Os experimentos foram realizados em triplicata.

Os testes iniciaram-se com três ciclos consecutivos de purga com gás hélio, seguidos pela formação de vácuo na câmara de medição, permitindo a remoção de gases residuais e garantindo condições ideais para a análise. Para cada medição, primeiramente apenas a *adenda* é avaliada, isto é, o conjunto contendo apenas a graxa, a fim de determinar os valores de referência a serem posteriormente subtraídos dos dados obtidos com a amostra.

Finalizada esta etapa, foram realizadas as medições com a amostra, sendo que cada uma apresentava formato de paralelepípedo, com dimensões aproximadas de 3 mm de largura e comprimento e 2 mm de altura, e massa média em torno de 5 mg (obtida com uma balança de precisão da marca OHRUS). Para isso, o abafador térmico e o porta-amstras foram retirados do equipamento e a amostra foi então cuidadosamente posicionada sobre a graxa na base de safira do porta-amstras (Figura 70a). Este procedimento, que exige grande cautela, foi acompanhado visualmente com o auxílio de um microscópio, cuja imagem foi projetada em tela, permitindo o acompanhamento detalhado de todo o processo (Figura 70b). Este procedimento foi repetido para cada uma das quatro amostras.

Figura 70 – Posicionamento da amostra no porta-amstras

(a) Visualização do procedimento (b) Visão microscópica da acomodação



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Os resultados obtidos da capacidade térmica, organizados de forma clara em planilha, já consideram a subtração da linha de base. A partir desses dados, foi possível calcular o calor específico à pressão constante (c_p), em $[\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$, das amostras por meio da Equação 3.3, utilizando a razão entre a capacidade térmica medida e a massa individual de cada amostra (m), em [g].

$$c_p = \frac{C_p}{m} \quad (3.3)$$

O tratamento estatístico dos dados obtidos pela caracterização utilizou os conceitos de média aritmética e incerteza (ou desvio-padrão amostral) para representar, na forma de um único valor,

a comparação entre os valores de calor específico à pressão constante das diferentes amostras.

O cálculo da incerteza, nesse caso, considerou o erro instrumental de medição de cada um dos testes realizados (s_{c_p}), o desvio-padrão amostral entre as medições realizadas (δ_{c_p}) e o desvio-padrão amostral referente ao conjunto total formado pela faixa de temperaturas (S_{c_p}), todos expressos em $[\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$. O equipamento PPMS[®], utilizado nesta análise, fornece os dados relativos ao erro de medição de cada ensaio individualmente (s_{c_p}).

3.3.3.2 Condutividade térmica (k)

Um aparato experimental foi concebido para aplicar a Lei da Condução Térmica de Fourier, expressa na Equação 3.4 (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2023). Essa lei, fundamental nas ciências térmicas e no dimensionamento de projetos da área, permite descrever a propagação do calor – neste caso, de forma unidimensional – através de um material sólido (CENGEL; GHAJAR, 2009).

$$q = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3.4)$$

Nessa equação, observa-se que o fluxo térmico (q), em $[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$, relaciona-se com a condutividade térmica do material (k), em $[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, e com o gradiente térmico na direção x (dT/dx), em $[\text{°C}\cdot\text{m}^{-1}]$.

A proposta consistiu em desenvolver um sistema no qual a amostra recebesse uma determinada quantidade de calor, enquanto pelo menos dois pontos, posicionados a uma distância conhecida, fossem monitorados termicamente – metodologia já estudada em diversas pesquisas, como a de Park, Alonso & Nunes (1999), Murata *et al.* (2018) e Montegutti, Junior & Haus (2016). Para estimar o fluxo de calor fornecido à amostra, a solução adotada foi o uso de um resistor elétrico, fabricado em aço e retirado de um chuveiro elétrico convencional. Esse resistor possuía 28 mm de comprimento e 15 mm de largura, com resistência elétrica de $1,68 \, \Omega$. A potência elétrica do resistor (P), em $[\text{W}]$, é dissipada como potência ativa, ou seja, transforma-se inteiramente em calor, conforme a Lei de Joule, mostrada na Equação 3.5.

$$P = R \cdot i^2 = q \cdot A \quad (3.5)$$

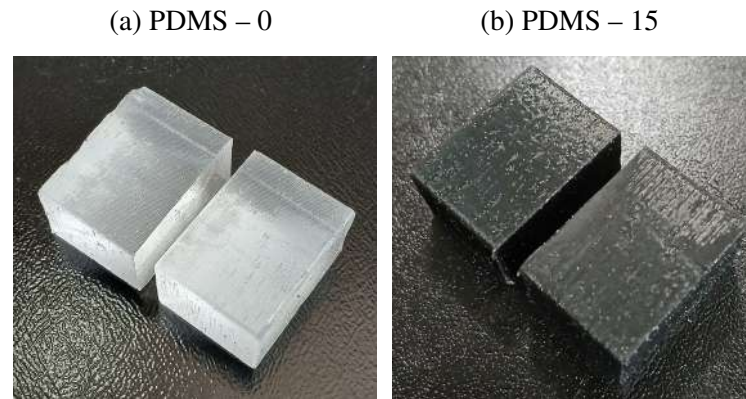
onde R é a resistência elétrica do resistor, em $[\Omega]$; i , a corrente elétrica aplicada no dispositivo termoelétrico, em $[\text{A}]$; e A , a área transversal da amostra, em $[\text{m}^2]$.

Para minimizar efeitos transientes e espaciais, buscou-se:

- Isolar termicamente a amostra para minimizar perdas para o ambiente;
- Garantir o bom contato térmico entre a amostra e o resistor;
- Iniciar medições apenas após o alcance do regime permanente; e
- Assegurar que o resistor cubra integralmente a face da amostra.

As amostras utilizadas neste experimento tinham 28 mm de comprimento (dimensão denominada w_k), 15 mm de largura (l_k) – as mesmas dimensões do resistor – e 20 mm de altura. Uma visualização de algumas das amostras confeccionadas é exibida na Figura 71, com foco para o PDMS – 0 (Figura 71a) e PDMS – 15 (Figura 71b).

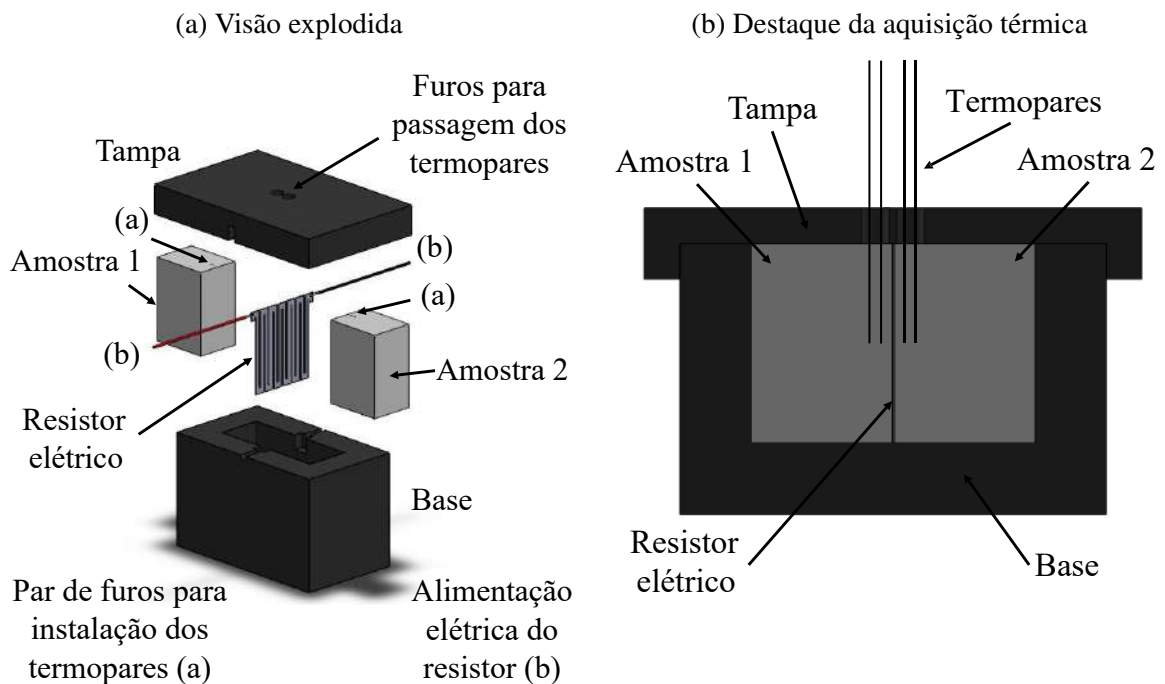
Figura 71 – Exemplos das amostras para caracterização da condutividade térmica



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Para aproveitar ao máximo o calor gerado pelo resistor, decidiu-se desenvolver um sistema em que houvesse uma amostra de cada lado do elemento de aquecimento, formando a configuração amostra-resistor-amostra, como mostra a Figura 72a. Assim, a potência dissipada na forma de calor para cada lado é a metade da potência total. O posicionamento e localização dos termopares de medição são apresentados na Figura 72b.

Figura 72 – Representação do sistema desenvolvido para medição da condutividade térmica



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

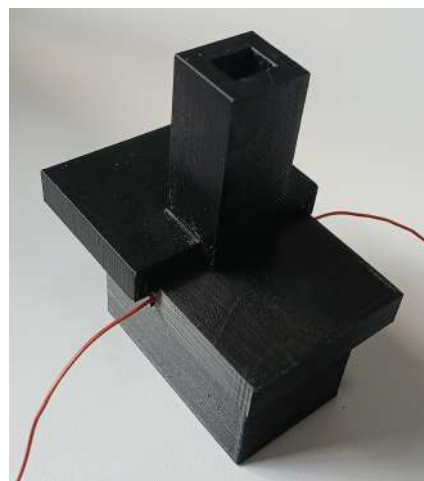
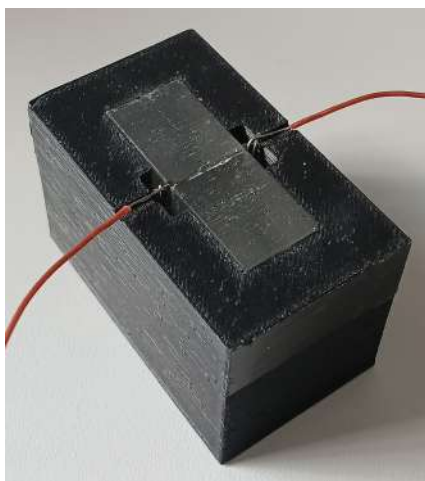
No suporte amostra-resistor, projetado e fabricado por manufatura aditiva em impressão 3D com filamento ABS (acrilonitrila butadieno estireno) (Figura 73a), existe uma tampa para minimizar perdas térmicas por condução e convecção. Na face superior dessa tampa encontram-se duas perfurações de 4,5 mm de diâmetro, dispostas em linha e espaçadas por 5 mm, para a instalação dos termopares.

Para garantir o paralelismo entre os sensores de temperatura blindados do tipo K, projetou-se e fabricou-se um suporte que se encaixa e se apoia sobre a tampa da estrutura (Figura 73b), e por onde desliza uma peça em formato de paralelepípedo que contém duas agulhas de aço, espaçadas a 1,5 mm (Figura 73c). Estas agulhas fazem perfurações até o centro das amostras para a inserção dos termopares, onde finalmente podem ser instalados (Figura 73d), garantindo a distância que integra o cálculo da condutividade térmica (isto é, 1,5 mm).

Figura 73 – Sistema de medição da condutividade térmica

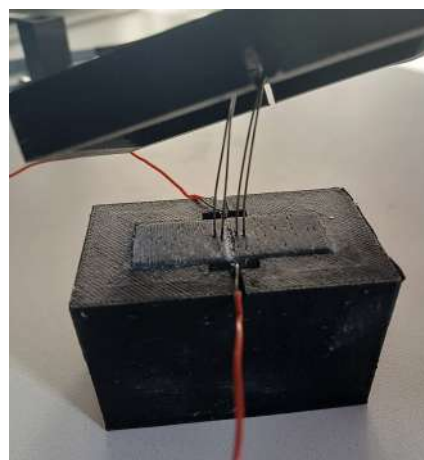
(a) Conjunto amostra-resistor elétrico

(b) Suporte de perfuração



(c) Suporte e sistema de perfuração

(d) Posicionamento dos termopares



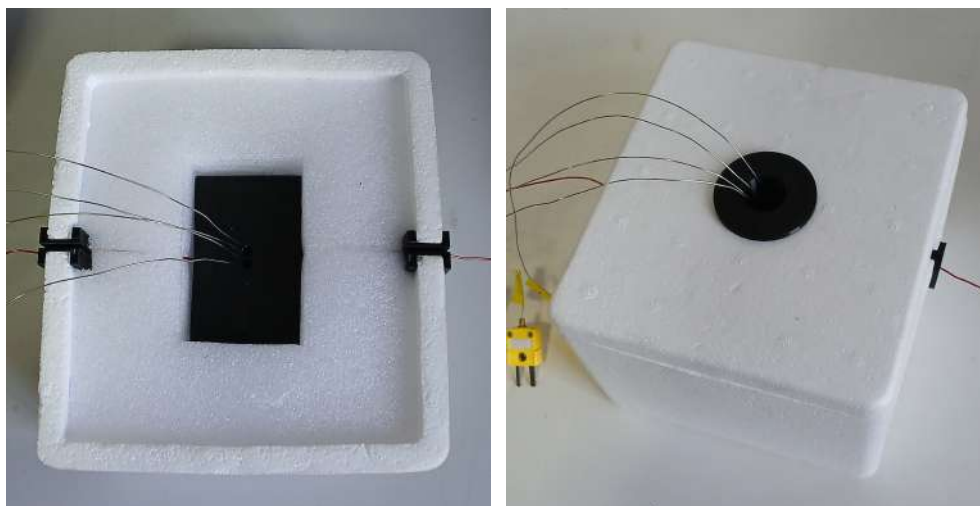
Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Para a realização das medições, todo esse conjunto foi termicamente isolado com camadas de poliestireno expandido (EPS, sigla em inglês para *Expanded Polystyrene*) e polietileno expandido

(EPE), materiais que possuem baixa condutividade térmica e são adequados para minimizar perdas de calor para o ambiente (Figuras 74a e 74b).

Figura 74 – Sistema de medição da condutividade térmica finalizado

(a) Equipamento aberto para visualização (b) Equipamento pronto para operação



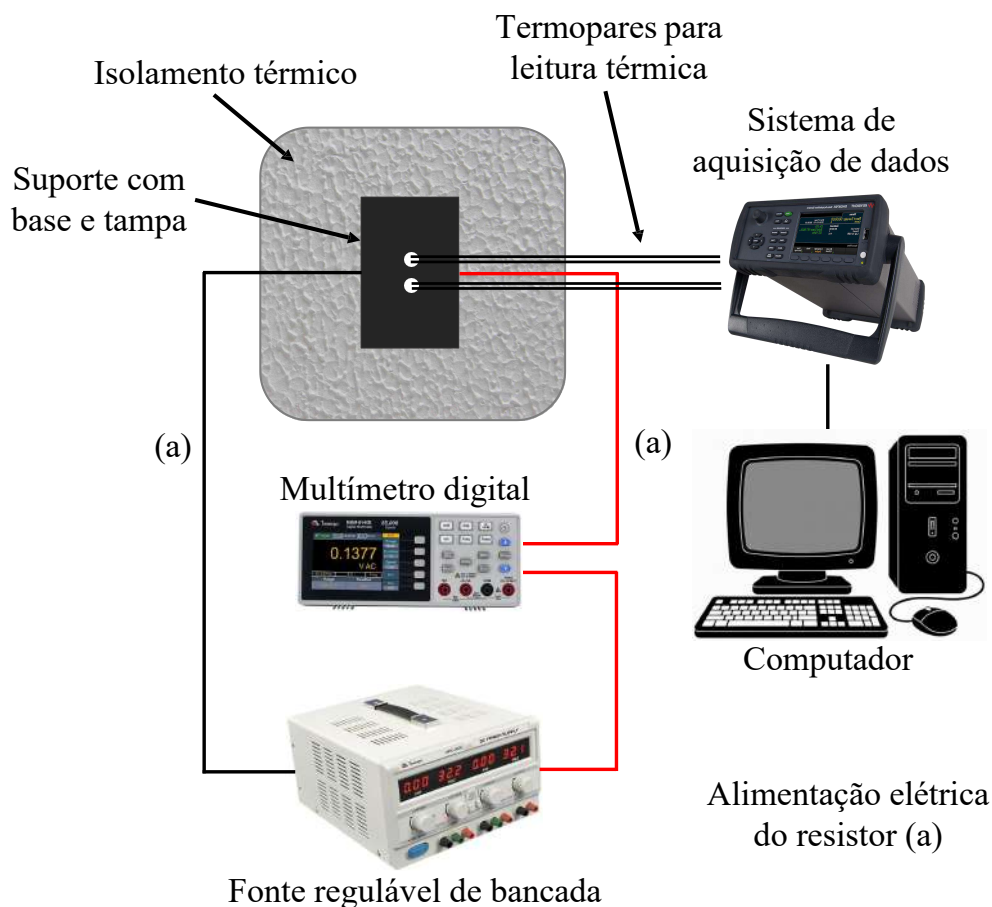
Fonte: Arquivo pessoal (2026).

O aquecimento do resistor elétrico, responsável por transferir calor às amostras, foi realizado por meio de uma fonte de alimentação da marca Minipa, modelo MPC3005. O circuito elétrico conta ainda com um multímetro digital de bancada, também da marca Minipa, modelo MDM-8145B. Esse dispositivo está conectado em série com os fios de alimentação e o resistor. Como, em circuitos em série, a corrente elétrica se mantém constante, optou-se por monitorar essa grandeza elétrica por meio da Equação 3.5, de forma a controlar diferentes potências elétricas de dissipação com precisão.

A metodologia empregada para a realização dos testes experimentais de condutividade térmica utilizou as leituras dos dados obtidos pelos termopares – devidamente conectados aos respectivos cabos de compensação – por meio do sistema de aquisição de dados da marca Keysight, modelo DAQ970A. Esse sistema, que possui uma interface bastante intuitiva, organiza os resultados de temperatura em planilhas, permitindo a obtenção de uma média dos valores térmicos finais das amostras quando o experimento atinge o regime permanente. Uma representação geral do experimento, trazendo as ligações elétricas e de aquisição dos dados térmicos é trazida na Figura 75.

Com esses resultados em mãos, foi possível aplicá-los à Lei da Condução Térmica de Fourier e determinar os valores da condutividade térmica correspondentes à faixa de potências elétricas utilizadas nos experimentos – e convertidas em fluxo de calor, para cada amostra.

Figura 75 – Representação geral do experimento de medição térmica



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para apresentar os resultados térmicos obtidos nos experimentos laboratoriais de medição da condutividade térmica das amostras, é conveniente iniciar pela definição das incertezas envolvidas no processo de medição.

Uma manipulação matemática da Lei da Condução Térmica de Fourier, em conjunto com a Lei de Joule, respectivamente já descritas nas Equações 3.4 e 3.5, evidencia a dependência da condutividade térmica (k) das variáveis: potência elétrica aplicada (P), área de transferência térmica (A), distância axial entre os pontos de monitoramento térmico (dx) e diferença de temperatura observada entre esses pontos (dT), conforme expresso na Equação 3.6.

$$k = \frac{P}{A} \cdot \frac{dx}{dT} \quad (3.6)$$

Sendo assim, a incerteza propagada da medição da condutividade térmica combina a soma dos quadrados das razões entre a incerteza e a respectiva variável medida, conforme apresentado na Equação 3.7.

$$\left(\frac{s_k}{k}\right)^2 = \left(\frac{s_P}{P}\right)^2 + \left(\frac{s_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{s_{dx}}{dx}\right)^2 + \left(\frac{s_{dT}}{dT}\right)^2 \quad (3.7)$$

Nessa equação, s_k representa a incerteza da medição da condutividade térmica, em $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$, a qual se deseja determinar.

No que se refere à aplicação de calor nas amostras, a potência elétrica aplicada (P) foi estabelecida por meio da Lei de Joule, isto é, $P = R \cdot i^2$, o que permite aplicar a definição da Teoria da Propagação dos Erros, apresentada na Equação 3.8, na qual y é uma função de n variáveis independentes x_j , do tipo $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

$$s_y^2 = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot s_{x_j} \right)^2 \quad (3.8)$$

Nessa equação, s_y e s_{x_j} correspondem, respectivamente, às incertezas da variável dependente y e das variáveis independentes x_j . As derivadas parciais expressam a sensibilidade local da variável em relação a cada parâmetro.

Para o caso da Lei de Joule, essa formulação resulta na Equação 3.9. Assumindo $\partial P / \partial R = i^2$ e $\partial P / \partial i = 2 \cdot R \cdot i$, a incerteza da potência elétrica aplicada (s_P), em $[\text{W}]$, pode ser expressa conforme definido na Equação 3.10.

$$s_P^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial R} \cdot s_R \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial i} \cdot s_i \right)^2 \quad (3.9)$$

$$\left(\frac{s_P}{P} \right)^2 = \left(\frac{s_R}{R} \right)^2 + \left(2 \cdot \frac{s_i}{i} \right)^2 \quad (3.10)$$

Nessa expressão, R representa a resistência elétrica do resistor ($1,68 \, \Omega$) e i a corrente elétrica aplicada nos experimentos ($0,15, 0,2, 0,25, 0,3$ ou $0,4 \, \text{A}$), dividida por 2, conforme justificado anteriormente. As incertezas associadas a essas variáveis, isto é, s_R e s_i , equivalem a $0,0001 \, \Omega$ e $0,0001 \, \text{A}$, respectivamente, conforme informado pelo equipamento de medição.

A incerteza associada à área de troca térmica (s_A), em $[\text{m}^2]$, está relacionada às incertezas de medição da largura (s_{l_k}) e do comprimento (s_{w_k}) da amostra, conforme apresentado na Equação 3.11.

$$\left(\frac{s_A}{A} \right)^2 = \left(\frac{s_{l_k}}{l_k} \right)^2 + \left(\frac{s_{w_k}}{w_k} \right)^2 \quad (3.11)$$

Nesse caso, $l_k = 0,015 \, \text{m}$ e $w_k = 0,028 \, \text{m}$. As incertezas dessas medidas correspondem à resolução do paquímetro utilizado, isto é, $s_{l_k} = s_{w_k} = 0,00005 \, \text{m}$. A área de troca térmica (A) é obtida pelo produto $A = l_k \cdot w_k$.

A incerteza associada à distância entre os pontos de monitoramento térmico (s_{dx}), em $[\text{m}]$, corresponde igualmente à fornecida pelo paquímetro, sendo $s_{dx} = 0,00005 \, \text{m}$, enquanto $dx = 0,0015 \, \text{m}$.

Em relação à diferença de temperatura entre os pontos monitorados (dT), em $[\text{°C}]$, a incerteza resulta da combinação das incertezas associadas a cada termopar. Para o caso de uma das amostras, tem-se $s_{T_1} = 0,106 \, \text{°C}$ e $s_{T_2} = 0,117 \, \text{°C}$. A expressão para a incerteza da diferença de

temperatura (s_{dT}), em [°C], é dada pela Equação 3.12.

$$s_{dT}^2 = s_{T_1}^2 + s_{T_2}^2 \quad (3.12)$$

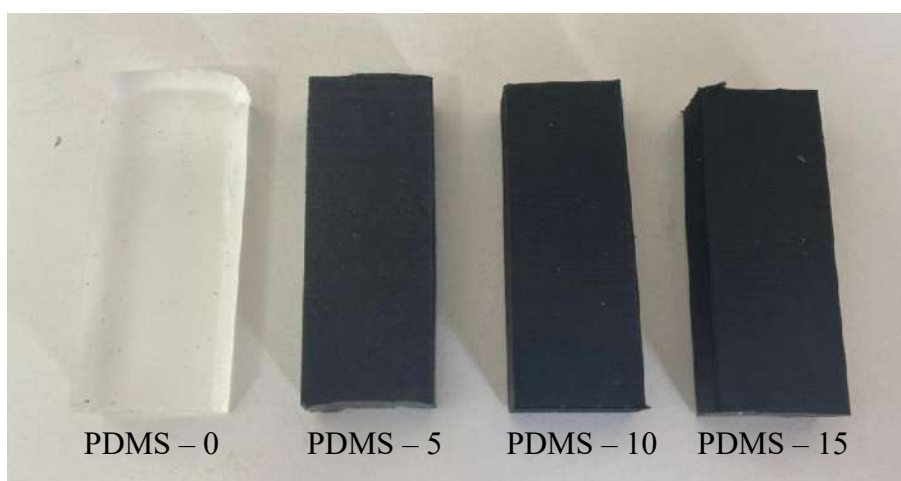
Por fim, vale ressaltar que, para a determinação da incerteza da condutividade térmica, os termos associados à área de troca térmica e à distância entre os pontos de monitoramento térmico permaneceram constantes para as diferentes amostras. Os termos relacionados à aplicação de calor variaram apenas em função da corrente elétrica aplicada – e não das amostras –, enquanto as incertezas associadas às temperaturas dependeram das diferenças de temperatura observadas para cada nível de potência fornecida.

Para a verificação dos resultados de condutividade térmica obtidos para os diferentes compósitos desenvolvidos pela incorporação das nanopartículas na matriz polimérica de PDMS, foi necessário recorrer a equipamentos específicos, dotados de garantia, qualidade e precisão comprovadas. A dificuldade em encontrar equipamentos dessa natureza disponíveis, que realizassem leituras em amostras com dimensões compatíveis com a quantidade de resina e material nanoparticulado disponível, levou à opção de exportar as amostras desenvolvidas.

Uma parceria com o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Lisboa, em Lisboa, Portugal, possibilitou a realização dessa caracterização de maneira mais vantajosa.

O manuseio dos compósitos desenvolvidos seguiu o mesmo procedimento anteriormente descrito. Previamente, moldes foram projetados e fabricados por meio de técnicas de manufatura aditiva em impressão 3D de filamento PLA (ácido polilático), com o objetivo de produzir amostras com dimensões requeridas de 30 mm de comprimento, 15 mm de largura e 65 mm de altura, conforme mostrado na Figura 76.

Figura 76 – Amostras para a medição laboratorial da condutividade térmica



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No local de medição, os testes foram conduzidos em temperatura ambiente (aproximadamente 24,3 °C). O equipamento utilizado foi o TLS-50 mm, da marca Thermtest (Figura 77a). Esse dispositivo consiste em um equipamento portátil avançado para medição de condutividade

térmica em uma variedade de materiais, na faixa de $0,03$ a $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (THERMTEST, 2025). Ele é composto por uma sonda de medição em formato de agulha (Figura 77b), que deve penetrar, por meio de uma perfuração prévia, 50 mm no interior da amostra. É importante também utilizar pasta de alta condutividade térmica (Thermal Joint Compound – Type 120 Silicone, da marca Wakefield Thermal) para suavizar o contato sonda-amostra e favorecer o processo de leitura (Figura 77c).

A tecnologia por trás dessa medição reside no monitoramento da variação da temperatura no tempo registrada durante o aquecimento do fio do sensor pela aplicação de corrente elétrica, que, no caso, foi de 250 mA. A precisão desse equipamento (5%), aliada à sua alta repetibilidade (2%), possibilitou medições térmicas confiáveis (THERMTEST, 2025).

Antes dos testes, foi importante certificar-se da confiabilidade da medição. Para isso, utilizou-se uma amostra polimérica de verificação, cuja condutividade térmica é rastreável (Figura 77d).

Figura 77 – Medição laboratorial da condutividade térmica

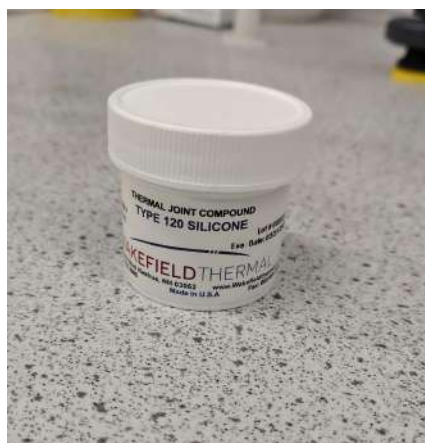
(a) TLS-50 mm – Thermtest

(b) Sonda de medição



(c) Pasta térmica – Wakefield Thermal

(d) Amostra polimérica



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Seguindo as instruções de uso do equipamento, bem como as orientações durante a medição,

foram realizados quatro testes para cada amostra, com intervalos de 5 minutos, permitindo medições confiáveis que quantificassem a melhoria térmica decorrente da incorporação das nanopartículas no PDMS.

O tratamento estatístico desses dados iniciou-se pelo cálculo da incerteza da média ($s_{\bar{k}}$), em $[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, conforme a Equação 3.13, em que n representa o número de experimentos realizados para cada amostra, isto é, $n = 4$.

$$s_{\bar{k}} = \frac{\delta_k}{\sqrt{n}} \quad (3.13)$$

Também é necessário calcular a incerteza s_{s_k} obtida pelas incertezas de medição do equipamento (5%) sobre cada valor individual (s_{j_k}), em $[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, conforme a Equação 3.14.

$$s_{s_k} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n s_{j_k}^2} \quad (3.14)$$

O cálculo da incerteza propagada (s_k), em $[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, é obtido pela raiz da soma dos quadrados das variáveis analisadas, isto é, a incerteza da média ($s_{\bar{k}}$) e a incerteza de medição (s_{s_k}), conforme mostra a Equação 3.15.

$$s_k = \sqrt{s_{\bar{k}}^2 + s_{s_k}^2} \quad (3.15)$$

Esse valor é corrigido pela incerteza expandida S_k , em $[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, que, para um nível de confiança de 95%, utiliza o fator de abrangência $\alpha = 2$, conforme a Equação 3.16, resultando no valor final apresentado como $k = \bar{k} \pm S_k$.

$$S_k = \alpha \cdot s_k \quad (3.16)$$

3.3.4 Caracterização mecânica

A caracterização das propriedades mecânicas dos compósitos de polidimetilsiloxano (PDMS) agregados a diferentes percentuais de nanopartículas foi realizada por meio de ensaios de tração, que consistem na aplicação de uma carga axial sobre corpos de prova – amostras do material – até ocorrer a ruptura (HIBBELER, 2010). Embora o microtrocaador de calor a ser desenvolvido não seja submetido a forças de tração, compreender o comportamento mecânico do compósito com a inserção das nanopartículas na matriz polimérica é relevante, pois pode viabilizar diferentes tecnologias e projetos correlatos mais robustos.

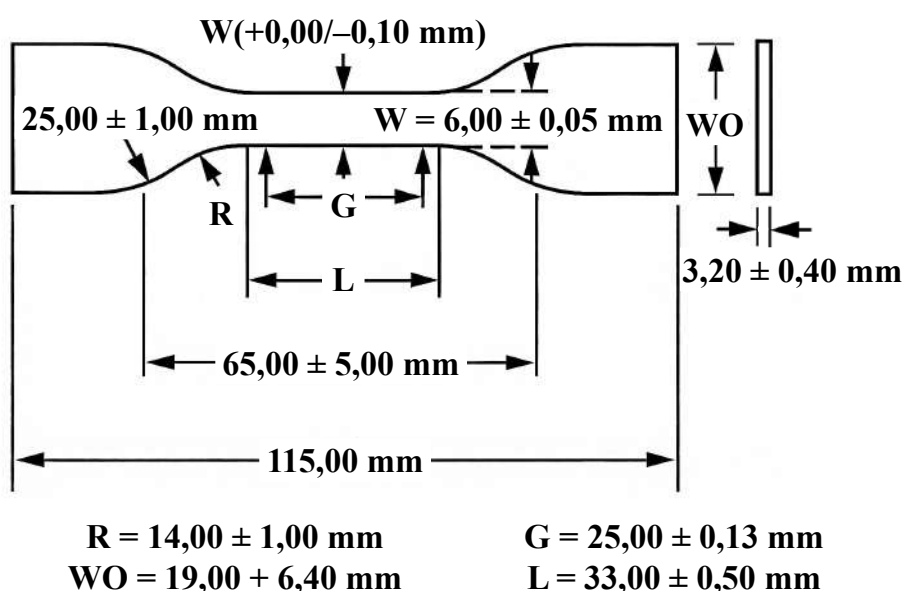
O ensaio de tração permite a determinação de propriedades fundamentais, como resistência do material e comportamento mecânico, além de parâmetros específicos, tais como limites de proporcionalidade e escoamento, alongamento e deformação, módulo de elasticidade (ou módulo de Young), limite de resistência à tração e tensão máxima de ruptura. O ensaio também possibilita

a construção da curva tensão-deformação (ou curva σ - ϵ), facilitando a análise completa do material (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

A norma que padroniza os ensaios de tração em materiais plásticos rígidos e não rígidos, reforçados ou não, é a ASTM D638-14, estabelecida pela ASTM (sigla em inglês para *American Society for Testing and Materials*, que pode ser traduzida como Sociedade Americana para Testes e Materiais) (ASTM INTERNATIONAL, 2014). De acordo com essa norma, os corpos de prova padrão possuem formato de halter e são classificados em cinco tipos, escolhidos conforme as características do material. Para esta pesquisa, optou-se pelo desenvolvimento de corpos de prova do Tipo 4, ideais para comparações diretas entre diferentes condições de rigidez do material.

Os espécimes do Tipo 4 são indicados para plásticos não rígidos com espessura igual ou inferior a 4 mm. A D638-14 também define dimensões padronizadas e respectivas tolerâncias para esses corpos de prova, como ilustrado na Figura 78.

Figura 78 – Especificações geométricas do corpo de prova do Tipo 4 da norma ASTM D638-14



Fonte: Elaborado pelo autor, com base em ASTM INTERNATIONAL (2014).

A partir dessas especificações, foi possível projetar um molde, que posteriormente foi confeccionado por impressão 3D em filamento PLA (ácido polilático). Os quatro moldes impressos – confeccionados simultaneamente para agilizar a fabricação dos corpos de prova – passaram por um tratamento superficial com lixas específicas, com o objetivo de suavizar a superfície em contato direto com o compósito e garantir a ausência de porosidades que pudessem comprometer a precisão geométrica estabelecida pela norma. A Figura 79 ilustra os moldes fabricados e a qualidade superficial obtida após o tratamento.

Figura 79 – Moldes para fabricação dos corpos de prova do Tipo 4 da norma ASTM D638-14



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Com os moldes preparados, foi possível fabricar os corpos de prova seguindo a mesma metodologia empregada na confecção das amostras. Após a fabricação, os corpos de prova passaram por verificação e medição geométrica – essencial para os cálculos posteriores – e identificação individual, garantindo que todas as dimensões e características exigidas pela norma fossem respeitadas, conforme ilustrado na Figura 80.

Figura 80 – Corpos de prova de compósitos de PDMS com diferentes percentuais de nanopartículas, seguindo o Tipo 4 da norma ASTM D638-14



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

A caracterização mecânica das amostras foi realizada no Laboratório de Aeronáutica 4 da UNESP – FESJ – Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista (SP), utilizando uma máquina universal de ensaios autoportante da marca BioPdi (Figura 81a), equipada com célula de carga de 5 kN e operando na velocidade de 50 mm/min, conforme orienta a norma.

Os ensaios de tração foram conduzidos sob Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), conforme estabelecido pela norma ASTM D638-14, e supervisionados pelo técnico responsável do laboratório, Sr. Luís Gustavo Cordioli Russi, mestre em Ciências dos Materiais.

Os dados obtidos pelo equipamento contemplam a carga instantânea aplicada e o deslocamento uniaxial vertical ao longo do tempo. A partir dessas informações, é realizada uma normalização geométrica que relaciona carga à área da seção transversal, e deslocamento ao comprimento útil inicial do corpo de prova, permitindo traçar a curva tensão-deformação do material, calcular suas propriedades e analisar sua fratura (Figura 81b).

Figura 81 – Ensaio de tração durante a operação

(a) Máquina em operação



(b) Rompimento de corpo de prova



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

3.3.4.1 A curva tensão-deformação (ou curva σ - ϵ)

A curva tensão-deformação (ou curva σ - ϵ) é essencial na engenharia de materiais, pois permite a análise de materiais quando submetidos a uma carga de tração ou compressão. Nesse gráfico, a tensão (σ) é representada no eixo da ordenada enquanto a deformação (ϵ), no eixo da abscissa (BOTELHO, 2013).

A tensão de engenharia (ou simplesmente tensão) (σ), expressa em [MPa], é obtida pela razão entre a carga instantânea aplicada perpendicularmente à seção transversal do corpo de prova (F), em [N], e a área inicial da seção transversal do corpo de prova (A_0), em [mm²], conforme mostra a Equação 3.17 (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.17)$$

Para definir o próximo parâmetro é necessário entender o conceito de alongamento do corpo de prova (Δl), em [mm], definido como a variação do comprimento instantâneo (l_i) do corpo de prova, em [mm], em relação ao seu comprimento original (l_0), em [mm], como mostra a Equação 3.18 (HIBBELER, 2010).

$$\Delta l = l_i - l_0 \quad (3.18)$$

Sendo assim, a deformação de engenharia (ou simplesmente deformação) (ε), um parâmetro adimensional geralmente representado em percentual [%], é definida como a razão entre o alongamento (Δl) e o comprimento inicial da seção de medição do corpo de prova (l_0), conforme a Equação 3.19 (HIBBELER, 2010).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.19)$$

O acompanhamento do comportamento mecânico do material, desde o início até a ruptura, possibilita, além de analisar propriedades importantes, a identificar regiões típicas.

A região elástica é comumente observada no início do ensaio e corresponde a uma relação linear entre a tensão e a deformação. Na prática, dentro dessa região, o material tem a capacidade de retornar à sua forma original se a carga for removida. A Lei de Hooke estabelece uma relação entre a tensão e a deformação por meio do módulo de elasticidade (E), em [MPa], conforme a Equação 3.20 (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.20)$$

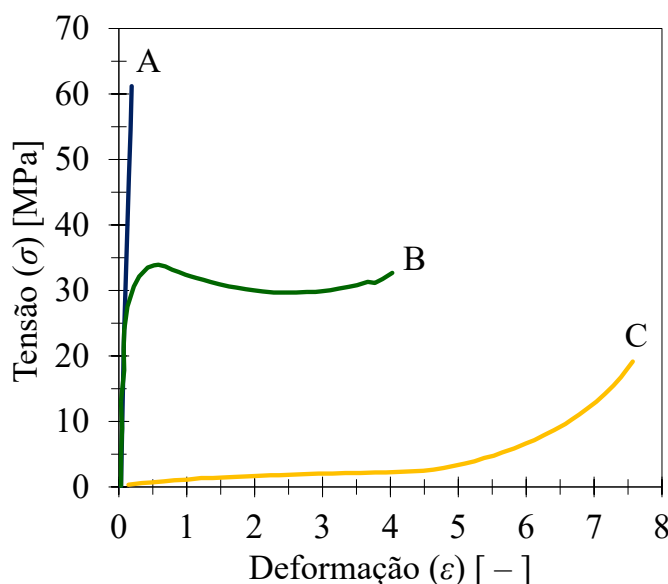
Assim que o comportamento da curva deixa de ser linear, o corpo de prova começa a sofrer os efeitos da deformação plástica. Nessa região de transição, denominada região de escoamento, é definido o limite de proporcionalidade. A tensão correspondente a esse ponto, isto é, no final da região elástica e início da região plástica, estabelece o limite de escoamento (σ_{lp}), em [MPa] (HIBBELER, 2010).

Desde que iniciado o escoamento, o material começa a apresentar uma deformação permanente, caracterizando a região plástica. Para materiais poliméricos, como o PDMS, é nessa região que o corpo de prova experimenta um valor máximo de tensão, indicando o limite de resistência à tração (σ_{max}), que coincide com a ruptura do material, apontando a tensão de ruptura (σ_{rup}), ambas em [MPa] (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Outro parâmetro fundamental na análise da fratura do corpo de prova é a deformação na ruptura (ε_{rup}), um adimensional, que sinaliza a deformação percentual máxima sofrida pelo corpo de prova antes de se romper, o que facilita analisar e classificar o comportamento do material como dúctil ou frágil.

De forma simplificada, o comportamento mecânico dos polímeros quando ensaiados sob tração pode se apresentar de três diferentes formas. Na Figura 82, é possível observar que a curva do polímero A (bastante similar à de materiais cerâmicos) identifica um material frágil, ou seja, que fratura com mínima deformação plástica; enquanto a curva B (bastante similar à de materiais metálicos) caracteriza um polímero plástico, isto é, um material que experimenta uma deformação elástica, seguida pelo escoamento e pela deformação plástica antes da ruptura. Por outro lado, a curva C é predominantemente elástica, retratando um grupo específico de polímeros denominados elastômeros, no qual se incluem as borrachas e também o PDMS, objeto deste estudo. Este gráfico comparativo, trazido por Callister & Rethwisch (2016), proporciona uma expectativa quanto aos resultados que serão obtidos para os corpos de prova ensaiados.

Figura 82 – Curvas tensão-deformação típicas em polímeros



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no trabalho de Callister & Rethwisch (2016).

3.4 MICROTROCADORES DE CALOR: PROJETO, DESENVOLVIMENTO E PREPARAÇÃO DA SEÇÃO DE TESTES

A fabricação dos microtrocares de calor utilizou a mesma técnica já aplicada no manuseio do polímero, ou seja, dispor de um molde previamente desenvolvido que atua como um “negativo” da respectiva peça a ser produzida.

A concepção do molde foi realizada por meio da manufatura aditiva, utilizando impressão 3D em resina UV da marca Anycubic, modelo Standard Resin, no Laboratório de Aeronáutica 2 da UNESP – FESJ – Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista (SP). Esse processo de fabricação baseia-se em técnicas de fotopolimerização, nas quais ocorre a solidificação da resina por meio da exposição à luz ultravioleta, camada por camada, conforme a geometria projetada. O processo inclui ainda a lavagem ultrassônica posterior do objeto construído, para a remoção de resíduos de resina, e uma cura final, responsável por conferir maior resistência mecânica à peça.

O uso da resina busca superar as limitações geométricas da impressão convencional por filamento, além de proporcionar um acabamento superficial superior, garantindo precisão geométrica, lisura e integridade dos micropilares. Os moldes obtidos estão ilustrados na Figura 83 para os dois arranjos de micropilares que serão descritos posteriormente.

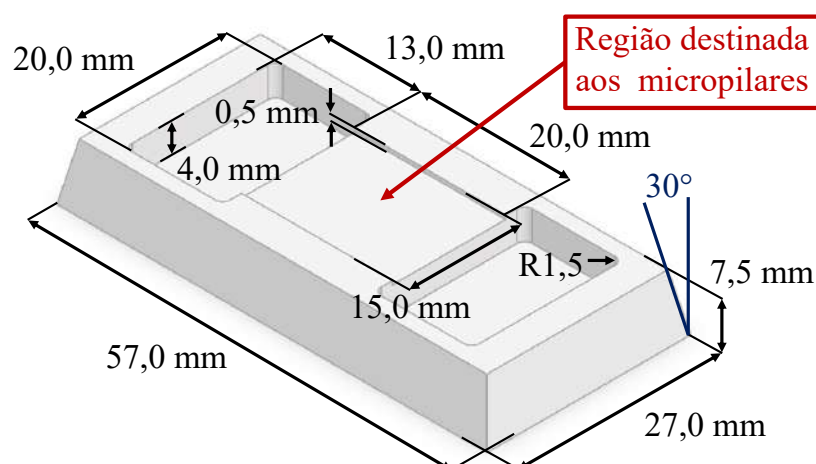
Figura 83 – Moldes para confecção dos microtrocares de calor



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

As estruturas gerais e as dimensões dos dois modelos de microtrocares de calor desenvolvidos são semelhantes, diferindo apenas na superfície microaletada, que apresenta arranjos distintos de micropilares. Assim, a Figura 84 exibe as características geométricas comuns entre esses dispositivos térmicos. Cabe destacar que os aspectos geométricos gerais dos microtrocares de calor se aproveitaram dos descritos na pesquisa de Correa *et al.* (2025), que com sucesso também estudou um nanocompósito de PDMS para sistemas de gerenciamento térmico.

Figura 84 – Dimensões e geometria comuns nos microtrocares de calor



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As duas cavidades localizadas no início e final da geometria correspondem às regiões de *plenum* do microtrocador de calor, e contribuem para a distribuição homogênea do fluxo volumétrico, uniformizar o escoamento por meio da redução da perda de carga, minimizar zonas

de concentração de calor e/ou de fluxo volumétrico – o que favorece indiretamente a troca térmica nos micropilares, melhorando o desempenho do dispositivo como um todo. Nas arestas verticais dessas cavidades foram aplicados arredondamentos com raio de 1,5 mm, que, além de facilitar o desmolde do microtrocador, reduzem a formação de bolhas de ar nas extremidades da geometria.

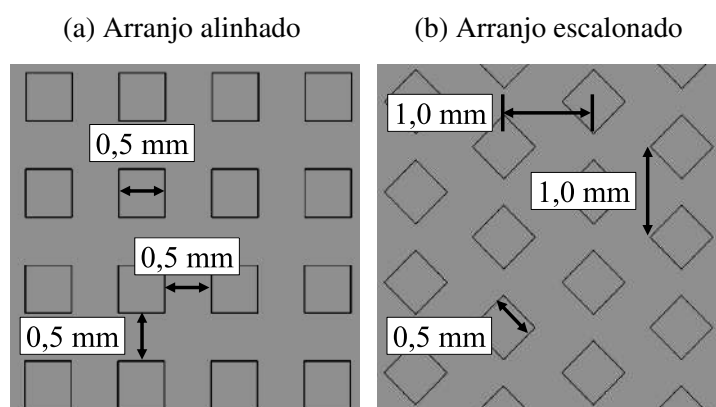
A região microaletada, isto é, a superfície de assento dos micropilares, conecta ambos os *plenuns* e possui 20 mm de comprimento, 15 mm de largura e 0,5 mm de altura.

3.4.1 Arranjos dos micropilares

Neste estudo foram propostas duas diferentes disposições para os micropilares nos micro-trocadores de calor: o arranjo alinhado e o arranjo escalonado, com as devidas características geométricas exibidas na Figura 85. Os micropilares consistem em geometrias cúbicas, com 0,5 mm de aresta.

No arranjo alinhado existe um total de 285 micropilares, distribuídos em 19 fileiras transversais com 15 micropilares cada uma (Figura 85a). Já o arranjo escalonado configura uma disposição em losango com inclinação de 45° (diamantada) e resulta em 275 micropilares, distribuídos em 19 fileiras transversais intercaladas com 14 ou 15 elementos, iniciando-se pela fileira com menor quantidade (Figura 85b).

Figura 85 – Representação superior dos arranjos de micropilares



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para facilitar a identificação posterior dos microtrocadores de calor nos testes e análises termohidrodinâmicas, propõe-se uma nomenclatura específica que combina o percentual de incorporação de nanopartículas ao compósito de polidimetilsiloxano (PDMS) e a terminação **A**, para o arranjo alinhado, ou **E**, para o arranjo escalonado. Assim, cada microtrocador de calor confeccionado passou a ser denominado conforme apresentado na Tabela 5.

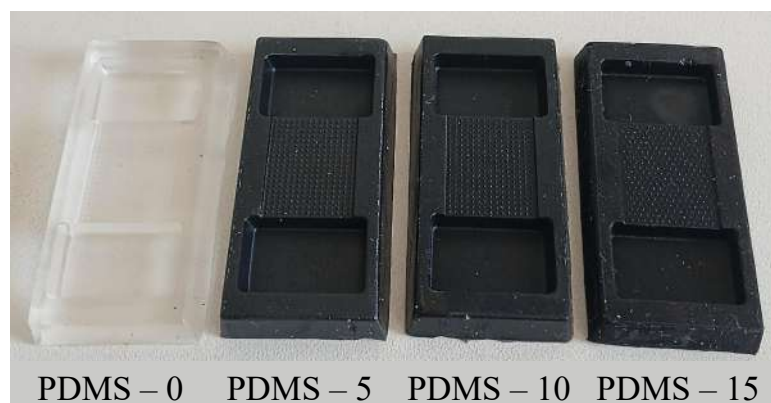
Tabela 5 – Nomenclatura dos microtrocaadores de calor em função do arranjo e da incorporação nanoparticulada

Compósito	Arranjo alinhado (A)	Arranjo escalonado (E)
PDMS – 0	PDMS – 0A	PDMS – 0E
PDMS – 5	PDMS – 5A	PDMS – 5E
PDMS – 10	PDMS – 10A	PDMS – 10E
PDMS – 15	PDMS – 15A	PDMS – 15E

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Portanto, este estudo realizou a fabricação de dois microtrocaadores de calor (um com arranjo alinhado e outro escalonado) para cada compósito desenvolvido (PDMS – 0, PDMS – 5, PDMS – 10 e PDMS – 15), totalizando oito dispositivos térmicos. Um exemplar parcial deste conjunto desenvolvido é mostrado na Figura 86, que destaca os diferentes arranjos.

Figura 86 – Diferentes microtrocaadores de calor fabricados para cada concentração



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4.1.1 Caracterização da superfície aletada dos microtrocaadores de calor: ângulo de contato (θ)

Para caracterizar as superfícies aletadas dos microtrocaadores de calor fabricados com os compósitos desenvolvidos foram medidos e calculados os ângulos de contato, capazes de quantificar e qualificar a interação entre a água deionizada de alta pureza e a superfície sólida. Esse tipo de caracterização analisa a molhabilidade da superfície, a qual é influenciada por sua heterogeneidade e rugosidade.

A região microaletada de cada microtrocador de calor foi seccionada do corpo do dispositivo, sendo devidamente identificada posteriormente. Apoiado sobre um suporte, na superfície foi depositada verticalmente uma gota de água deionizada com volume de 20 μL , com o auxílio de uma micropipeta da marca Digipet.

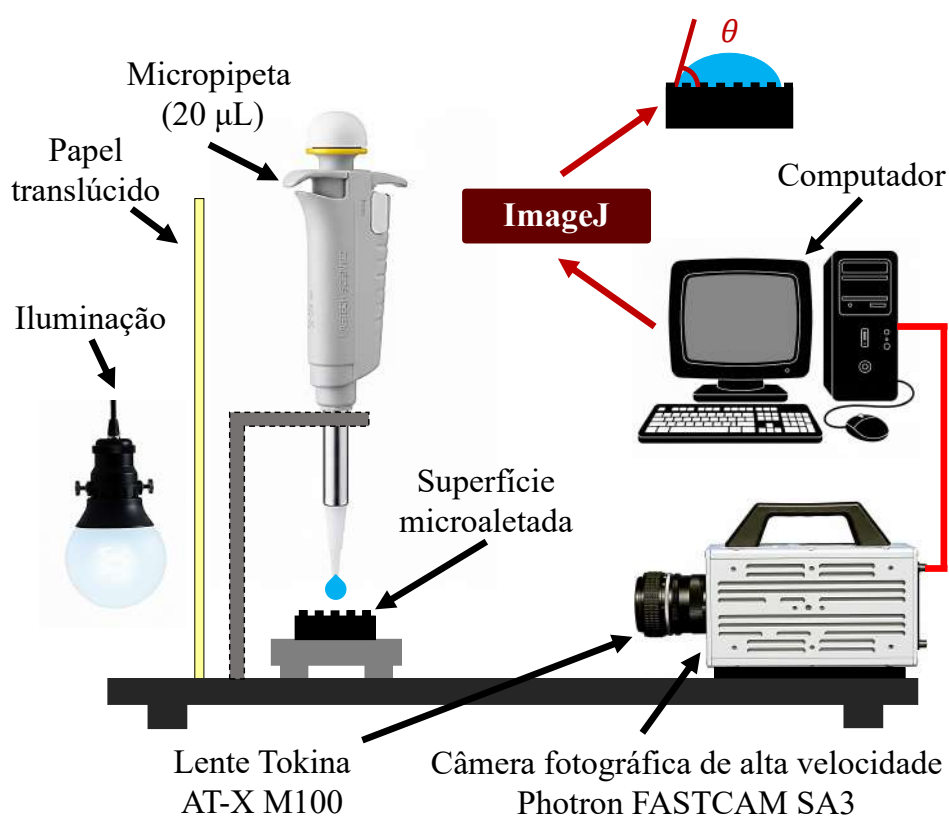
No aparato experimental, esse conjunto foi disposto em frente de um papel translúcido com iluminação posterior, responsável por contrastar a silhueta da gota formada sobre a superfície.

Uma câmera fotográfica digital de alta velocidade do tipo Photron FASTCAM SA3 com resolução de 1024x1024 pixels e taxa de aquisição de 1000 fps, conectada a uma lente Tokina AT-X M100, registrou fotograficamente a interação da gota com a superfície.

Esses dados foram tratados computacionalmente através do *software* ImageJ, responsável por medir o ângulo formado entre a superfície aletada e a tangente à interface da gota (θ), em $^{\circ}$. Esse procedimento é endossado em diversas pesquisas, como a de Nunes (2023).

Uma representação do aparato desenvolvido para essa caracterização é trazida na Figura 87, com destaque para os equipamentos utilizados.

Figura 87 – Representação esquemática do aparato experimental de medição do ângulo de contato das superfícies microaletadas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4.2 Preparação da seção de testes

Para permitir a passagem do escoamento pelo microtrocador de calor, foram realizadas perfurações utilizando um perfurador cirúrgico de 2,5 mm de diâmetro nas regiões dos *plenuns* de entrada e saída. Nessas perfurações, dutos fabricados em polipropileno (PP), com 30 mm de comprimento e diâmetro interno de 2,5 mm, foram posicionados para estabelecer a conexão entre a entrada e a saída do microtrocador de calor e as respectivas mangueiras externas de silicone.

Realizadas essas etapas, na face superior do microtrocador de calor fixou-se uma placa de polimetilmetacrilato (PMMA, conhecido popularmente como acrílico), com 57 mm de comprimento, 27 mm de largura e 3 mm de espessura, de modo a conter o fluido de trabalho na

estrutura do dispositivo térmico e permitir sua condução da região de entrada para a superfície microaletada e, por fim, até a região de saída (Figura 88a). A transparência óptica do acrílico, aliada à boa resistência mecânica e à baixa condutividade térmica, tornou-o ideal para esta aplicação, possibilitando a visualização da dinâmica do escoamento no microtrocador de calor.

Após a cura, uma camada de adesivo acético de alta temperatura da marca Tekbond Saint-Gobain foi aplicada nas laterais do dispositivo térmico (incluindo a interface da fixação) e ao redor dos dutos de entrada e saída do fluido, resultando na versão final de uma das seções de testes vista nas Figuras 88b e 88c. Embora a presente aplicação não tenha contato direto com altas temperaturas, o uso específico desse adesivo acético, que suporta até 316 °C (TEKBOND, 2025), evitou contratempos relacionados à degradação do isolamento por contato inadvertido com o resistor elétrico. Além disso, sua viscosidade, superior à de adesivos comuns, facilitou o manuseio e a aplicação, contribuindo para os resultados satisfatórios obtidos nesse contexto.

Figura 88 – Fixação da placa superior de acrílico



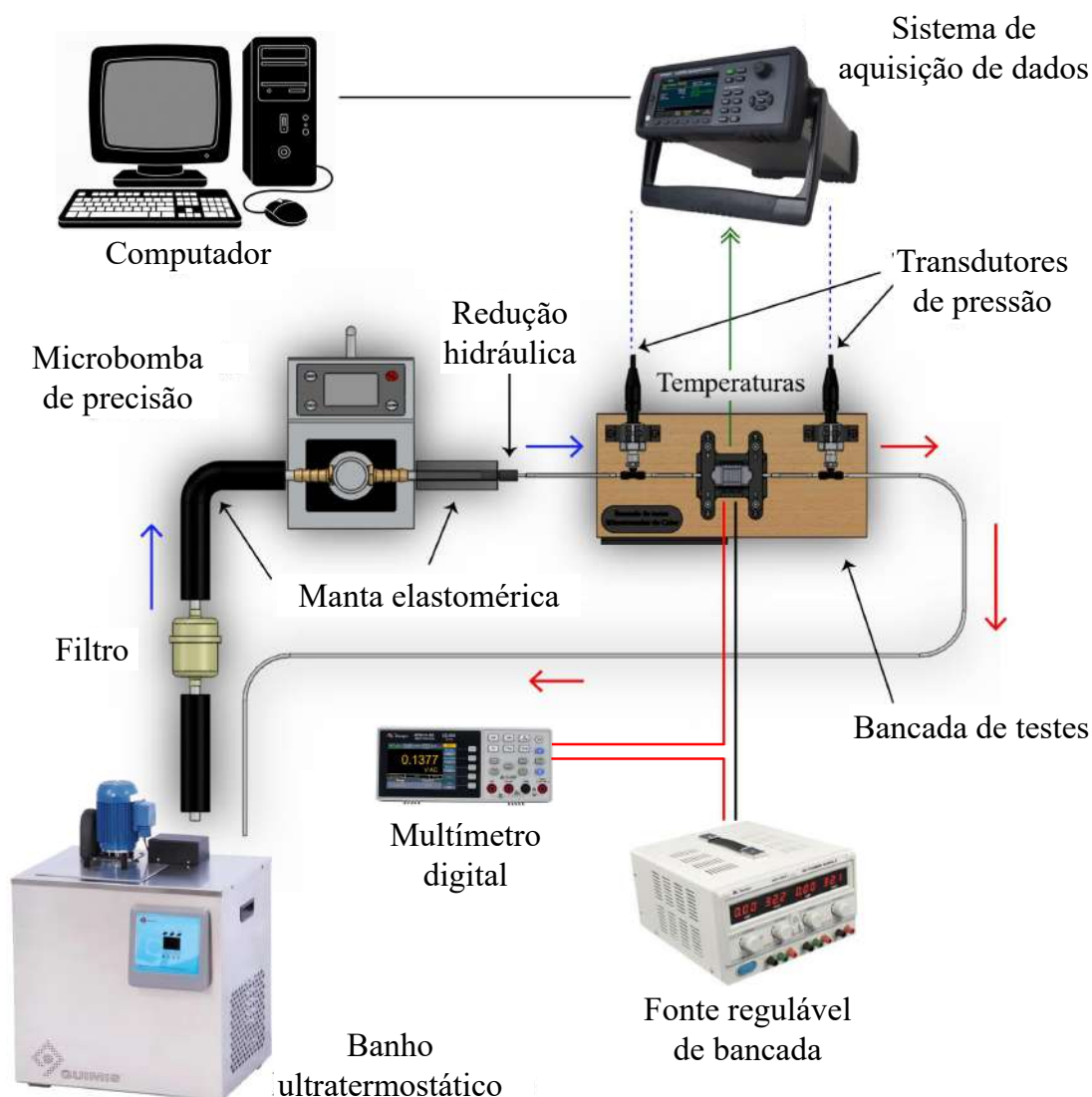
Fonte: Arquivo pessoal (2026).

A seção de testes foi acomodada em um suporte que possui uma cavidade dimensionada para alojar o microtrocador de calor, para posicionar o resistor elétrico de aquecimento e para a instalação dos termopares de leitura térmica. Os detalhes dessa estrutura, bem como dos demais suportes desenvolvidos serão descritos mais à frente.

3.5 BANCADA DE TESTES

Para adiantar os aspectos e as características que serão discutidas sobre o desenvolvimento da bancada de testes, a Figura 89 traz uma representação dos elementos de sua constituição, das linhas de escoamento, e pontos de coletas de dados.

Figura 89 – Representação completa da bancada de testes e seus equipamentos



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.5.1 Aspectos construtivos

A elaboração da bancada de testes envolveu o projeto e desenvolvimento, por meio de técnicas de manufatura aditiva em impressão 3D de filamento PLA (ácido polilático), de um conjunto de suportes e estruturas que garantissem a acomodação dos microtrocares de calor, o posicionamento do sistema de aquecimento e a leitura dos dados térmicos, bem como os suportes para os transdutores de pressão.

O suporte talvez mais importante é o do próprio microtrocador de calor, que possui, além da cavidade para o posicionamento do dispositivo térmico, um nicho inferior destinado à instalação de um resistor elétrico de aquecimento.

Esse dispositivo está apoiado sobre um isolante cerâmico, com o objetivo de não comprometer a integridade estrutural do suporte pelo aquecimento. As características geométricas

do resistor são compatíveis com a região aletada do microtrocador de calor, assegurando o controle da distribuição térmica nessa região, que simula aplicações de gerenciamento térmico em dispositivos eletrônicos, por exemplo (Figura 90a). Sobre o resistor, foi aplicada uma fina camada de filme adesivo de poliamida do tipo Kapton, ilustrada em fotografias posteriores. Essa fita resiste a altas temperaturas e garante um manuseio limpo entre os experimentos, em razão da aplicação interfacial da pasta de alta condutividade térmica.

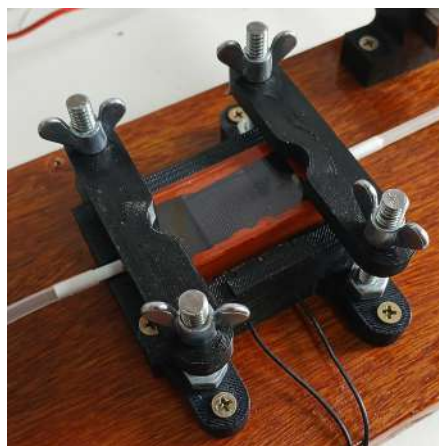
Ainda nesse suporte, a fim de garantir o contato adequado entre o microtrocador de calor e o resistor, foram fabricadas garras que, com o auxílio de parafusos com porcas do tipo borboleta, fixam o conjunto microtrocador-placa de acrílico sem prejudicar a vazão, minimizando deformações na estrutura do microtrocador de calor causadas pela pressão no sistema (Figura 90b).

Figura 90 – Suporte do microtrocador de calor

(a) Alojamento aberto



(b) Alojamento fechado

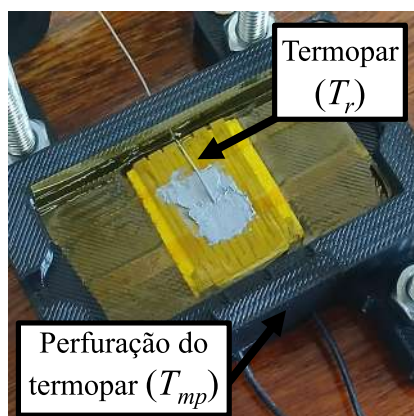


Fonte: Arquivo pessoal (2026).

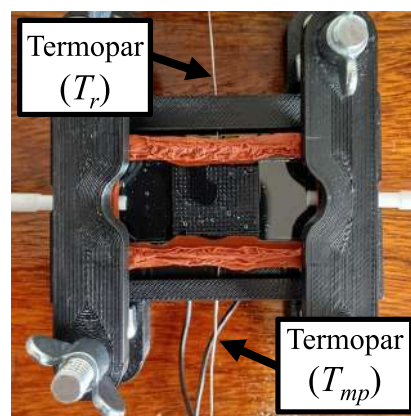
Para a aquisição dos dados de temperatura, na face frontal e posterior do suporte existem perfurações que possibilitam a passagem de termopares, como mostra a Figura 91.

Figura 91 – Posicionamento real dos termopares de monitoramento térmico

(a) Alojamento aberto



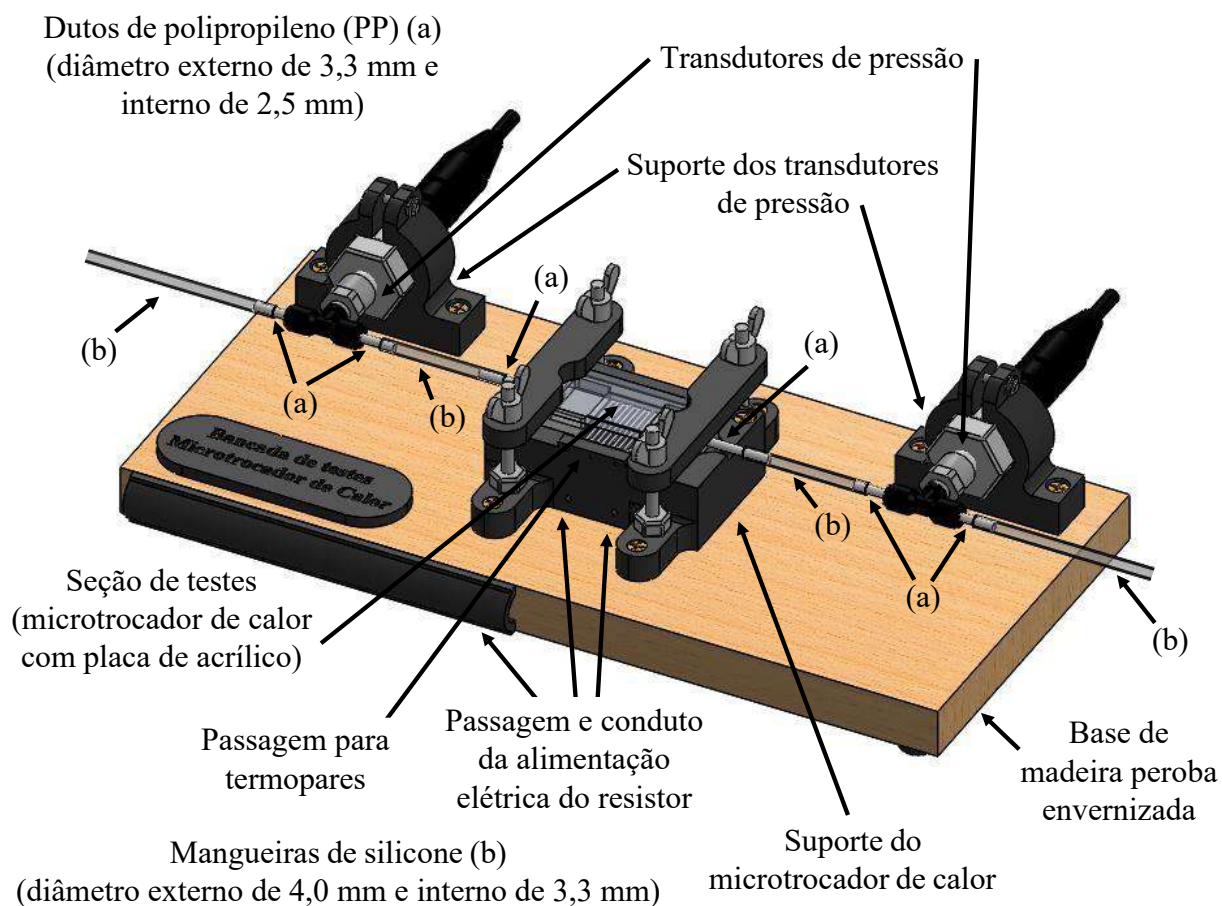
(b) Alojamento fechado



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para a análise da queda de pressão entre as regiões de entrada e saída do microtrocador de calor, foram desenvolvidos suportes destinados ao acondicionamento dos transdutores de pressão. Uma representação dos elementos da bancada é mostrada na Figura 92.

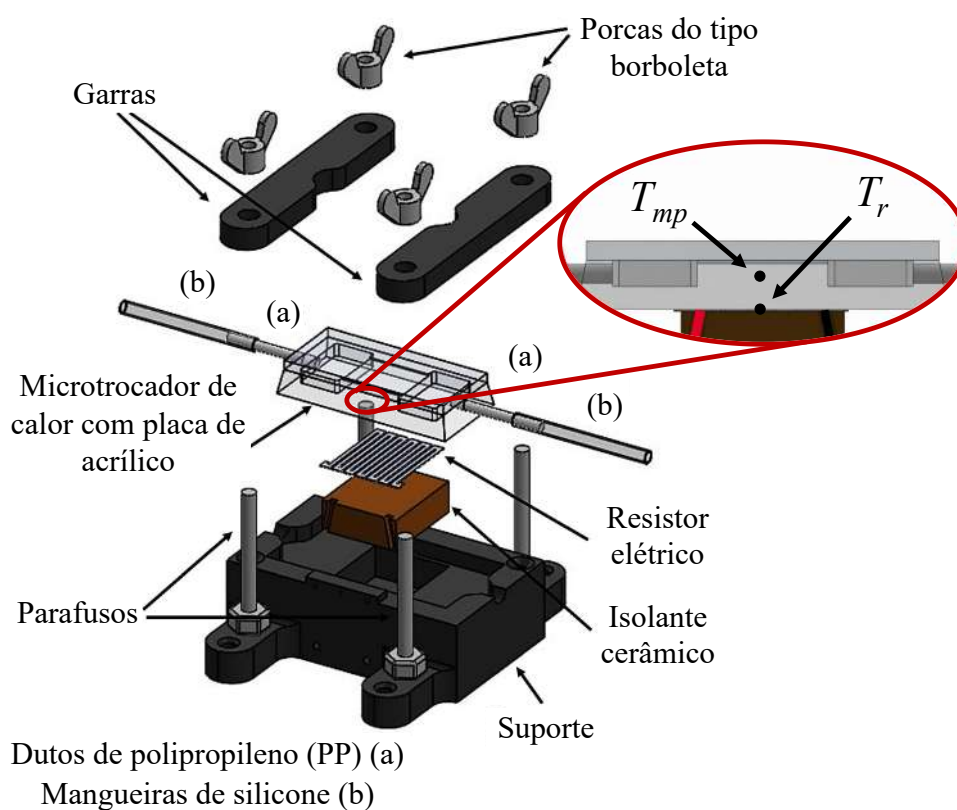
Figura 92 – Representação detalhada dos elementos da bancada de testes



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 93 detalha a configuração do suporte do microtrocador de calor e de seus dispositivos por meio de uma vista explodida.

Figura 93 – Vista explodida detalhada do suporte do microtrocador de calor



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Ademais, a Figura 94 apresenta uma visualização real da bancada de testes desenvolvida.

Figura 94 – Visualização completa da bancada de testes



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

3.5.2 Sistema de aquecimento

O dispositivo responsável por fornecer calor ao microtrocador de calor é uma seção retirada de um resistor termoeletrico comum em chuveiros elétricos residenciais. O resistor, compatível com a cavidade central e o isolante cerâmico, é fabricado em aço, possui resistência elétrica de $1,9 \Omega$ e está mostrado na Figura 95. A configuração sob medida assegura contato direto entre o resistor e o microtrocador de calor. Para maximizar o contato entre eles, aplicou-se uma fina camada de pasta de alta condutividade térmica da marca Arctic, modelo MX-4, que contribui também para intensificar a transferência de calor como um todo por sua capacidade de uniformizar o contato e reduzir a resistência térmica de contato entre as superfícies.

Figura 95 – Resistor elétrico utilizado



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

O aquecimento do resistor elétrico responsável por fornecer calor ao microtrocador térmico foi realizado por uma fonte regulável de bancada da marca Minipa, modelo MPC-30005 (Figura 96a). Para obter a potência fornecida, optou-se por utilizar um multímetro digital de bancada da marca Minipa, modelo MDM-8145B (Figura 96b), conectado em série com o resistor elétrico.

Figura 96 – Equipamentos do sistema de alimentação e controle

(a) Fonte regulável de bancada (b) Multímetro digital de bancada



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

A utilização do multímetro contribuiu para uma aferição mais precisa da corrente elétrica aplicada ao resistor. Vale ressaltar que, para aplicar as diferentes potências no resistor, é

importante monitorar a corrente elétrica do sistema, uma vez que, na ligação em série, a corrente elétrica se mantém constante, pois existe apenas um caminho a ser percorrido pelas cargas elétricas. Aplicando essa metodologia, foi possível avaliar o resistor individualmente, sem considerar as perdas associadas à resistência dos próprios fios conectados a ele. Para definição da potência aplicada – convertida na forma de calor –, foi utilizada a Lei de Joule, já apresentada na Equação 3.5.

3.5.3 Sistema de instrumentação e monitoramento das variáveis operacionais

As variáveis monitoradas nesta pesquisa foram a temperatura e a queda de pressão. Para a obtenção desses dados, utilizou-se o sistema de aquisição de dados da marca Keysight, modelo DAQ970A (Figura 97), interligado a um computador pessoal equipado com o respectivo *software* do sistema.

Antecipando brevemente as discussões que serão apresentadas nas próximas subseções, destaca-se que a conexão dos termopares ao sistema de aquisição ocorreu de forma direta – por meio dos cabos de compensação desses sensores – com os canais de leitura do equipamento, enquanto os transdutores de pressão necessitaram de alimentação elétrica (5 V), que usou a mesma fonte regulável empregada para o sistema de aquecimento, por meio da segunda via de saída elétrica.

Figura 97 – Sistema de aquisição de dados – Keysight – DAQ970A



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

3.5.3.1 Temperaturas: termopares do tipo K

O presente projeto utilizou dois termopares blindados do tipo K, instalados na interface entre o microtrocador de calor e o resistor elétrico (temperatura que, a partir daqui, será denominada T_r), e na proximidade da base dos micropilares da estrutura (T_{mp}) (a cerca de 2 mm de profundidade), ambas em [°C].

Vale ressaltar que a ideia inicial era monitorar as temperaturas nas regiões de *plenuns* de entrada (T_e) e saída (T_s) do microtrocador de calor, pois, por meio desses parâmetros, seria

possível calcular com mais precisão a temperatura média do fluido longe da superfície (T_{∞}) e, por conseguinte, o coeficiente de transferência de calor por convecção (h), como será descrito ainda neste capítulo. Além disso, com essas temperaturas, poderia ser calculada a taxa de transferência de calor do microtrocador para a água deionizada (Q), em [W], tendo em mãos também a vazão mássica ($\dot{m}$), em [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$], e o calor específico (c_p) do fluido, em [$\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], como mostra a Equação 3.21.

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_s - T_e) \quad (3.21)$$

No entanto, devido à fragilidade da estrutura do dispositivo térmico, foram observados diversos vazamentos e a entrada de bolhas de ar no sistema. Uma segunda alternativa, na qual os termopares eram instalados pela placa superior de acrílico, além de demandar mais tempo para ser executada – em razão do tempo de cura do adesivo acético de vedação aplicado –, frequentemente resultava em vazamentos. O adesivo aplicado sobre a placa de acrílico também comprometia a visualização do escoamento, dificultando a identificação de bolhas de ar que poderiam afetar sua dinâmica.

Os termopares blindados, diferentemente dos convencionais, possuem fabricação industrial e são constituídos por dois fios metálicos encapsulados, um ao redor do outro, unidos pela extremidade. Essa construção confere ao sensor um caráter uniforme e um diâmetro externo reduzido, o que favorece, neste caso, sua instalação no microtrocador de calor.

Antes da instalação e operação desses dispositivos, é fundamental garantir que a medição de temperatura seja precisa e confiável. Para isso, os termopares foram previamente submetidos à calibração, procedimento que consiste em avaliar os potenciais elétricos gerados pela junta dos termopares em função das temperaturas em que estão sendo expostos. A partir desses dados, é possível plotar uma curva – no caso, uma reta linear – que representa o comportamento da resposta do sensor.

Esse processo foi realizado em laboratório por meio de um equipamento térmico denominado banho ultratermostático (da marca Quimis, modelo Q214M2), responsável pela elevação e controle da temperatura. Com o banho preenchido por água deionizada, adicionou-se um béquer – também contendo o mesmo líquido – no qual foram imersos os termopares a serem calibrados. A utilização desse recipiente secundário tem como objetivo minimizar a heterogeneidade térmica e reduzir os efeitos adversos da turbulência formada no banho devido à circulação. Junto a eles, foi utilizado um sensor de referência com maior confiabilidade e calibração rastreável, o PT100 da marca Ecil (Cappo XP), responsável por obter a medição precisa da temperatura à qual os termopares estavam expostos. Além disso, um termopar adicional, localizado em um reservatório externo contendo gelo em fusão (aproximadamente $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), foi empregado como temperatura de referência, a qual era constantemente monitorada por um termômetro de mercúrio de precisão.

O procedimento consistiu em realizar incrementos de temperatura no banho térmico e aguardar a estabilização das leituras dos termopares, observada na interface do sistema de

aquisição de dados da marca Keysight e modelo DAQ970A. Os valores médios finais obtidos, corrigidos pela leitura do gelo em fusão, foram então relacionados com a respectiva temperatura correta aferida pelo sensor de referência. No presente caso, foram adotados incrementos de 5 °C na faixa de 25 a 75 °C.

Os resultados obtidos possibilitaram a construção de uma curva que descreve a tensão medida pelo termopar em função da temperatura observada. Para o ajuste dos dados, aplicou-se o Método dos Mínimos Quadrados, que, para este caso, determina os coeficientes da função linear de forma a minimizar a soma dos quadrados dos resíduos entre os valores previstos pelo modelo e os valores experimentais. Para avaliar a qualidade do ajuste e a representatividade do modelo, utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2), em [%], medida estatística que expressa o grau de conformidade entre os dados experimentais e a reta ajustada (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2010).

No cálculo da incerteza de medição dos termopares (s_t) – fundamental para o tratamento dos dados térmicos subsequentes –, empregou-se o desvio-padrão dos resíduos, que quantifica a dispersão média dos pontos experimentais em relação à curva de calibração. Esse parâmetro é obtido pela raiz quadrada da razão entre a soma dos quadrados dos resíduos e o número de pontos experimentais subtraído de dois, considerando-se a perda de dois graus de liberdade decorrente da estimativa do coeficiente angular e do termo de interceptação da regressão linear. Os resultados do coeficiente de determinação (R^2) e da incerteza prevista dos termopares (s_t), em [°C], são trazidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Coeficiente de determinação e incerteza de previsão dos termopares

Termopar	R^2 [%]	s_t [°C]
T_r	99,999	0,106
T_{mp}	99,999	0,117

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Como observado, o valor considerável de R^2 indica que as equações lineares obtidas na calibração descrevem muito bem a distribuição de temperatura registrada pelos termopares, garantindo a confiabilidade das medições térmicas. Da mesma forma, a incerteza prevista nessa leitura (s_t) é suficientemente baixa (uma média de 0,111 °C) para assegurar leituras precisas.

3.5.3.2 Queda de pressão: transdutores

A análise da queda de pressão do fluxo volumétrico entre os transdutores de pressão (Δp), em [kPa], avalia a diferença observada entre o transdutor localizado antes da entrada (p_e) e depois da saída (p_s) do microtrocador de calor, ambas em [kPa], como mostra a Equação 3.22.

$$\Delta p = p_s - p_e \quad (3.22)$$

A abordagem mais adequada para essa análise seria a instalação de transdutores de pressão precisamente em ambas as regiões de *plenum* do dispositivo. Entretanto, a fragilidade das estruturas dos compósitos desenvolvidos, bem como as dimensões reduzidas do microtrocador de calor, impossibilitaram esse tipo de intervenção.

Para contornar essa limitação, optou-se por instalar os equipamentos de leitura externamente à seção de testes, conforme mostrado anteriormente na Figura 92. O sistema de monitoramento de pressão foi composto por dois transdutores da marca WNK e modelo WNK80MA, mostrado na Figura 98, e capazes de realizar leituras na faixa de 0 psi a 50 psi (equivalente a aproximadamente 344,738 kPa). Para garantir a confiabilidade das medições, ambos os transdutores foram previamente recalibrados por uma empresa especializada, localizada na cidade de Campinas (SP).

Figura 98 – Transdutor de pressão – WNK – WNK80MA



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

O processo de calibração consiste em definir uma curva de calibração para a grandeza a ser medida, que, neste caso, relaciona a aplicação de diferentes pressões pré-estabelecidas ao valor de tensão lido pelo equipamento. A análise desses pontos permite estruturar uma representação gráfica em que o eixo das ordenadas indica a pressão no equipamento (p), em [kPa], e o das abscissas, a tensão elétrica correspondente (U), em [V]. Ao final, obtém-se uma equação – de caráter linear – em que p é função de U .

Os dados necessários foram obtidos a partir da ficha de calibração do equipamento, possibilitando que essa equação fosse determinada pelo mesmo método aplicado anteriormente na calibração dos termopares, ou seja, relacionando também o respectivo coeficiente de determinação (R^2), em [%], e a incerteza de previsão dos transdutores de pressão (s_p), em [kPa], conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Coeficiente de determinação e incerteza de previsão dos transdutores de pressão

Transdutor de pressão	R^2 [%]	s_p [kPa]
p_e	99,999	0,971
p_s	99,999	0,564

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A queda de pressão relaciona duas medições independentes, isto é, s_{p_e} e s_{p_s} , as incertezas de cada transdutor; portanto, as incertezas se combinam pela raiz da soma dos quadrados de cada uma delas, resultando na incerteza propagada da queda de pressão ($s_{\Delta p}$), em [kPa], conforme mostrado na Equação 3.23.

$$s_{\Delta p} = \sqrt{s_{p_s}^2 + s_{p_e}^2} \quad (3.23)$$

Esse cálculo resulta no valor apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Incerteza propagada da queda de pressão

Variável	s [kPa]
Δp	1,123

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.5.4 Escoamento hidrodinâmico: fluido de trabalho e conexões hidráulicas

O fluido de trabalho utilizado para o escoamento hidrodinâmico do microtrocador de calor proposto foi a água deionizada de alta pureza, obtida em laboratório na UNESP – FESJ – Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista (SP).

A água deionizada foi produzida por meio do sistema de purificação e deionização Milli-Q®, modelo SQ 240C. Esse sistema, que opera por osmose reversa, é alimentado com água proveniente da concessionária de abastecimento e é responsável por fornecer água ultrapura (Tipo 1), caracterizada por resistividade de 18,2 MΩ·cm e por apresentar baixíssimos níveis de contaminantes, conforme os índices de rejeição iônica ($\geq 96\%$), orgânica ($\geq 99\%$) e de partículas ($\geq 99\%$) (KGAA, 2023). Esses parâmetros tornam a água ideal para aplicações em projetos como o proposto, assegurando a preservação do sistema, a ausência de interferências e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Buscando manter a temperatura de entrada do fluido de trabalho constante foi empregado o banho ultratermostático da marca Quimis, modelo Q214M2 (Figura 99a). Deste banho térmico – previamente limpo e higienizado, e que comporta cerca de 8 litros – parte uma mangueira de silicone com diâmetro interno de 8 mm e externo de 11 mm, direcionada a um filtro para líquidos da marca Mann Filter, modelo WK 48/3.

Uma microbomba de precisão da marca Leadfluid, modelo CT3000F (Figura 99b) – com precisão de 0,5% (LEADFLUID, 2023), realiza a movimentação do fluido de trabalho pelo

sistema, configurável por meio de seu *display*. Toda a tubulação é fixada por abraçadeiras metálicas e isolada termicamente com manta de espuma elastomérica tubular da marca Maxtherm Isolamentos. Fabricada com borracha sintética de alta densidade, essa manta possui baixa condutividade térmica (cerca de $0,029 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) (MAXTHERM, 2025), contribuindo para a redução de perdas térmicas ao longo do sistema.

Figura 99 – Alguns dos equipamentos utilizados no sistema hidrodinâmico

(a) Banho ultratermostático – Quimis



(b) Microbomba – Leadfluid



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

O escoamento no microtrocador de calor foi feito por dutos de polipropileno (PP) com diâmetro interno de 2,5 mm. No entanto, o diâmetro interno do duto da bomba tem 8 mm, razão pela qual foi necessário desenvolver uma adaptação do tipo redutor hidráulico para realizar a interligação com o sistema. O escoamento na saída do microtrocador de calor retorna, via mangueira de silicone, ao reservatório do banho ultratermostático, completando o ciclo do fluido no sistema.

3.6 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA TESTES TERMOHIDRODINÂMICOS NO MICROTROCADOR DE CALOR

Para os testes termohidrodinâmicos, os microtrocadores de calor desenvolvidos – ao todo, oito unidades, confeccionadas em compósitos de polidimetilsiloxano (PDMS) combinados com quatro diferentes percentuais de nanopartículas de caráter metálico obtidas da reciclagem de baterias de íons de lítio (0%, 5%, 10% e 15%), em duas disposições geométricas de micropilares (alinhados e escalonados) – foram submetidos a três diferentes potências elétricas (2,0 W, 2,5 W e 3,0 W), aplicadas por meio de um resistor termoeletrônico que simulava o aquecimento típico de um equipamento eletrônico, e que forneceram fluxos térmicos (q) de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ e $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, respectivamente.

A escolha dessa faixa de potências elétricas aplicadas teve como objetivo, por um lado, garantir medições confiáveis e afastadas das incertezas dos termopares e, por outro, evitar temperaturas extremas que pudessem comprometer a integridade física e estrutural dos dispositivos em contato direto ou indireto com o resistor em aquecimento.

Para avaliar o desempenho térmico desses microtrocares de calor, utilizou-se água deionizada de alta pureza como fluido de trabalho a 20 °C, escoando em regime de convecção forçada sob diferentes vazões volumétricas ($\dot{V}$): 20, 80, 140, 200 e 260 mL·min⁻¹. Paralelamente, também foi conduzida uma análise da queda de pressão, visando observar o comportamento do fluido ao percorrer as estruturas microaletadas do dispositivo, de modo a possibilitar uma avaliação integrada que relacione o ganho térmico à penalidade hidráulica associada. É importante destacar que a temperatura da água na entrada foi mantida constante durante todo o tempo, graças ao banho ultratermostático, que serviu como reservatório de termorregulação. Outro ponto a se destacar é que a grande capacidade volumétrica desse reservatório impossibilitou a interferência da temperatura de saída na temperatura de entrada, em razão da distribuição e agitação formadas dentro do banho.

Cabe salientar que a faixa de vazões escolhida respeita limitações inerentes ao projeto. O limite inferior representa a menor vazão configurável na microbomba de precisão utilizada, enquanto o limite superior corresponde à maior vazão para a qual os resultados ainda podem ser comparados de forma consistente. De maneira simplificada, o aumento da vazão implica maior velocidade do fluido no interior do microtrocar de calor, podendo atingir valores tão elevados que inviabilizem a absorção térmica pelo fluido e, conseqüentemente, a dissipação pela estrutura desenvolvida.

O procedimento experimental iniciou-se com a ativação do sistema térmico e hidrodinâmico, seguida por um curto período de estabilização do fluxo volumétrico, o que garantiu a eliminação de bolhas de ar no sistema e permitiu a verificação de potenciais vazamentos. A partir daí, os resultados obtidos pelos sensores de monitoramento e registrados pelo sistema de aquisição de dados começaram a ser coletados até atingir completamente o regime permanente, condição na qual as variáveis não se alteram mais em função do tempo.

Posteriormente, esses resultados foram tratados por técnicas estatísticas, como a média aritmética ($\bar{x}$, mostrada na Equação 3.24 para uma variável x) e o desvio-padrão amostral – em algumas literaturas referido como desvio quadrático médio – (δ , mostrado na Equação 3.25 para uma variável x), considerando um número significativo de 100 leituras dos pontos finais em regime permanente (n). A análise desses dados possibilitou a construção de representações gráficas, permitindo a comparação entre os diferentes espécimes avaliados.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (3.24)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (3.25)$$

Encerrado cada experimento, o sistema térmico era desativado, possibilitando o resfriamento do conjunto em função do fluxo volumétrico ainda acionado. Após todo o conjunto reduzir sua temperatura ao ponto de repetir as condições iniciais do teste anterior, o aquecimento era novamente acionado e a vazão reajustada para o teste subsequente.

Toda essa metodologia foi empregada para cada fluxo volumétrico, condição de aquecimento e microtrocaador de calor, em triplicata, possibilitando verificar a repetibilidade de cada experimento.

3.7 EQUACIONAMENTO

Os parâmetros e equacionamentos utilizados para a aplicação dos modelos matemáticos de previsão das propriedades e avaliação termohidrodinâmica dos microtrocaadores de calor desenvolvidos são apresentados a seguir. São descritas abordagens gerais sobre o tema, com viés para os casos estudados nessa pesquisa.

3.7.1 Parâmetros da transferência térmica em microtrocaadores de calor

A transferência de calor em dispositivos térmicos do tipo trocadores de calor ocorre por dois mecanismos bem difundidos: a condução e a convecção térmica. A condução térmica predomina na estrutura sólida do dissipador, sendo responsável por conduzir o calor da face de aquecimento até a região aletada. Por outro lado, a convecção auxilia na compreensão de como se dá a transferência de calor dessa região para o fluido em movimento.

O fenômeno da convecção é dimensionado pela Lei do Resfriamento de Newton, apresentada na Equação 3.26, que estabelece uma relação entre a taxa de transferência de calor (Q), em [W]; o coeficiente de transferência de calor por convecção (h), em [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]; a área de troca térmica entre a superfície e o fluido (A_t), em [m^2]; e a diferença de temperatura entre a superfície (T_{sup}) e o fluido que a envolve (T_{∞}), ambas em [$^{\circ}\text{C}$] (NUNES, 2023).

$$Q = h \cdot A_t \cdot (T_{sup} - T_{\infty}) \quad (3.26)$$

Se o aquecimento ocorre por meio de um resistor elétrico, como é o caso de grande parte das pesquisas – e inclusive dessa, e forem desconsideradas as perdas térmicas, normalmente Q está associado à potência elétrica (P) aplicada ao dispositivo termoeletrico.

O cálculo da área de troca térmica (A_t) depende das características geométricas da superfície onde estão assentados os micropilares, bem como das dimensões e da quantidade dessas extensões. A formulação geral desse cálculo é apresentada na Equação 3.27 (NUNES, 2023).

$$A_t = A_{sup} - (t \cdot A_{top}) + (\eta \cdot t \cdot P_{mp} \cdot H_{mp}) \quad (3.27)$$

Essa equação considera a área do substrato onde estão dispostos os micropilares (A_{sup}), a área da seção transversal dos micropilares paralela ao escoamento (A_{top}), ambas em $[m^2]$; a quantidade de micropilares na superfície (t); a eficiência associada à dissipação nos micropilares (η), adimensional; o perímetro (P_{mp}) e a altura (H_{mp}) dos micropilares, ambas em $[m]$ (QU; PFEFFERKORN, 2007).

Para ilustrar a disposição de cada uma dessas geometrias, a Figura 100 esquematiza essas dimensões baseando-se em um dissipador de calor com base retangular, no qual estão assentados micropilares de perfil também retangular. Para esse caso específico, a área superficial do substrato (A_{sup}) é calculada conforme a Equação 3.28 (QU; PFEFFERKORN, 2007).

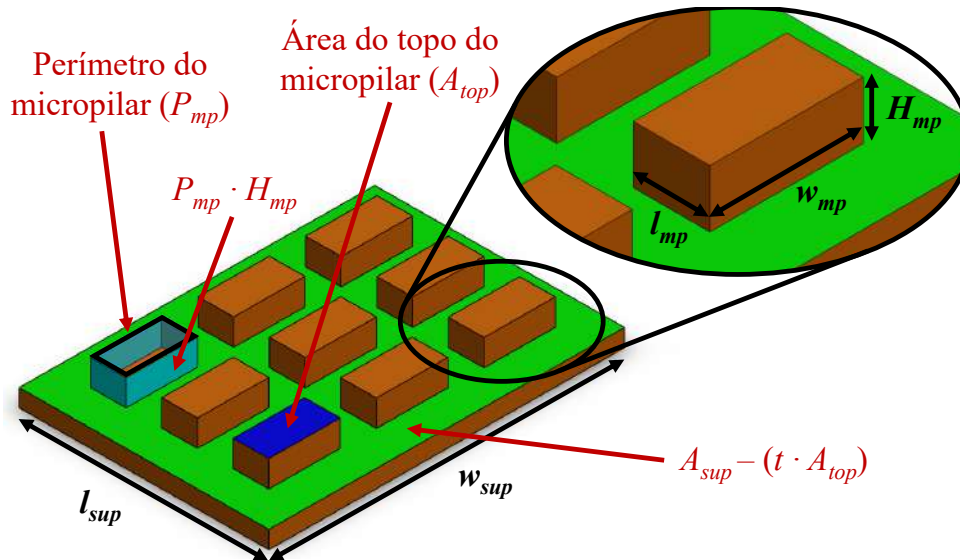
$$A_{sup} = l_{sup} \cdot w_{sup} \quad (3.28)$$

De forma semelhante, a área da seção transversal dos micropilares (A_{top}) é definida pela Equação 3.29 (QU; PFEFFERKORN, 2007).

$$A_{top} = l_{mp} \cdot w_{mp} \quad (3.29)$$

Nessas equações, l e w representam, respectivamente, a largura e o comprimento característicos, ambos em $[m]$, com o índice sup representando o substrato e mp , os micropilares.

Figura 100 – Representação geométrica dos micropilares dispostos em um microtrocador de calor



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Outro parâmetro importante na análise da área de troca térmica é a eficiência do micropilar (η), um adimensional que considera as características do micropilar (H_{mp} , P_{mp} e A_{top}), a própria

convecção (h) e a condutividade térmica do material de fabricação do dispositivo (k), em $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$, conforme mostra a Equação 3.30 (NUNES, 2023).

$$\eta = \frac{\tanh\left(H_{mp} \cdot \sqrt{\frac{h \cdot P_{mp}}{k \cdot A_{top}}}\right)}{H_{mp} \cdot \sqrt{\frac{h \cdot P_{mp}}{k \cdot A_{top}}}} \quad (3.30)$$

Para o caso específico de micropilares de seção transversal retangular, o perímetro (P_{mp}) é definido pela Equação 3.31.

$$P_{mp} = 2 \cdot (l_{mp} + w_{mp}) \quad (3.31)$$

É importante destacar que, nesse caso, a aplicação da Lei do Resfriamento de Newton é uma tarefa iterativa, pois o termo correspondente ao coeficiente de transferência de calor por convecção (h) aparece simultaneamente nessa Lei e na determinação da eficiência do micropilar (QU; PFEFFERKORN, 2007).

Para esta pesquisa, a área de troca térmica (A_t) considera os parâmetros geométricos trazidos na Tabela 9. Esse desenvolvimento também contempla o processo iterativo de definição da eficiência dos micropilares (η), que inclui a condutividade térmica dos diferentes compósitos (k), obtida laboratorialmente.

Tabela 9 – Parâmetros para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção (h)

Parâmetro	Cálculo	Valor
A_{sup}	$0,015 \text{ m} \cdot 0,02 \text{ m}$	$A_{sup} = 0,0003 \text{ m}^2$
t	–	Arranjo: A = 285; e E = 275 micropilares
A_{top}	$0,0005 \text{ m} \cdot 0,0005 \text{ m}$	$A_{top} = 2,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2$
P_{mp}	$2 \cdot (0,0005 \text{ m} + 0,0005 \text{ m})$	$P_{mp} = 0,002 \text{ m}$
H_{mp}	–	$H_{mp} = 0,0005 \text{ m}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No que se refere às temperaturas, é importante definir a temperatura superficial do substrato de assentamento (T_{sup}), uma vez que, na maioria dos casos, as dimensões reduzidas dos micro-trocadores de calor impossibilitam a medição direta dessa grandeza. A alternativa utilizada em grande parte dos estudos e pesquisas nessa área consiste em avaliar a temperatura próxima à base dos micropilares, localizada no corpo do dissipador térmico (T_{mp}), em $[\text{°C}]$, a uma distância H_t dessa superfície, em $[\text{m}]$ (QU; PFEFFERKORN, 2007).

Com essas medidas em mãos, é possível estimar a temperatura superficial (T_{sup}), considerando o fenômeno da condução pela Lei da Condução Térmica de Fourier, conforme apresentado na Equação 3.32 (QU; PFEFFERKORN, 2007).

$$T_{sup} = T_{mp} - \frac{q \cdot H_t}{k} \quad (3.32)$$

Nessa equação, q representa o fluxo térmico aplicado, isto é, $q = Q/A_{sup}$, em $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$, enquanto k corresponde à condutividade térmica do material do dissipador, em $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$.

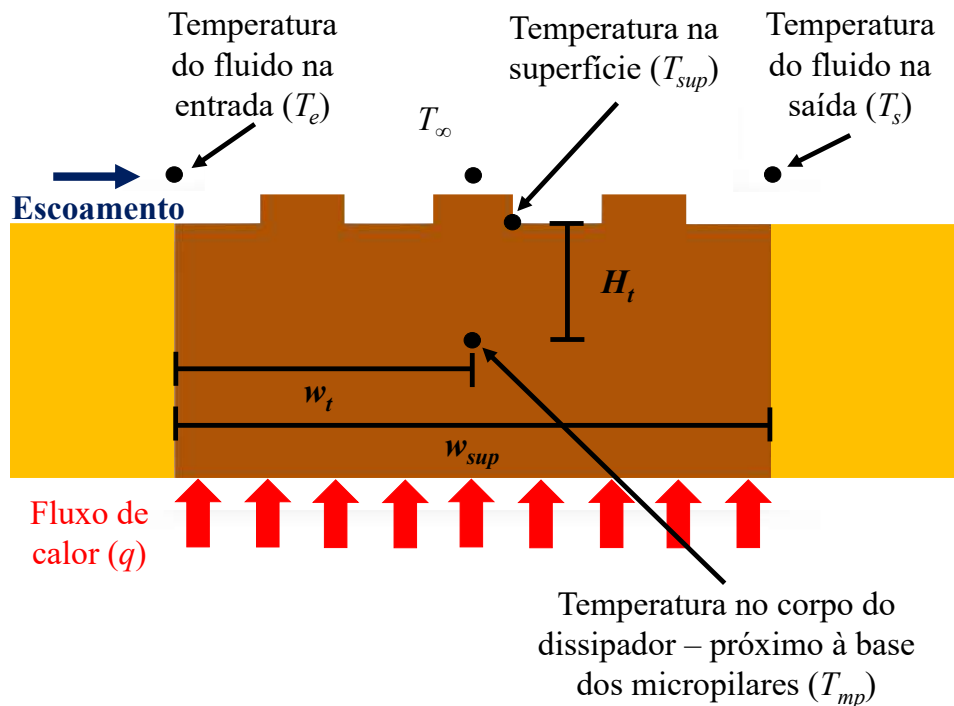
Para o caso da temperatura superficial no substrato (T_{sup}), decidiu-se considerá-la equivalente à temperatura na proximidade da base dos micropilares (T_{mp}), isto é, $T_{sup} = T_{mp}$, pois, devido à pequena distância de análise (H_t), esses valores se apresentaram muito próximos entre si em análises preliminares.

Outra temperatura analisada corresponde à temperatura média do fluido (T_∞). Essa temperatura pode ser estimada considerando os parâmetros dimensionais do ponto de medição de T_{mp} , descrito anteriormente, como a distância axial desse monitoramento (w_t) em relação ao comprimento total de dissipação (w_{sup}), ambas em [m]. Essa estimativa também inclui a medição das temperaturas de entrada (T_e) e de saída (T_s) do fluido, ambas em $[\text{°C}]$, respectivamente antes e depois de este atravessar a região de troca térmica. Todo esse equacionamento é apresentado na Equação 3.33 (QU; PFEFFERKORN, 2007).

$$T_\infty = T_e + \left[(T_s - T_e) \cdot \frac{w_t}{w_{sup}} \right] \quad (3.33)$$

Uma representação esquemática da obtenção dessas temperaturas é apresentada na Figura 101.

Figura 101 – Representação geométrica da medição das temperaturas nos micropilares



De forma semelhante, a temperatura média do fluido (T_{∞}) foi estimada a partir da temperatura de entrada da água deionizada no sistema (T_e), que foi de 20 °C, em razão da ausência de monitoramento térmico na saída do microtrocador de calor. Essa simplificação assume que não existe variação de temperatura do fluido entre a entrada e a saída, o que não corresponde à realidade, devido à transferência de calor.

Analisando os efeitos dessas considerações sobre o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção (h), é possível observar que, por meio das Equações 3.32 e 3.33, os valores de T_{mp} e T_e podem ser representados, respectivamente, como $T_{mp} = T_{sup} + T_k$ e $T_e = T_{\infty} - T_w$, em que T_k representa a parcela da condução térmica entre o ponto de análise e a superfície, e T_w representa o acréscimo de temperatura entre a entrada e a saída na posição de leitura, ambos em [°C]. A partir disso, é possível comparar a variação de temperatura proposta no denominador da Equação 3.26 – isto é, $(T_{sup} - T_{\infty})$ – com aquela adotada nas considerações desta pesquisa ($T_{mp} - T_e$), conforme mostrado na Equação 3.34.

$$T_{mp} - T_e = T_{sup} + T_k - (T_{\infty} - T_w) = T_{sup} - T_{\infty} + T_k + T_w \quad (3.34)$$

Assim, sabendo que T_k e T_w não assumem valores negativos, observa-se que $T_{mp} - T_e > T_{sup} - T_{\infty}$. Portanto, a variação de temperatura calculada aumenta o valor do denominador da Lei do Resfriamento de Newton, tendendo a subestimar os valores do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) em comparação com os valores reais.

3.7.2 Queda de pressão

3.7.2.1 Validação da medição de queda de pressão (Δp_{mt})

O sistema responsável pela medição da queda de pressão do escoamento após sua passagem pela região microaletada já foi descrito anteriormente, e a sua validação na bancada de testes possui caráter experimental e respaldo científico. A localização dos transdutores de pressão utilizados neste projeto é externa à estrutura do microtrocador de calor, o que, à primeira vista, pode causar estranhamento, uma vez que, idealmente, deveriam estar posicionados nas regiões de distribuição do escoamento, isto é, nos *plenuns*. Esse tipo de configuração também é encontrado em outros estudos, como o de Correa *et al.* (2025), que considera a queda de pressão associada aos dutos de distribuição e coleta desprezíveis.

Para analisar isso, a Equação de Darcy-Weisbach, mostrada na Equação 3.35, determina a perda de pressão de um fluido ao longo de um trecho de tubulação, sendo essencial para o dimensionamento de sistemas fluídicos, bem como para a avaliação da eficiência do escoamento em sistemas hidráulicos (WHITE, 2011).

$$\Delta p' = f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot \frac{1}{1000} \quad (3.35)$$

Nessa equação, a queda de pressão ($\Delta p'$), em [kPa], é calculada em função de parâmetros

adimensionais, como o fator de atrito (f); de características geométricas da tubulação, como o comprimento (L), em [m], e o diâmetro interno (d), em [m]; de propriedades físicas do fluido, como a densidade (ρ), em [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]; e de propriedades do escoamento, como a velocidade média (v), em [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

A velocidade média do fluido é estabelecida pela razão entre a vazão mássica ($\dot{m}$), em [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$], e o produto da densidade do fluido (ρ), em [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] pela área da seção transversal interna da tubulação (A), em [m^2]. Para dutos cuja seção transversal é circular, essa velocidade pode ser obtida por meio da Equação 3.36.

$$v = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\rho \cdot \pi \cdot d^2} \quad (3.36)$$

Para a determinação do fator de atrito da Equação de Darcy-Weisbach, é fundamental reintroduzir o conceito de uma das grandezas adimensionais mais importantes da mecânica dos fluidos: o número de Reynolds (Re). Esse parâmetro, calculado pela Equação 3.37, permite caracterizar o regime de escoamento como laminar ($Re < 2300$), transitório ($2300 < Re < 4200$) ou turbulento ($Re > 4200$), sendo essencial para o dimensionamento de sistemas fluídicos (WHITE, 2011).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (3.37)$$

Na equação acima, o número de Reynolds (Re) é calculado em função de propriedades físicas do fluido, como a densidade (ρ), em [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], e a viscosidade dinâmica (μ), em [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]; de características geométricas da tubulação, como o diâmetro interno (d), em [m]; e de propriedades do escoamento, como a velocidade média (v), em [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Para esses cálculos, considerou-se a densidade da água pura a 20 °C (ρ) como 998,21 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, e a viscosidade dinâmica (μ), como $1,002 \times 10^{-3}$ Pa.s. Para regimes laminares, o fator de atrito é definido por uma equação simplificada, apresentada na Equação 3.38 (WHITE, 2011).

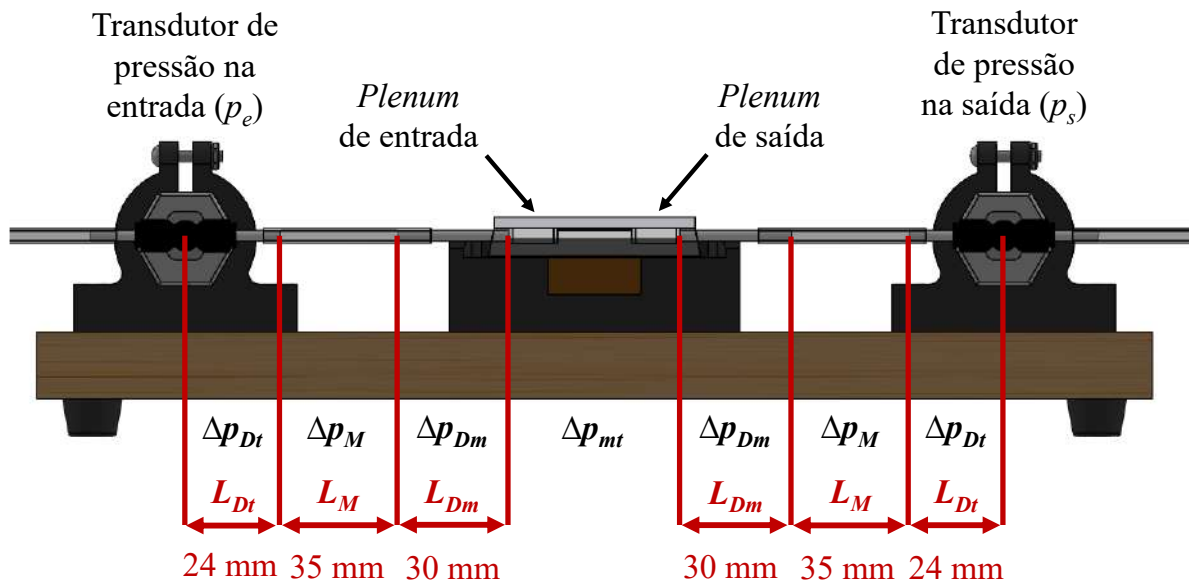
$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.38)$$

No regime laminar, o escoamento é dominado pelas forças viscosas e não pela interação do fluido com as irregularidades da parede do duto, o que implicaria considerar um valor de rugosidade equivalente da parede (ϵ), em [m], em cálculos com o Diagrama de Moody (WHITE, 2011) ou pela Equação de Colesbrook-White. Para o presente caso, todas as vazões volumétricas forneceram valores do número de Reynolds correspondentes à região laminar.

A conexão hidráulica com os transdutores de pressão da bancada de testes requer o uso de dois tipos de dutos e tubulações. A partir de ambos os transdutores, utilizam-se dutos de polipropileno (PP) com diâmetro interno (d_D) de 2,5 mm, os quais se conectam às respectivas mangueiras de silicone, que possuem diâmetro interno (d_M) de 3,3 mm. A partir dessas mangueiras, realiza-se a conexão com os microtrocares de calor por meio dos mesmos dutos de polipropileno

mencionados. Essa configuração é apresentada na Figura 102 e resulta no desdobramento da Equação de Darcy-Weisbach em sete seções, conforme mostrado na Equação 3.39, podendo ser simplificada conforme apresentado na Equação 3.40, em que $\Delta p'$ equivale a Δp , a queda de pressão medida entre os transdutores, salvas as conversões de unidades. Nessa expressão, Δp_{Dt} representa a queda de pressão no duto de polipropileno conectado diretamente ao transdutor de pressão; Δp_M corresponde à queda de pressão na mangueira de silicone; Δp_{Dm} refere-se à perda no duto conectado diretamente ao microtrocador de calor; e, por fim, Δp_{mt} representa a queda de pressão ocasionada exclusivamente pelo microtrocador de calor, todas em [kPa].

Figura 102 – Esquema da instrumentação para medição da queda de pressão



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

$$\Delta p = \Delta p_{Dt} + \Delta p_M + \Delta p_{Dm} + \Delta p_{mt} + \Delta p_{Dm} + \Delta p_M + \Delta p_{Dt} \quad (3.39)$$

$$\Delta p = 2(\Delta p_{Dt} + \Delta p_M + \Delta p_{Dm}) + \Delta p_{mt} \quad (3.40)$$

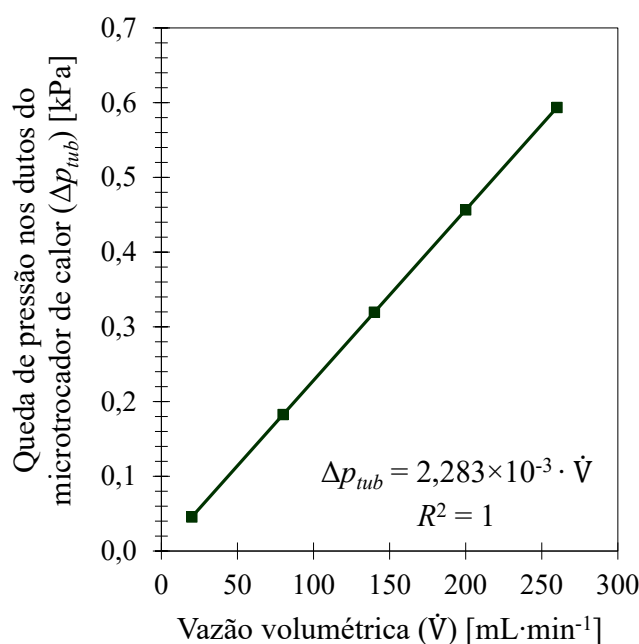
Adicionando a formulação proposta pela Equação de Darcy-Weisbach aos termos, é possível obter a Equação 3.41, que pode ser simplificada e rearranjada na Equação 3.42. Vale ressaltar que f_D , d_D e v_D são iguais entre ambos os dutos de polipropileno, embora seus comprimentos sejam diferentes. Os índices D e M representam, respectivamente, as variáveis correspondentes ao duto e à mangueira.

$$1000 \cdot \Delta p = 2 \left(f_D \frac{L_{Dt}}{d_D} \frac{\rho v_D^2}{2} + f_M \frac{L_M}{d_M} \frac{\rho v_M^2}{2} + f_D \frac{L_{Dm}}{d_D} \frac{\rho v_D^2}{2} \right) + \Delta p_{mt} \quad (3.41)$$

$$1000 \cdot (\Delta p - \Delta p_{mt}) = f_D \frac{\rho v_D^2}{d_D} (L_{Dt} + L_{Dm}) + f_M \frac{L_M \rho v_M^2}{d_M} \quad (3.42)$$

A partir daqui, $\Delta p - \Delta p_{mt}$ será denominado apenas como Δp_{tub} , todas em [kPa], e representa somente a parcela correspondente à queda de pressão provocada pelos dutos e tubulações, a qual se deseja demonstrar a significância em comparação com Δp . A Figura 103 ilustra o comportamento da queda de pressão Δp_{tub} em função da vazão volumétrica.

Figura 103 – Representação da queda de pressão relativa à tubulação em função da vazão volumétrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

É possível observar que, diferentemente de alguns estudos – como o proposto por Correa *et al.* (2025) –, a queda de pressão associada aos dutos e tubulações deve ser levada em consideração. Isso ocorre em razão da aplicação de vazões superiores às utilizadas nesse estudo, o que induz um aumento proporcional da queda de pressão.

Observa-se, ainda, um comportamento linear desse parâmetro, o que se deve ao regime de escoamento, embora a Equação de Darcy-Weisbach apresente caráter potencial. Esse efeito decorre do fator de atrito (f), que, no regime laminar, depende do número de Reynolds ($f = 64/Re$). Como consequência, obtém-se, como mostra a Equação 3.43 – Equação de Hagen-Poiseuille –, uma relação na qual a queda de pressão é proporcional à velocidade média v e, consequentemente, à vazão volumétrica, isto é, $\Delta p' \propto \dot{V}$.

$$\Delta p' = \left(\frac{64 \cdot \mu}{\rho \cdot v \cdot d} \right) \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \frac{32 \cdot \mu \cdot L}{d^2} \cdot v \quad (3.43)$$

Os resultados apresentados para a queda de pressão nos microtrocadores de calor (Δp_{mt}) foram calculados conforme a Equação 3.44, que considera os valores obtidos pelos transdutores de pressão (Δp) e a queda relacionada aos dutos e tubulações Δp_{tub} .

$$\Delta p_{mt} = \Delta p - \Delta p_{tub} \quad (3.44)$$

3.8 CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES MICROALETADAS POR TÉCNICAS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Após finalizados os experimentos termohidrodinâmicos, as superfícies aletadas dos microtrocadores de calor desenvolvidos foram preparadas para a caracterização superficial. A análise utilizada nessa caracterização foi realizada nas instalações do Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano), constituinte do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), na cidade de Campinas (SP).

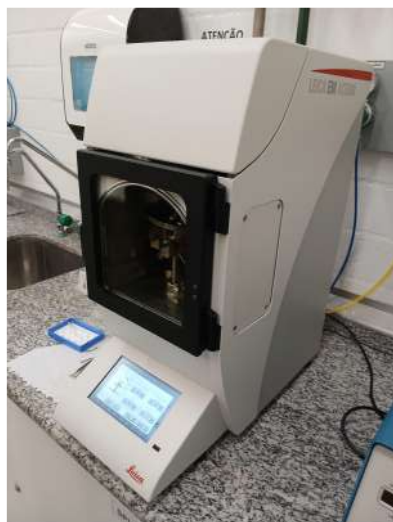
Utilizando técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), optou-se por explorar a qualidade superficial e geométrica das regiões aletadas e de seus micropilares por meio de dois detectores do equipamento: o ETD e o vCD. De maneira simplificada, o ETD (sigla em inglês para *Everhart-Thornley Detector*, que pode ser traduzida como Detector de Elétrons Secundários) é bastante útil para mostrar a topologia e a rugosidade de superfícies, o que ocorre pela captação dos elétrons secundários por elas emitidos. Por outro lado, o vCD (sigla em inglês que remete a *Backscattered Electron Detector*, que pode ser traduzida como Detector de Elétrons Retroespalhados) funciona com a captura de elétrons retroespalhados para destacar o contraste de composição química na amostra, exibindo elementos mais leves atômicamente com cores mais escuras.

Para dar seguimento, uma seção foi retirada de cada superfície microaletada, com dimensões superficiais de cerca de 5 mm (em largura e comprimento) e 2 mm de altura. Cada seção foi, posteriormente, higienizada com álcool isopropílico para remoção de gorduras e/ou qualquer impureza da região. Esse processo foi sucedido pelo uso de ar comprimido para secagem das seções.

Para introduzir as amostras no equipamento de microscopia, foi necessário fixá-las a suportes metálicos denominados *stubs*. Essa fixação ocorreu utilizando uma fita de carbono condutiva, que possuía adesivo em ambas as faces. Posteriormente a essa etapa, em um equipamento específico – mostrado na Figura 104a (marca Leica, linha ACE), foi realizado o recobrimento metálico das superfícies com uma liga metálica de ouro-paládio, a uma espessura de 5 nm. Finalizado esse processo de metalização, foi aplicada uma fina trilha de tinta condutiva de prata (PELCO®, marca Ted Pella, número 16062) que conectava a superfície recém-metalizada ao *stub*. Todo esse procedimento é essencial para formar caminhos para a dissipação dos elétrons e evitar o acúmulo destes na superfície, o que poderia comprometer a qualidade das imagens a serem obtidas. Assim, as amostras foram posicionadas em um suporte devidamente identificado (Figura 104b) e levadas ao interior do aparelho de microscopia – Figura 104c (FEI Inspect F50), onde foram expostas a vácuo, com pressão inferior a 3×10^{-2} Pa.

Figura 104 – Preparo e inserção das amostras no equipamento de microscopia eletrônica

(a) Recobrimento metálico



(b) *Stubs* no suporte do MEV



(c) Introdução – MEV



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Esse procedimento é necessário para que pudessem ser obtidas imagens das superfícies aletadas em diferentes graus de ampliação para as duas técnicas empregadas, destacando, além da qualidade da superfície de assentamento dos micropilares, a morfologia destes, que impacta diretamente a análise termohidrodinâmica.

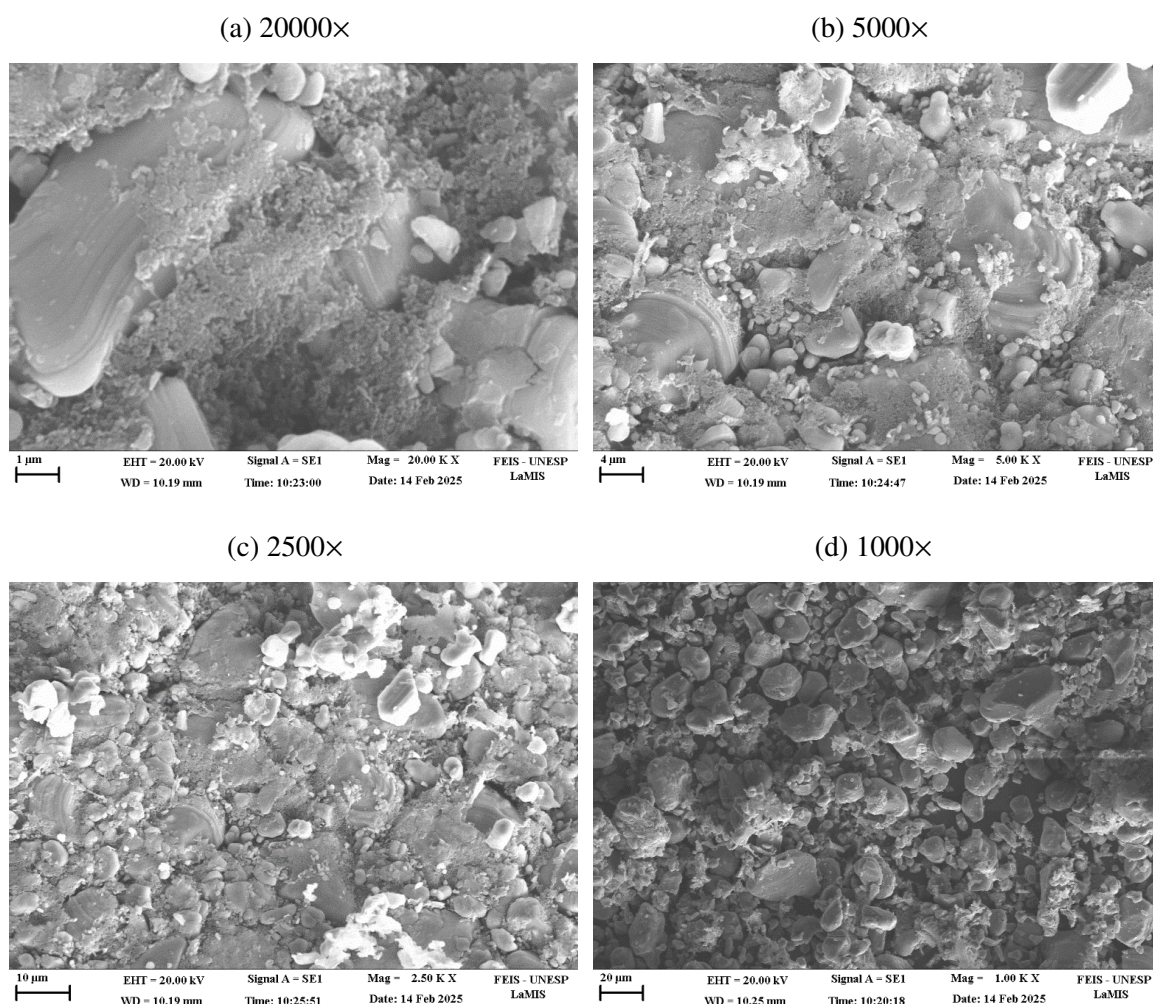
4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos, sendo primeiramente mostrados os referentes à caracterização e, posteriormente, os de desempenho termohidrodinâmico dos microtrocares de calor.

4.1 ANÁLISE MICROSCÓPICA DAS PARTÍCULAS OBTIDAS – MEV

Inicialmente, as partículas obtidas do resíduo de baterias de íons de lítio foram submetidas à análises com microscópio eletrônico de varredura (MEV). As imagens obtidas dessa caracterização são apresentadas na Figura 105, que destaca as diferentes ampliações empregadas.

Figura 105 – Micrografia obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das partículas



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Essa caracterização permitiu observar que as partículas obtidas formam um conjunto marcado por regiões com particulados maiores, estruturalmente lisos, em escala micrométrica e formato alongado. Essas estruturas são recobertas por particulados mais finos e irregularmente

distribuídos. Esses materiais, em específico, formam um conjunto mais poroso e desagregado, além de possuírem escala submicrométrica, ou até, nanométrica. Ademais, essas características ajudam a formar um cenário heterogêneo do material em relação ao tamanho.

De modo geral, é possível sugerir que os métodos de desenvolvimento e fabricação do material de preenchimento empregado nessa pesquisa resultaram em um sistema com distribuição dispersa de partículas, não sendo eficaz na produção de nanopartículas exclusivamente.

A composição química das partículas também foi estudada por técnicas de Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X (EDS), como mostra a Tabela 10, que destaca a presença de elementos como o carbono (C), o alumínio (Al) e o cobalto (Co), diretamente relacionados à composição das baterias de íons de lítio. A ausência do lítio, especificamente, será tratada posteriormente.

Tabela 10 – Composição química das partículas obtidas

Elemento químico	Percentual em massa [%]
Carbono (C)	28,17
Oxigênio (O)	37,30
Alumínio (Al)	0,79
Cobalto (Co)	33,39
Bário (Ba)	0,35

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

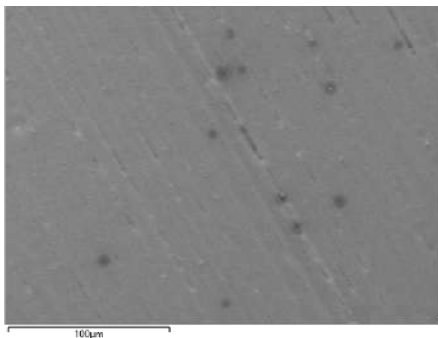
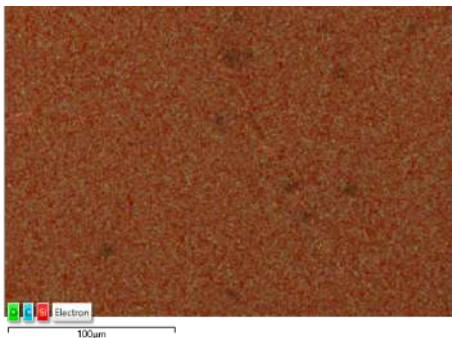
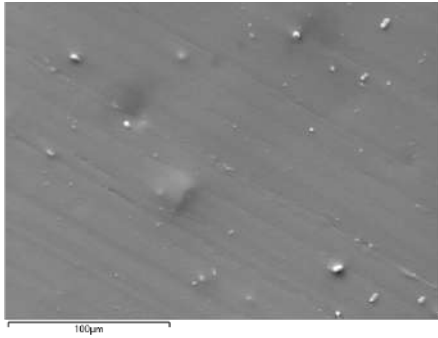
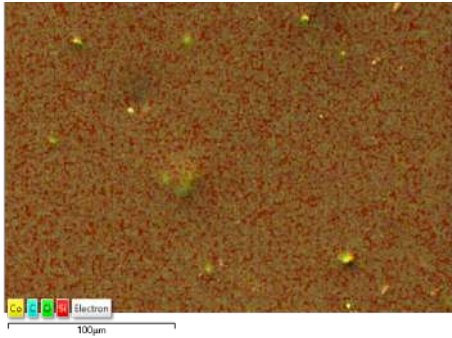
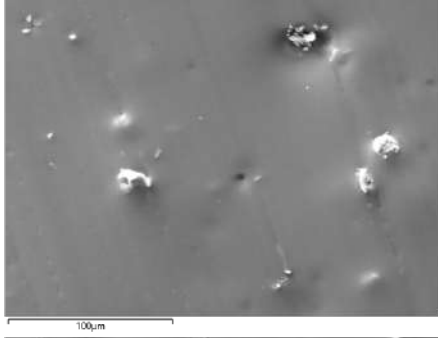
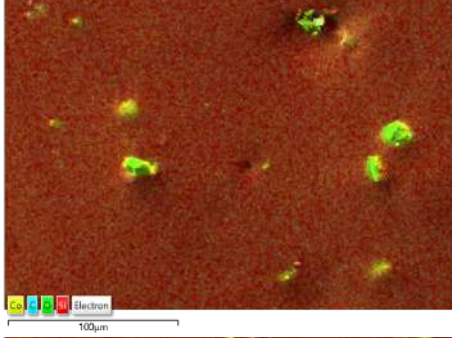
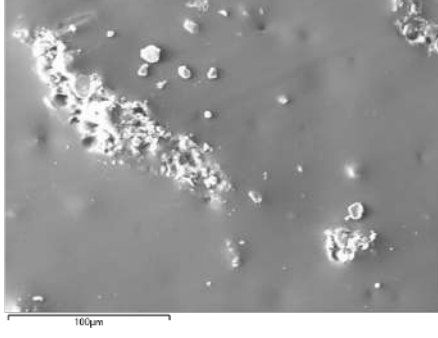
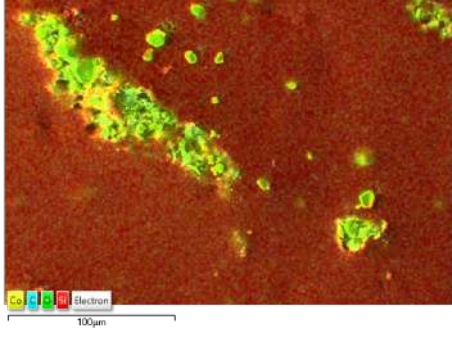
Como parte da caracterização das propriedades físicas das nanopartículas obtidas a partir da reciclagem hidrometalúrgica de baterias de íons de lítio em final de vida útil, a densidade foi medida por técnicas experimentais, conforme descrito no capítulo de Metodologia.

O resultado final obtido indica que a densidade das nanopartículas (ρ_p) é de $2,098 \pm 0,00089 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. O valor apresentado corresponde à média, enquanto a incerteza está associada ao desvio-padrão amostral do conjunto de medições.

4.2 ANÁLISE MICROSCÓPICA E ESPECTROSCÓPICA DOS COMPÓSITOS DESENVOLVIDOS – MEV E EDS

De forma semelhante, os compósitos desenvolvidos nessa pesquisa foram submetidos às técnicas de microscopia e espectroscopia, cujos resultados são apresentados na Tabela 11, que destaca as imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e por Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X (EDS).

Tabela 11 – Resultados da caracterização por técnicas de microscopia e espectroscopia

Amostra	MEV	EDS
PDMS – 0		
PDMS – 5		
PDMS – 10		
PDMS – 15		

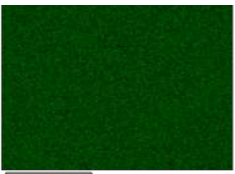
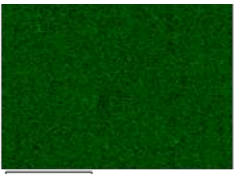
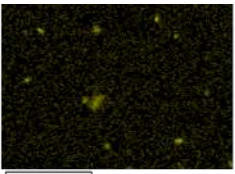
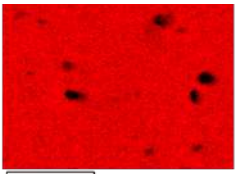
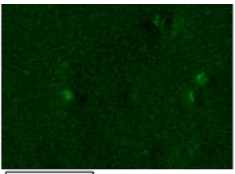
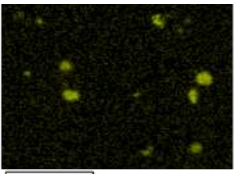
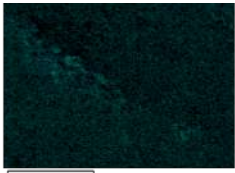
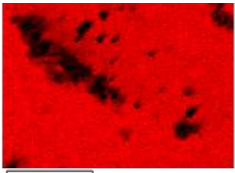
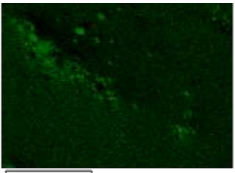
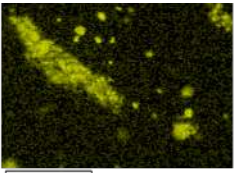
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com a análise microscópica é possível observar que, embora o polímero puro – representado pela amostra PDMS – 0 – não possua material de preenchimento, são encontrados particulados sólidos na matriz. Essas pequenas frações podem corresponder a impurezas do próprio elastômero e/ou resquícios do pré-polímero que não reagiram, conforme já apontado por Morbioli, Speller & Stockton (2020).

Para facilitar a observação dos elementos químicos detectados pela análise espectroscópica

dos compósitos, a Tabela 12 traz os resultados individuais destes, codificados da seguinte forma: carbono (C), mostrado em azul claro; silício (Si), em vermelho; oxigênio (O), em verde – ambos característicos da matriz polimérica do PDMS; e cobalto (Co), em amarelo, correspondente às partículas do resíduo das baterias de íons de lítio.

Tabela 12 – Resultados individuais de composição química – EDS

Amostra	Carbono (C)	Silício (Si)	Oxigênio (O)	Cobalto (Co)
PDMS – 0				—
PDMS – 5				
PDMS – 10				
PDMS – 15				

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

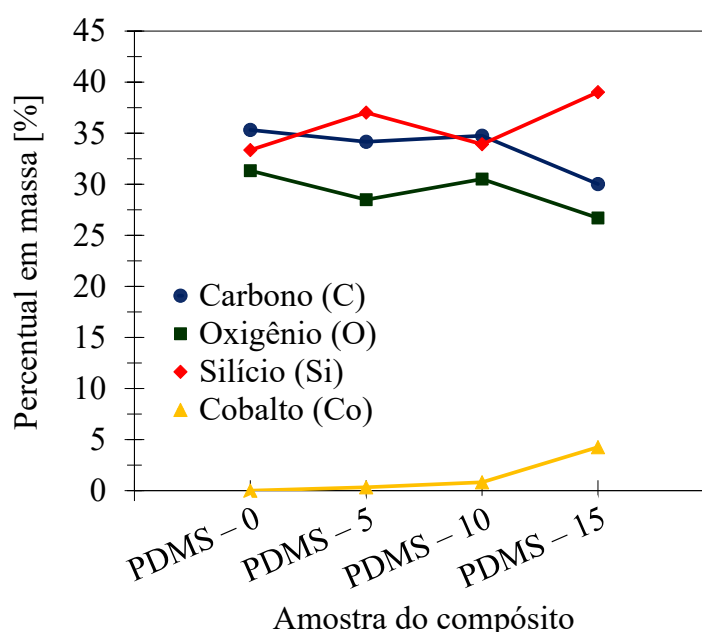
De antemão, observa-se a ausência de alguns elementos observados na caracterização das nanopartículas, como o bário (Ba) e o alumínio (Al). Não coincidentemente, ambos os elementos apareceram nesta análise inicial com os menores percentuais, o que, aliado aos problemas relacionados à homogeneização – a seguir descritos – dificultou a presença e a detecção desses na amostra levada para caracterização. Outra hipótese levantada diz respeito à reatividade desses elementos com os constituintes da matriz polimérica, como o oxigênio, que favorece a formação de óxidos.

A comparação entre as diferentes amostras, considerando as concentrações de nanopartículas analisadas, revela um aumento no sinal associado ao elemento químico cobalto (Co), mostrado em amarelo. Esse comportamento confirma a presença metálica nos compósitos de PDMS desenvolvidos, destacando seu potencial para aplicações que requerem maior condutividade térmica, como trocadores de calor.

O percentual em massa dos elementos químicos encontrados nos compósitos é ilustrado na Figura 106. Nessa representação, é possível observar que o carbono, o oxigênio e o silício se

apresentam dentro de uma faixa comum entre os compósitos, sendo que, para o PDMS – 15, existe uma visível redução do percentual do carbono e oxigênio, compensada pela presença do cobalto, mais evidente. Especificamente sobre o cobalto, esse elemento, que não está presente na amostra de PDMS puro, sofre um sutil crescimento entre os compósitos PDMS – 5 e PDMS – 10, passando de 0,33% para 0,82%. Na amostra de PDMS – 15, esse teor aumenta abruptamente, alcançando 4,26%, possivelmente devido à formação de agregações das partículas, fenômeno discutido em seção posterior.

Figura 106 – Percentual em massa dos elementos químicos encontrados nos compósitos



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

É notável que o elemento químico lítio (Li), derivado de baterias de íon-lítio – por meio do óxido de lítio-cobalto, não está presente na análise espectroscópica. As limitações físicas dos equipamentos de laboratório, especificamente em relação à energia de emissão e detecção de Raios X, dificultam a identificação de elementos mais leves, como o lítio, cujos fótons característicos têm energia inferior ao limite mínimo de detecção da maioria dos equipamentos.

Além disso, as imagens obtidas mostram que a amostra contendo 15% de nanopartículas (PDMS – 15) se aproxima de uma condição preocupante, visto que a formação de aglomerados é visível. Nesse contexto, para definir uma condição ideal para a incorporação de nanopartículas, é necessário considerar que a aglomeração desse nanomaterial de reforço, dependendo de sua concentração, pode comprometer sua distribuição adequada e homogênea dentro da matriz polimérica, bem como afetar sua integridade estrutural – potencialmente levando à formação de porosidades, rachaduras e microfissuras internas.

As aglomerações são resultado de uma distribuição e dispersão não homogênea das nanopartículas na matriz polimérica, o que, por sua vez, contribui para a formação de áreas com maior concentração em detrimento de outras. Essa dispersão comprometida afeta a uniformidade

estrutural do compósito, influenciando sua rigidez, reduzindo suas propriedades mecânicas e dificultando a formação de uma malha termicamente condutora – o que diminui a eficiência da transferência de calor e, consequentemente, as propriedades térmicas esperadas.

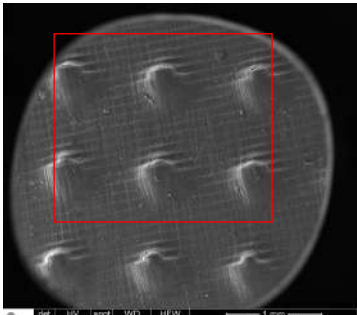
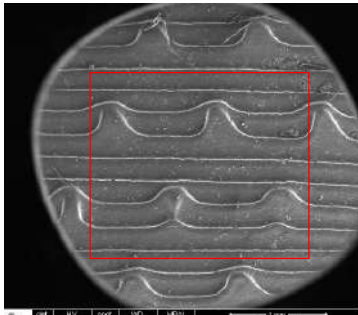
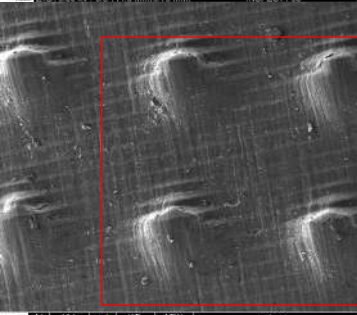
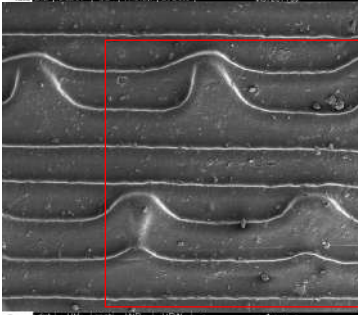
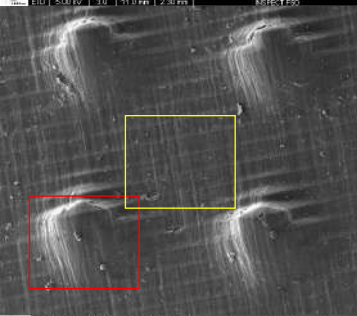
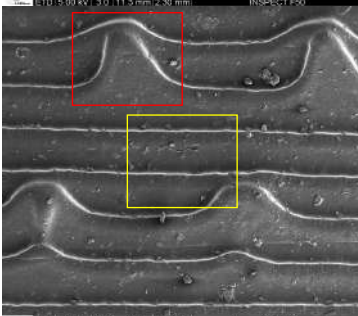
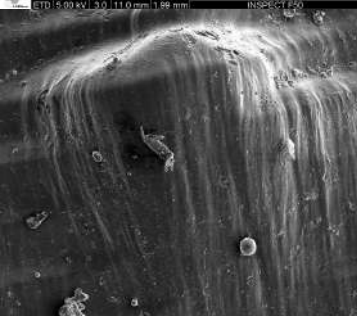
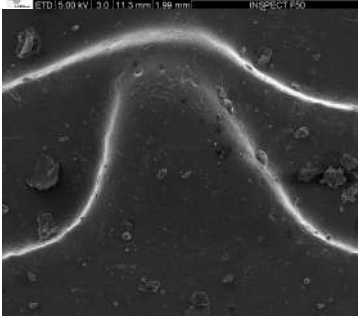
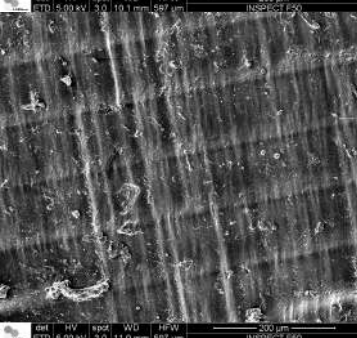
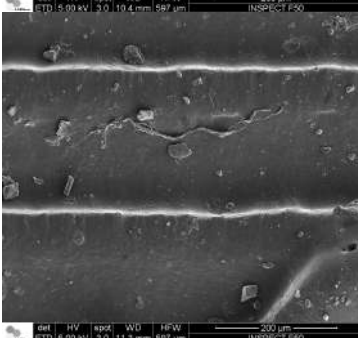
Dentro do contexto desta pesquisa, a constatação da presença de agregados e aglomerações não é um caso isolado, haja vista que estudos como o de Cardona-Vivas, Correa & Colorado (2021) já descrevem tais fenômenos associados à incorporação dos resíduos de baterias em resinas poliméricas. Especificamente sobre o PDMS, o cenário não parece ser muito distinto, com pesquisas, como a de Onyekanne *et al.* (2022), indicando aglomerações e microfissuras nesta matriz polimérica, proporcionais ao teor de magnetita nanoparticulada adicionada.

Estudos recentes que investigam o comportamento da agregação de material particulado em matrizes poliméricas desenvolveram técnicas para reduzir esse fenômeno. Uma alternativa é a modificação da superfície das nanopartículas, realizada por meio de tratamentos ultrassônicos (BARK *et al.*, 2021) com soluções e solventes específicos – sonicação (DIEKMANN; OMELAN; GIESE, 2021) –, ou adição de grupos funcionais à superfície das nanopartículas (HUANG *et al.*, 2023). O uso desse processo favorece a desagregação natural das nanopartículas, facilitando sua incorporação na matriz e reduzindo a formação de aglomerados, embora possa ser afetado por resíduos das soluções empregadas.

4.3 ANÁLISE MICROSCÓPICA DAS SUPERFÍCIES MICROALETADAS – ETD E VCD

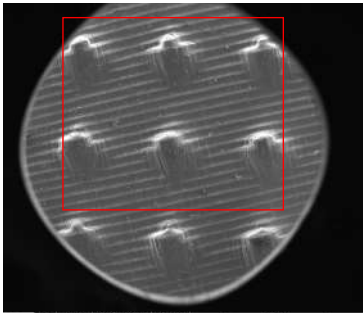
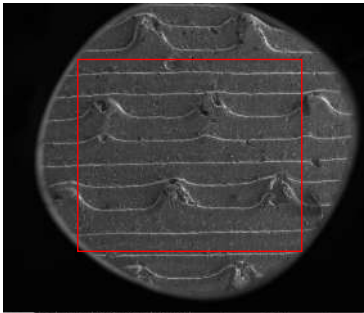
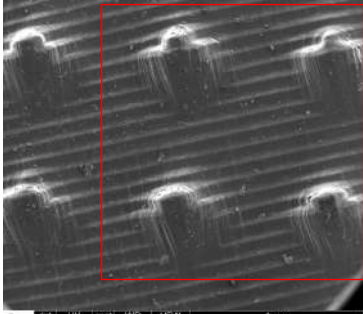
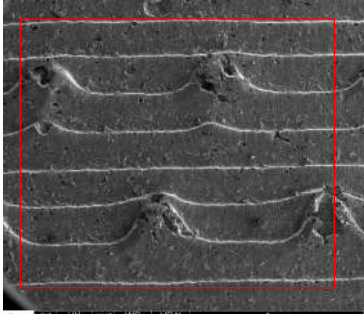
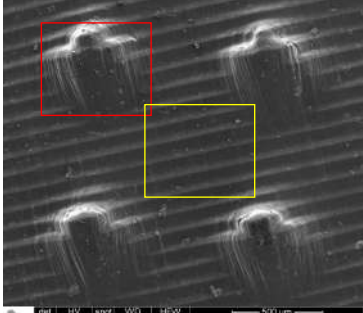
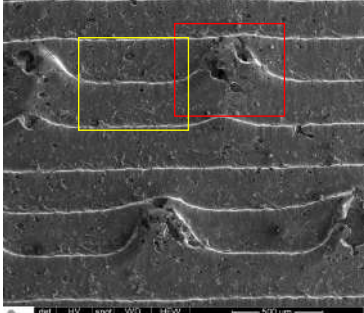
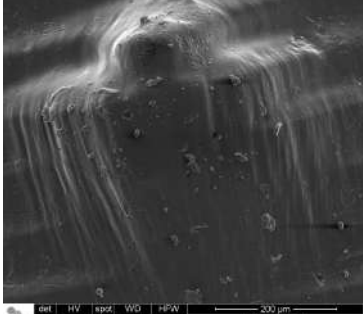
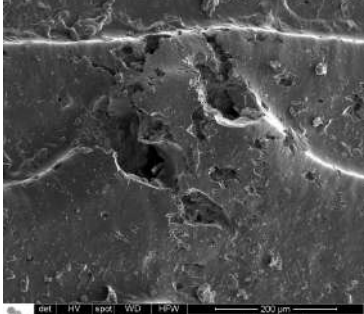
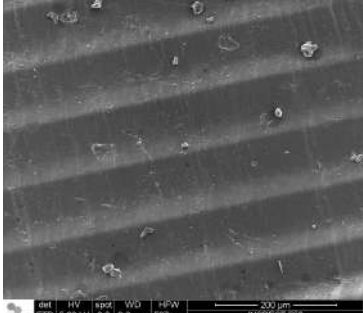
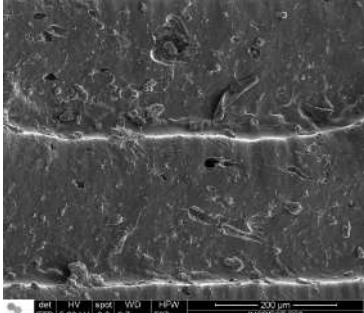
Os resultados obtidos pela análise de ETD (sigla em inglês para *Everhart-Thornley Detector*, que pode ser traduzida como Detector de Elétrons Secundários) das superfícies microaletadas são apresentados, nas tabelas a seguir, organizados por compósito desenvolvido, comparando os dois arranjos projetados e contemplando as ampliações microscópicas estudadas. Assim, o PDMS – 0 é apresentado na Tabela 13, o PDMS – 5 na Tabela 14, o PDMS – 10 na Tabela 15 e o PDMS – 15 na Tabela 16. Nesse conjunto, cada imagem subsequente apresenta um recorte da imagem anterior com ampliação superior. Nesse conjunto, cada imagem subsequente apresenta um recorte da imagem anterior com ampliação superior. Esse recorte é indicado por um retângulo de bordas vermelhas e, para a visualização da superfície de assentamento dos micropilares, as bordas estão destacadas em amarelo.

Tabela 13 – Imagens das superfícies microaletadas pela análise ETD: PDMS – 0

Ampliação	PDMS – 0A	PDMS – 0E
80×		
130×		
150×		
500× – pilar		
500× – superfície		

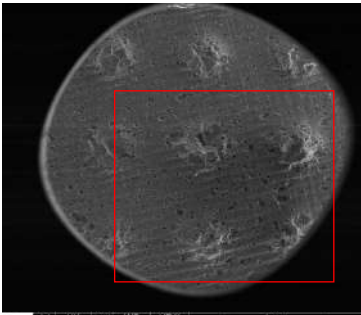
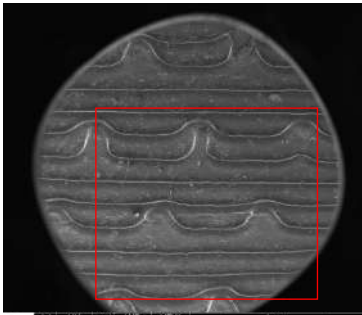
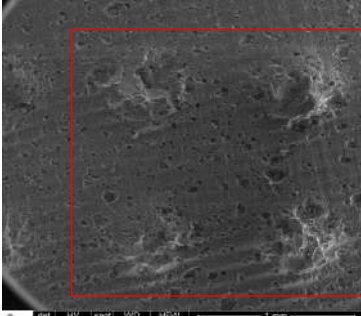
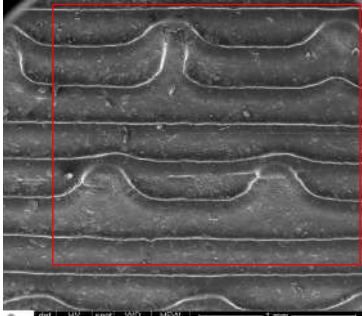
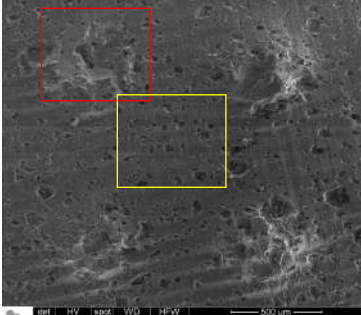
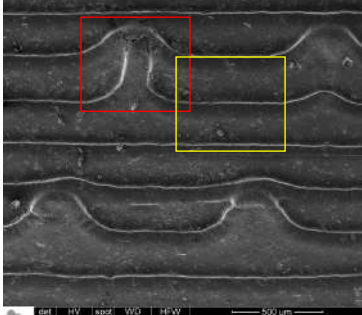
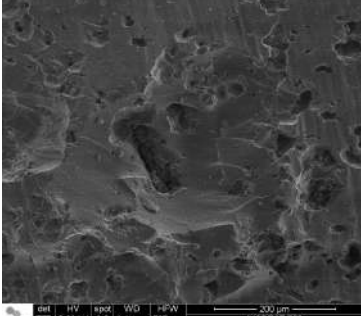
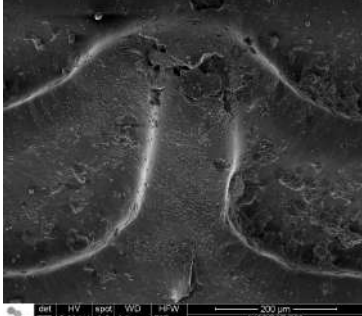
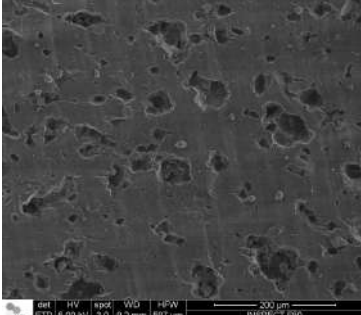
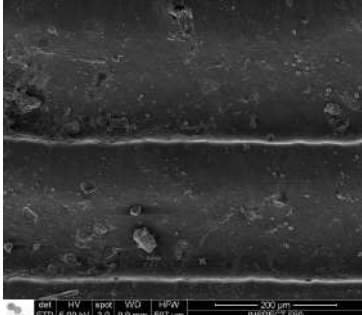
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 14 – Imagens das superfícies microaletadas pela análise ETD: PDMS – 5

Ampliação	PDMS – 5A	PDMS – 5E
80×		
130×		
150×		
500× – pilar		
500× – superfície		

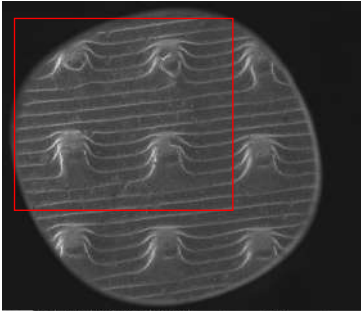
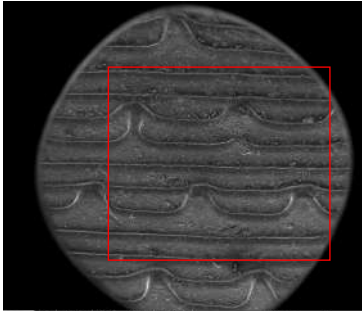
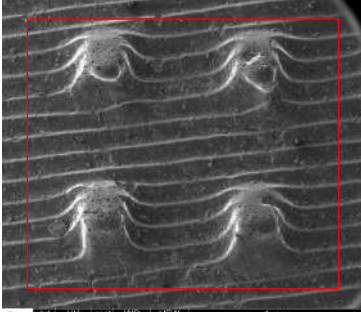
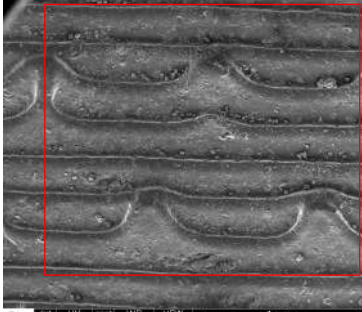
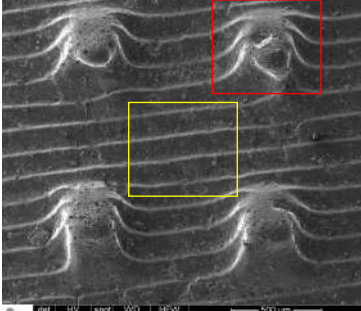
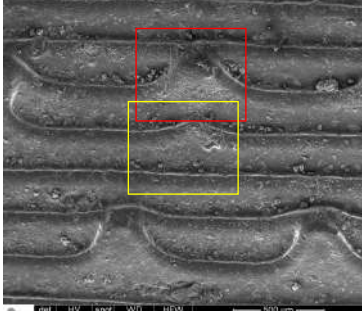
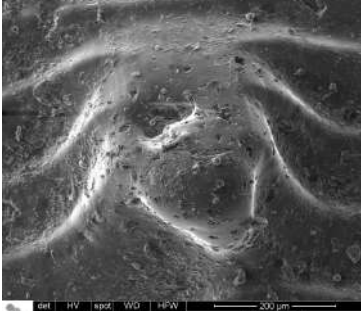
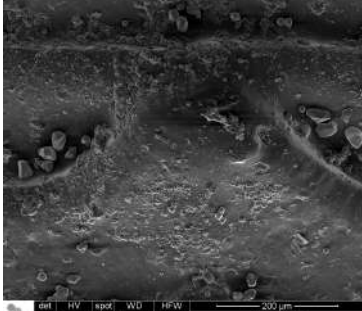
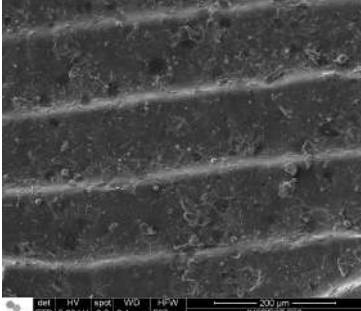
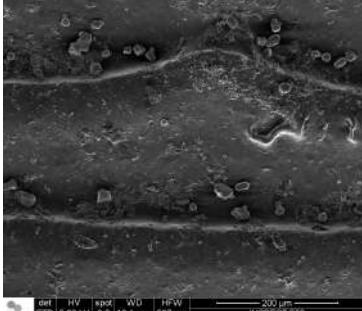
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 15 – Imagens das superfícies microaletadas pela análise ETD: PDMS – 10

Ampliação	PDMS – 10A	PDMS – 10E
80×		
130×		
150×		
500×		
500×		

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 16 – Imagens das superfícies microaletadas pela análise ETD: PDMS – 15

Ampliação	PDMS – 15A	PDMS – 15E
80×		
130×		
150×		
500×		
500×		

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As imagens obtidas do ETD apontam diferenças morfológicas, estruturais e topológicas importantes na comparação entre os arranjos desenvolvidos, o que inclui, além das propriedades dos moldes de fabricação, a qualidade dos pilares em relação ao aumento do teor de preenchimento.

No conjunto formado pelos microtrocaadores de calor fabricados com o polímero puro – isto é, PDMS – 0 –, a análise ETD confirma uma ausência significativa de defeitos estruturais pontuais e aglomerados, o que indica, a princípio, uma melhor qualidade geométrica dos seus micropilares. Se, por um lado, a homogeneidade e a baixa rugosidade superficial dos micropilares favorecem a sua integridade, por outro, as impressões do molde sobre o polímero comprometem os seus contornos, impedindo que os vértices dos micropilares sejam tão bem definidos. Esse efeito é mais evidente nos micropilares do PDMS – 0E, que se apresentam como saliências na superfície de assentamento, diferentes do formato cúbico projetado. Sobre esse caso, em específico, é possível notar que a rota de impressão foi mais grosseira, com linhas mais largas e proeminentes em comparação com o arranjo alinhado. Essa observação indica que o processo construtivo do molde do arranjo escalonado encontrou dificuldades geométricas em desenvolver, além da superfície de assentamento, os baixos-relevos onde o polímero adentrou para a modelagem dos micropilares. Além disso, o aumento das ampliações evidencia a presença de particulados oriundos de resíduos da matriz polimérica não curados.

Para o PDMS – 5, as amostras de PDMS – 5A e PDMS – 5E ainda mantêm a integridade dos micropilares, porém são notáveis algumas irregularidades superficiais, atribuídas à adição de 5% de partículas. No arranjo alinhado de micropilares, essas irregularidades são mais sutis, comprometendo pelo menos uma das faces laterais destes, enquanto, no arranjo escalonado, o efeito da adição das nanopartículas se soma mais fortemente à deficiência geométrica do molde e promove a formação de texturização superficial nos micropilares, a qual é possível observar pela presença de poros e defeitos localizados, especialmente na região superior dos pilares. O aumento da ampliação também indica que a rota grosseira da impressão do molde escalonado pode ter favorecido a aglomeração de material particulado na base de assentamento, em comparação com o PDMS – 5A.

Dando seguimento às alterações morfológicas provocadas pela adição do material particulado ao polímero, no conjunto PDMS – 10 esses efeitos são bastante perceptíveis. Para o arranjo alinhado, que até então superava geométrica e topologicamente o escalonado, existe a perda estrutural parcial dos micropilares, além de deformações, rugosidades e irregularidades – até mesmo na base de assentamento –, o que dificulta até a identificação do que é micropilar. Esses são sinais manifestos associados à dispersão não homogênea do preenchimento na matriz polimérica. Para o PDMS – 10E, embora a adição do particulado indique a formação de aglomerados mais densos que no percentual anterior, os fenômenos de porosidades superficiais são menos intensos. Sabendo disso, é possível acreditar que os resultados térmicos obtidos do PDMS – 10A sejam sutis e até próximos aos alcançados pelo PDMS – 10E, pois a qualidade estrutural de ambos foi afetada: o primeiro pela dispersão e o segundo pelo próprio molde.

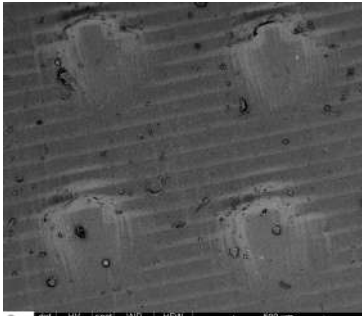
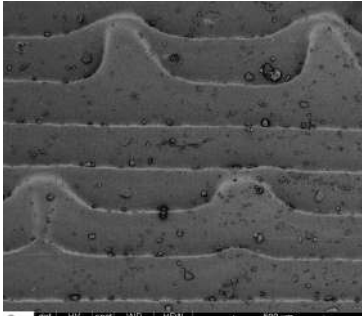
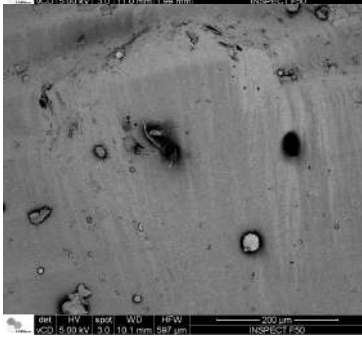
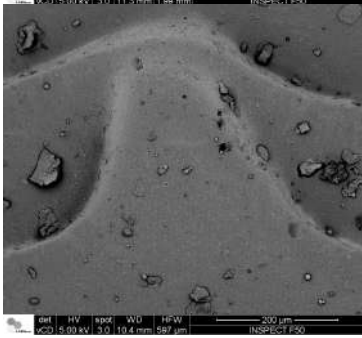
Para o compósito PDMS – 15, o fenômeno da aglomeração se torna ainda mais evidente. No

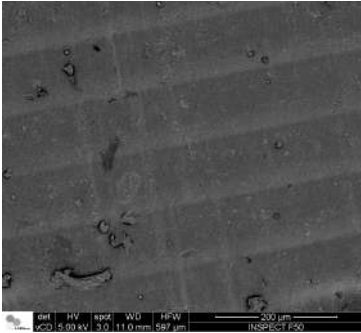
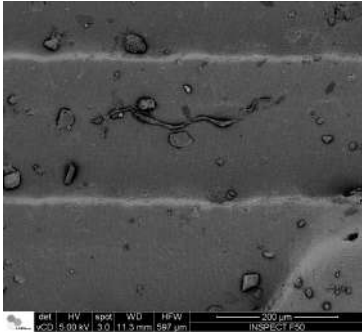
arranjo alinhado, ocorre a deformação estrutural dos micropilares, causada por porosidades, o que provoca o aumento da rugosidade superficial. No arranjo escalonado, mais uma vez é possível observar a aglomeração do material de preenchimento, que vai desde a estrutura do micropilar até a base de seu assentamento, indicando a contribuição das características morfológicas do molde no acúmulo do particulado, aliada aos efeitos da dispersão e à falha de adesão entre a matriz polimérica e o preenchimento.

De maneira geral, comparativamente, o arranjo alinhado (A) demonstrou maior preservação das características geométricas que foram projetadas aos micropilares, o que, inadvertidamente, foi mais afetado pela dispersão – em especial no PDMS – 10A – e, em segundo plano, pela aglomeração das partículas na matriz. Por outro lado, o arranjo escalonado (E) foi impactado, além desses efeitos inerentes à incorporação, pela qualidade do molde, comprometida pela rota de sua impressão.

Semelhantemente, os resultados obtidos pela análise de vCD (sigla em inglês que remete a *Backscattered Electron Detector*, que pode ser traduzida como Detector de Elétrons Retroespalhados) das superfícies microaletadas são apresentados, nas tabelas a seguir, organizados por compósito desenvolvido, comparando os dois arranjos projetados e contemplando as ampliações microscópicas estudadas. Assim, o PDMS – 0 é apresentado na Tabela 17, o PDMS – 5 na Tabela 18, o PDMS – 10 na Tabela 19 e o PDMS – 15 na Tabela 20. Essas imagens representam os mesmos recortes observados na análise anterior, isto é, com o detector ETD.

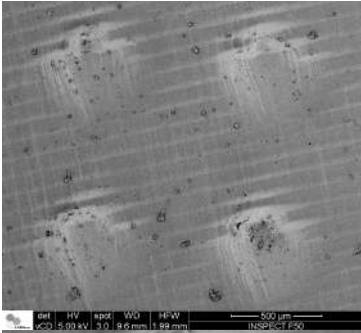
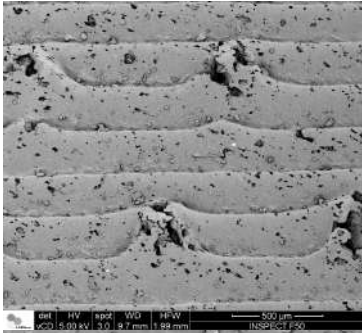
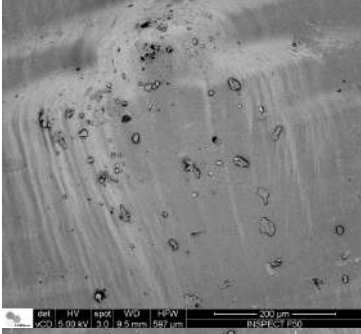
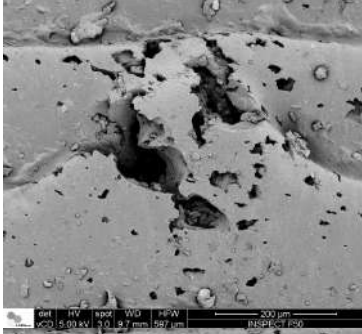
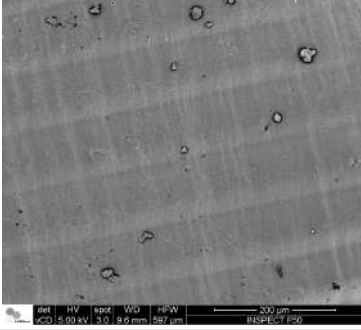
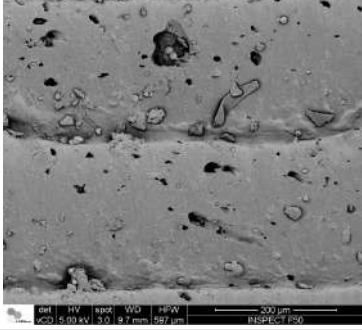
Tabela 17 – Imagens das superfícies microaletadas pela análise vCD: PDMS – 0

Ampliação	PDMS – 0A	PDMS – 0E
150×		
500×		

Ampliação	PDMS – 0A	PDMS – 0E
500× – superfície		

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 18 – Imagens das superfícies microaletadas pela análise vCD: PDMS – 5

Ampliação	PDMS – 5A	PDMS – 5E
150×		
500× – pilar		
500× – superfície		

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

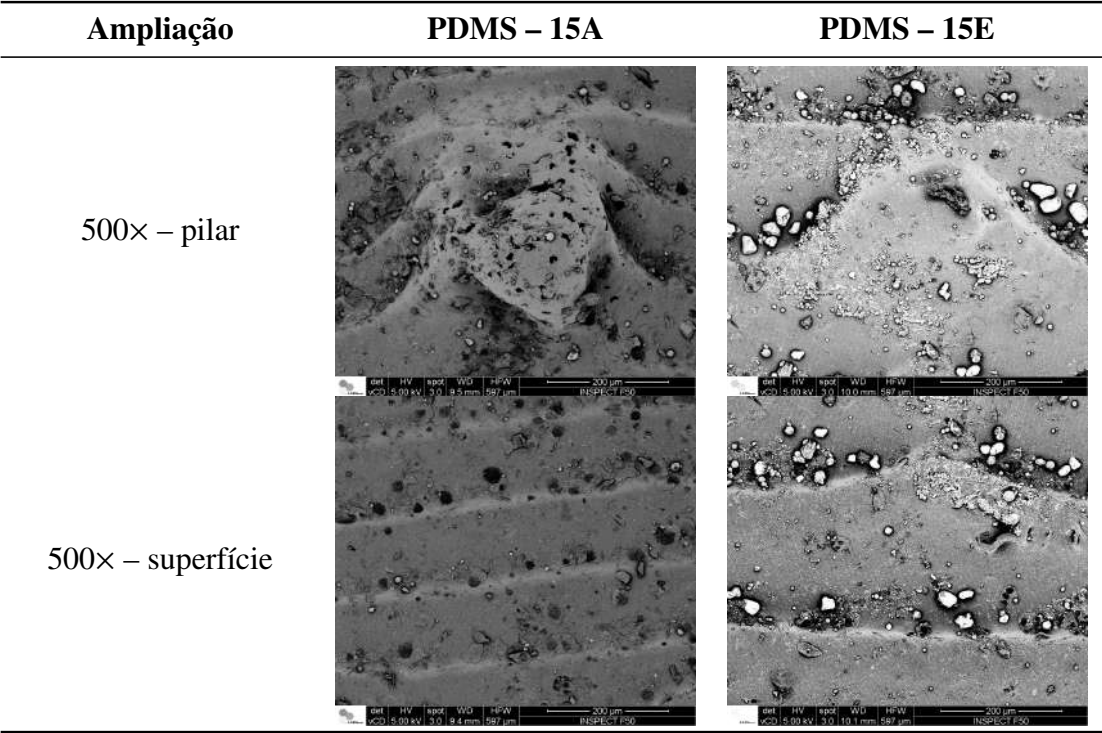
Tabela 19 – Imagens das superfícies microaletadas pela análise vCD: PDMS – 10

Ampliação	PDMS – 10A	PDMS – 10E
150×		
500×		
500×		

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 20 – Imagens das superfícies microaletadas pela análise vCD: PDMS – 15

Ampliação	PDMS – 15A	PDMS – 15E
150×		



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Sob a análise vCD, observa-se que as amostras de polímero puro (PDMS – 0A e PDMS – 0E) apresentam superfícies relativamente homogêneas, marcadas pela baixa predominância de regiões mais claras. Esse é um indicativo comum da matriz polimérica, formada por elementos de baixo número atômico médio, como carbono (6), oxigênio (8) e silício (14). A presença de pontos mais claros pode representar regiões nas quais o PDMS não se curou termicamente por completo, além de impurezas da própria matriz. As demais diferenças decorrem da topologia e da morfologia dos micropilares, já discutidas na análise ETD anteriormente apresentada.

Dando seguimento, a incorporação de 5% de particulados na matriz polimérica, além de resultar na degradação estrutural dos micropilares – pela formação de poros, por exemplo –, apresenta alguns pontos mais claros, o que pode ser atribuído à presença de cobalto, de número atômico 27. É possível notar também resquícios de polímero não curado.

Na amostra de PDMS – 10A, é possível observar a formação de duas regiões distintas: uma mais clara e outra mais escura, que se misturam entre si, fornecendo fortes indícios de aglomeração e baixa interação do material particulado com a matriz polimérica. A baixa dispersão observada nesse caso culminou na deficiência geométrica dos micropilares desse arranjo, como mostrado na análise ETD. Por outro lado, o PDMS – 10E mostrou-se estruturalmente mais consistente – embora exista a formação de poros –, apresentando regiões localizadas de aglomeração.

Por fim, o conjunto de superfícies PDMS – 15A e PDMS – 15E indica uma presença mais marcante de aglomerações, as quais contribuíram para a formação de poros na estrutura dos micropilares. Especialmente no PDMS – 15E, é possível observar a presença de diversos aglomerados tanto nos micropilares quanto na superfície de seu assentamento. Esses aglomerados,

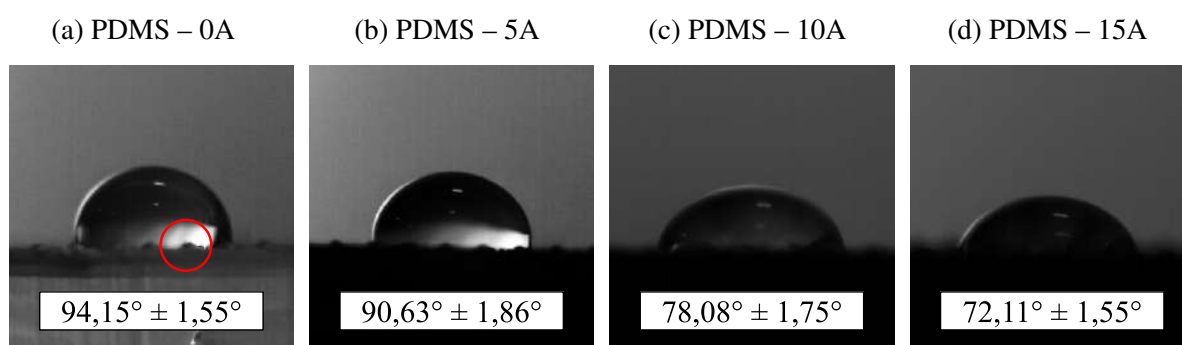
por sua vez, apresentam tonalidades mais claras em comparação com o restante da amostra, reforçando a hipótese de que estejam correlacionados à presença do particulado obtido da reciclagem das LIBs, o qual é constituído por cobalto, elemento de número atômico superior aos encontrados na matriz polimérica.

4.4 ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DAS SUPERFÍCIES MICROALETADAS – ÂNGULO DE CONTATO

Em relação à caracterização superficial das regiões microaletadas, a Figura 107 apresenta o registro fotográfico obtido da gota de água deionizada de alta pureza disposta sobre a superfície aletada com o arranjo alinhado, destacando o PDMS – 0A (Figura 107a), o PDMS – 5A (Figura 107b), o PDMS – 10A (Figura 107c) e o PDMS – 15A (Figura 107d).

Nessas representações, também são identificados os valores médios de ângulo de contato e o desvio-padrão amostral do conjunto – na forma de incerteza – do conjunto de medições angulares realizadas para cada superfície.

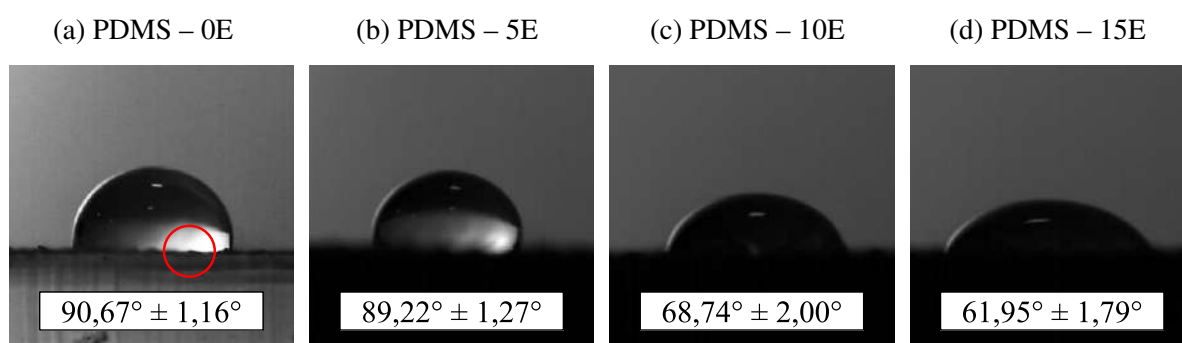
Figura 107 – Ângulo de contato para as amostras do arranjo alinhado



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Semelhantemente, a Figura 108 apresenta os resultados obtidos para as superfícies do arranjo escalonado, destacando o PDMS – 0E (Figura 108a), o PDMS – 5E (Figura 108b), o PDMS – 10E (Figura 108c) e o PDMS – 15E (Figura 108d).

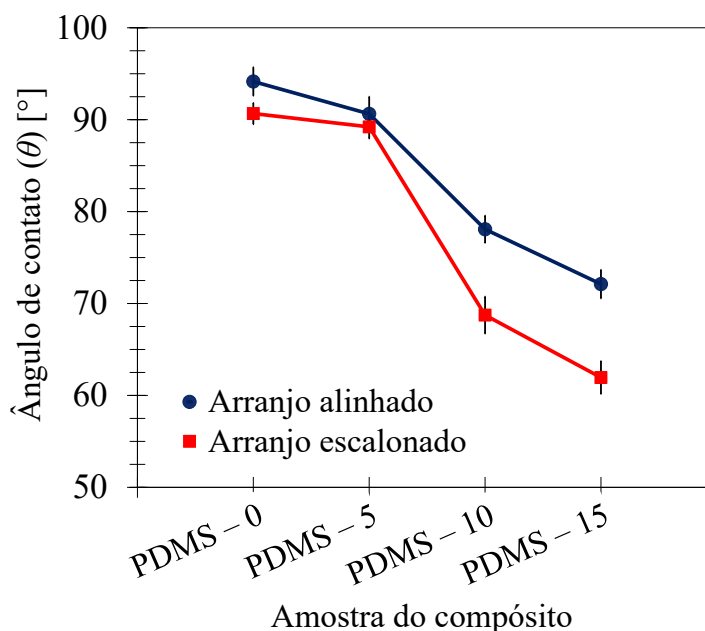
Figura 108 – Ângulo de contato para as amostras do arranjo escalonado



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para facilitar a visualização desses resultados, a Figura 109 traz uma representação do comportamento do ângulo de contato em função do arranjo e do percentual de nanopartículas incorporadas à matriz polimérica de fabricação das superfícies.

Figura 109 – Comparação dos ângulos de contato das superfícies microaletadas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em relação às imagens obtidas, é possível observar que o perfil dos micropilares do arranjo alinhado é mais facilmente identificável e mais sobressalente à superfície em relação ao arranjo escalonado. Isso pode ser percebido, por exemplo, na comparação do perfil destacado no interior dos círculos em vermelho das Figuras 107a e 108a, correspondentes às superfícies do PDMS – 0A e do PDMS – 0E, respectivamente. Esse comportamento – já descrito nas análises superficiais com Microscopia Eletrônica de Varredura – fornece indícios de que a qualidade superficial e geométrica do arranjo alinhado seja superior, o que influencia diretamente os resultados térmicos a serem discutidos, bem como a queda de pressão associada à região microaletada.

Para trazer uma abordagem completa sobre o assunto, é importante estabelecer um comparativo inicial considerando apenas a influência dos micropilares no ângulo de contato. Comparando uma superfície idealmente lisa de PDMS ou de seus compósitos – pelo Modelo de Young – e outra com micropilares, o ângulo de contato intrínseco do material é o mesmo, sendo que as variações têm origem topológica.

Partindo para o modelo mais simples que considera a rugosidade superficial – o Modelo de Wenzel –, se o parâmetro de rugosidade (r) for equivalente a 1, o ângulo wenzeliano de contato (θ_W) será igual ao intrínseco de Young (θ_Y). Essa situação está associada ao caso da superfície lisa, na qual a área total e a área lisa são as mesmas. Por outro lado, se existirem, de fato, rugosidades superficiais, o termo relacionado às áreas lisas diminui, o que promove um aumento do fator de rugosidade e, diretamente, no ângulo de contato.

Toda essa discussão serve para mostrar que os valores apresentados, mesmo para o PDMS – 0, independentemente do arranjo, são inferiores aos encontrados na literatura para o polidimetilsiloxano puro, cujo valor é da ordem de 108° . Esses resultados evidenciam que qualquer modificação superficial é responsável por alterar a molhabilidade da superfície em comparação com uma superfície lisa.

Tratando especificamente dos arranjos de micropilares, a configuração escalonada, devido à limitação geométrica, cria um cenário de lisura superficial total superior ao arranjo alinhado de micropilares. Essa característica proporciona a redução do fator de rugosidade e, conseqüentemente, do ângulo de contato. Ademais, nessa condição, predominam as hipóteses de Wenzel, ou seja, o líquido encontra meios de preencher as irregularidades mais facilmente.

Por outro lado, a definição estrutural dos micropilares do arranjo alinhado intensifica as irregularidades da superfície do substrato, reduzindo a área lisa inferior, aumentando o fator de rugosidade e, por conseguinte, elevando o valor do ângulo de contato.

Outra observação relevante diz respeito ao material de fabricação dos microtrocares de calor. Como observado anteriormente, o acréscimo de nanopartículas à matriz polimérica do PDMS está relacionado ao aumento de regiões aglomeradas de material particulado. A presença dessas aglomerações é proporcional ao teor de nanopartículas agregadas, o que reduz, ainda que minimamente, a definição dos micropilares, tornando as regiões aletadas cada vez mais próximas de uma superfície lisa, o que propicia o fenômeno descrito.

Em ambas as configurações de micropilares, é possível observar que a redução do ângulo de contato entre os compósitos é sutil na comparação do PDMS – 5 com o PDMS – 0. Esse comportamento se intensifica para o PDMS – 10 e apresenta uma leve diminuição para o PDMS – 15.

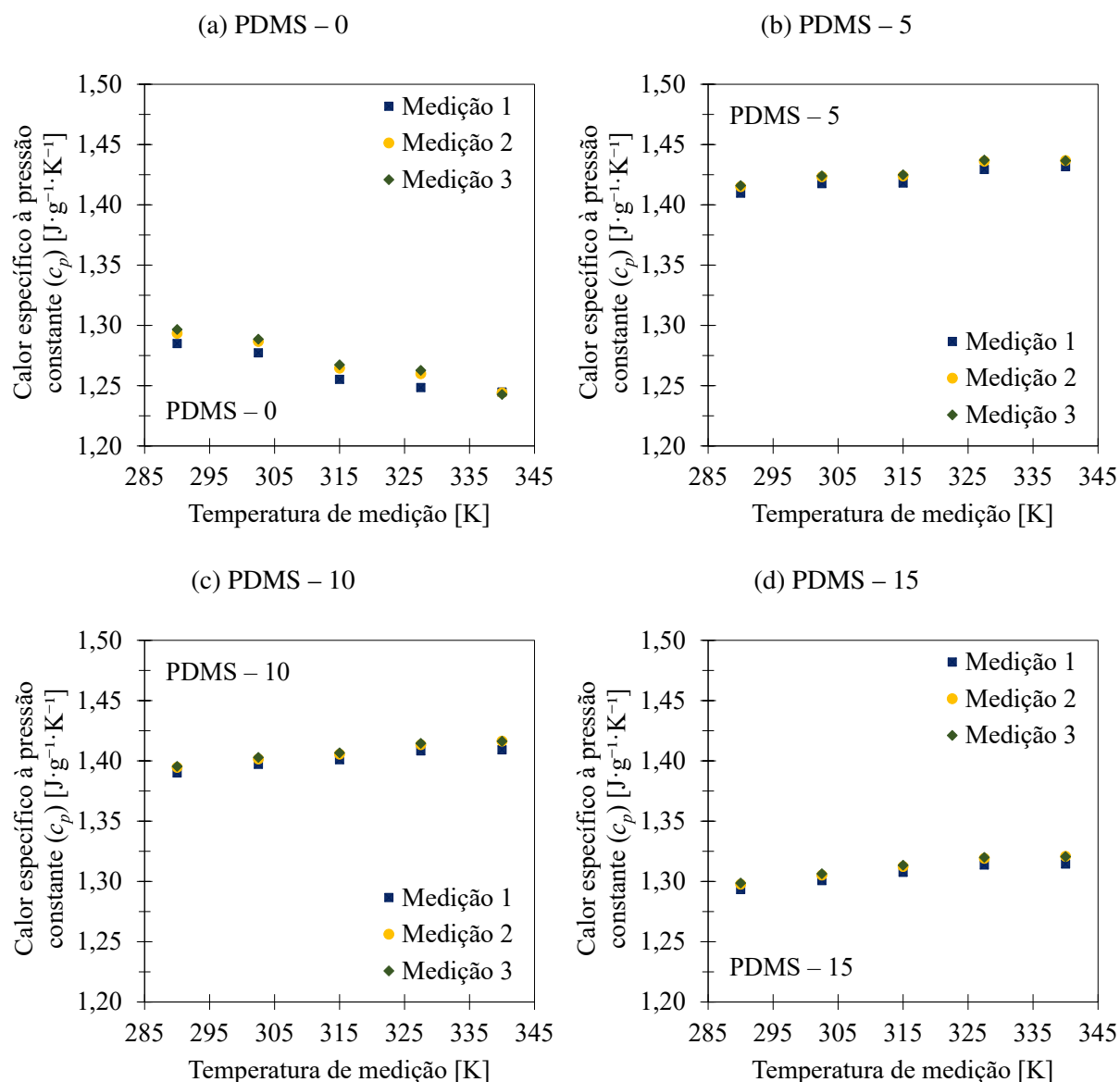
Outro ponto a se destacar é que essa variação é mais categórica nas superfícies do arranjo escalonado, reforçando a hipótese de que esses micropilares sofreram mais intensamente os efeitos do método de fabricação, além da aglomeração, que é comum a ambas as configurações.

4.5 ANÁLISE DO CALOR ESPECÍFICO À PRESSÃO CONSTANTE (c_p) DOS COMPÓSITOS

Para a avaliação térmica inicial, analisou-se o calor específico à pressão constante das amostras (c_p), em $[\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$, obtido pelo sistema PPMS®, conforme mencionado no capítulo de Metodologia. Esse tipo de análise possibilita uma comparação mais fiel das propriedades térmicas obtidas, o que não ocorre simplesmente com a capacidade térmica (C_p), a qual é influenciada pela massa das amostras – que não foi constante entre as medições.

Sendo assim, a Figura 110 apresenta os resultados obtidos para cada uma das três medições realizadas das amostras em função da temperatura, destacando o PDMS – 0 (Figura 110a), o PDMS – 5 (Figura 110b), o PDMS – 10 (Figura 110c) e o PDMS – 15 (Figura 110d).

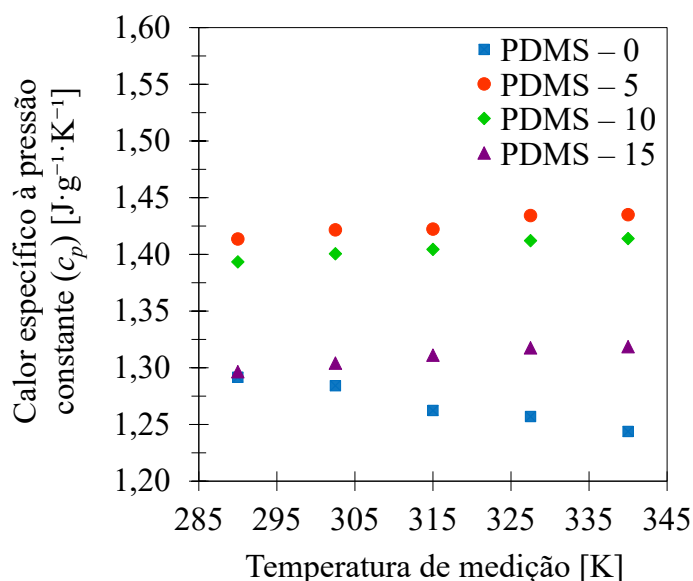
Figura 110 – Calor específico à pressão constante das amostras em função da temperatura para cada medição



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tendo isso em vista, a Figura 111 reúne os dados, em função de cada amostra, da média do calor específico à pressão constante obtido das três medições para cada temperatura, expressa em $[J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}]$.

Figura 111 – Média do calor específico à pressão constante das medições em função da temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para o cálculo final, observou-se que as incertezas relacionadas ao erro instrumental de medição (s_{c_p}) e ao desvio-padrão amostral entre as medições realizadas (δ_{c_p}), ambas em $[\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, são significativamente inferiores em comparação com os valores obtidos. Sendo assim, a Tabela 21 apresenta a média do calor específico à pressão constante das amostras obtida na faixa de temperatura de 290 K a 340 K, mostrada na Figura 111. A incerteza associada apresentada nessa tabela refere-se apenas a S_{c_p} , ou seja, ao desvio-padrão amostral observado nos dados desse conjunto definido pelas temperaturas, expresso em $[\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$.

Tabela 21 – Calor específico à pressão constante médio dos compósitos de PDMS

Amostra	c_p [$\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
PDMS – 0	1,268 $\pm$ 0,020
PDMS – 5	1,425 $\pm$ 0,009
PDMS – 10	1,405 $\pm$ 0,008
PDMS – 15	1,309 $\pm$ 0,009

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observa-se que o menor valor de calor específico foi obtido para a amostra sem partículas recicladas (PDMS – 0), havendo um aumento da propriedade na presença dessas partículas. Entretanto, esse valor tende a diminuir à medida que a concentração de partículas aumenta.

Vale ressaltar que, de acordo com as especificações do equipamento de medição, amostras cuja condutividade térmica é muito próxima à da *adenda* (o conjunto formado pelo porta-amostra e pela pasta térmica) podem ter seus resultados comprometidos em termos de precisão e

confiabilidade, o que pode contribuir para o comportamento não linear observado entre a amostra PDMS – 0 e as demais amostras contendo nanopartículas.

Teoricamente, em polímeros – especialmente o PDMS, amplamente conhecido por suas propriedades de isolamento térmico – uma maior quantidade de calor é necessária para elevar a temperatura de uma massa específica – definição de calor específico – sendo essa energia usada para excitar os diversos modos vibracionais das cadeias poliméricas.

A adição de nanopartículas metálicas à matriz polimérica, devido à menor energia específica necessária para aquecê-las, influencia a redução do calor específico do compósito, proporcionalmente à fração incorporada. Esse efeito pode ser influenciado, positiva ou negativamente, por aglomerações localizadas, que tendem a aumentar – ou não – a concentração metálica em regiões específicas.

Para comparação com os valores obtidos neste trabalho, é importante destacar estudos relacionados, como o de Luo *et al.* (2022), que identificou uma tendência de redução do calor específico em compósitos de PDMS reforçados com nanopartículas de óxido de grafeno (GO). Os valores encontrados foram $1,08 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ para o PDMS puro, $0,99 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ para a amostra contendo 2% em massa, e $0,94 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ para 5% em massa de material nanoparticulado incorporado. Conclusão semelhante foi observada para nanopartículas de alumina (Al_2O_3), que apresentaram uma queda exponencial de $1,42 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ para $1,29 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ com a adição de 10% em massa, faixa na qual esse parâmetro se aproximou da estabilização (YI *et al.*, 2014).

4.6 ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k) DOS COMPÓSITOS

Os resultados obtidos e suas respectivas incertezas de 5% (s_{jk}) para a condutividade térmica (k), em $[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, das quatro medições realizadas pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Lisboa, em Lisboa, Portugal, utilizando o equipamento TLS-50 mm, da marca Thermtest, são apresentados na Tabela 22. Nessa tabela, também são calculadas a média da condutividade ($\bar{k}$) e seu desvio-padrão amostral (δ_k), ambas em $[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, por meio das Equações 3.24 e 3.25, respectivamente, mostradas no capítulo de Metodologia.

Tabela 22 – Resultados das medições da condutividade térmica (k) para as amostras de PDMS

Amostra	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	$\bar{k}$	δ_k
PDMS – 0	0,221 ±0,011	0,222 ±0,011	0,220 ±0,011	0,215 ±0,011	0,219	0,003
PDMS – 5	0,254 ±0,013	0,252 ±0,013	0,258 ±0,013	0,252 ±0,013	0,254	0,003
PDMS – 10	0,297 ±0,015	0,296 ±0,015	0,299 ±0,015	0,297 ±0,015	0,297	0,001
PDMS – 15	0,365 ±0,018	0,368 ±0,018	0,365 ±0,018	0,365 ±0,018	0,366	0,001

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Seguindo a metodologia anteriormente descrita, os valores obtidos da análise estatística são mostrados na Tabela 23.

Tabela 23 – Incertezas obtidas para as amostras analisadas

Amostra	$s_{\bar{k}}$	s_{s_k}	s_k	S_k
PDMS – 0	0,0015	0,0054	0,0056	0,0112
PDMS – 5	0,0014	0,0063	0,0064	0,0128
PDMS – 10	0,0006	0,0074	0,0074	0,0148
PDMS – 15	0,0007	0,0091	0,0091	0,0182

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Por fim, os resultados médios obtidos para as condutividades térmicas das amostras são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Condutividade térmica média dos compósitos de PDMS

Amostra	k [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Aumento percentual em relação ao PDMS – 0 [%]
PDMS – 0	0,219 $\pm$ 0,011	–
PDMS – 5	0,254 $\pm$ 0,013	15,98
PDMS – 10	0,297 $\pm$ 0,015	35,62
PDMS – 15	0,366 $\pm$ 0,018	67,12

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em relação ao sistema experimental desenvolvido para medição da condutividade térmica, os resultados médios obtidos para os compósitos são apresentados na Tabela 25. Os valores da condutividade térmica e da sua respectiva incerteza correspondem às médias aritméticas obtidas, respectivamente, entre as diferentes aplicações de potência elétrica para cada compósito.

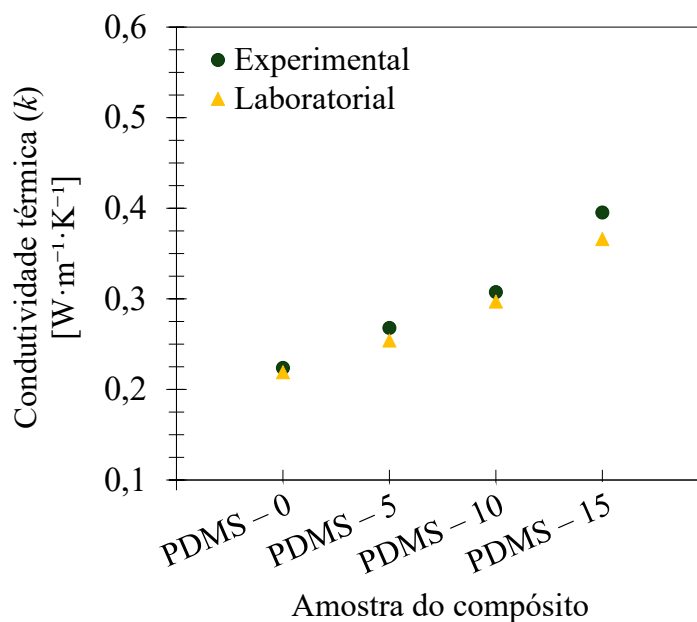
Tabela 25 – Comparação dos resultados de condutividade térmica com os métodos empregados

Amostra	k [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
PDMS – 0	0,224 $\pm$ 0,055
PDMS – 5	0,268 $\pm$ 0,081
PDMS – 10	0,307 $\pm$ 0,086
PDMS – 15	0,395 $\pm$ 0,151

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com o objetivo de comparar esses resultados com os obtidos pelo método laboratorial, a Figura 112 apresenta ambos os dados, sendo possível observar, em um primeiro momento, que os métodos evidenciaram o aumento da propriedade térmica proporcional ao acréscimo de nanopartículas à matriz polimérica de PDMS.

Figura 112 – Condutividade térmica experimental das medições



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Embora os comportamentos sejam similares – levemente exponenciais –, é possível observar que o método experimental desenvolvido superestima os valores da condutividade térmica, atingindo 2,18%, 5,47%, 3,51% e 8,01% em relação aos valores laboratoriais medidos para o PDMS – 0, PDMS – 5, PDMS – 10 e PDMS – 15, respectivamente. Outro ponto a se destacar é que a incerteza propagada do aparato é muito superior à do equipamento laboratorial de medição, o que caracteriza uma limitação do projeto. Dentre todos os termos analisados pela Teoria da Propagação do Erro empregada, destaca-se o relacionado à diferença de temperatura, pois, além dessas diferenças serem pequenas, elas se reduzem proporcionalmente ao teor de nanopartículas, em decorrência do aumento da condutividade térmica dos compósitos, o que favorecia a aproximação da incerteza dos termopares com dT .

De qualquer forma, o desenvolvimento deste projeto de medição de propriedades térmicas reforçou a pesquisa como um todo, apresentando resultados consistentes e estimulando novas abordagens, técnicas e soluções para a análise da condutividade térmica experimentalmente, como o uso de um sensor de fluxo térmico, já descrito em outros estudos.

Em matrizes poliméricas, como no caso do PDMS, efeitos relacionados à estrutura amorfa, à repetitividade das cadeias monoméricas e a fenômenos vibracionais contribuem para um cenário de baixa condutividade térmica, tornando esses materiais amplamente reconhecidos como isolantes (RICCUCCI *et al.*, 2021). A incorporação de nanopartículas ao PDMS promove a formação de uma rede termicamente condutora, isto é, caminhos de condução térmica dentro da matriz polimérica, o que aumenta a condutividade efetiva do compósito proporcionalmente à concentração adicionada (GUO *et al.*, 2020). Haggemueller *et al.* (2007) destacam que o aumento da condutividade térmica em compósitos de matriz polimérica ocorre de maneira gradual e lenta com o percentual de preenchimento, como observado nesta pesquisa, exceto para o caso de

materiais altamente condutores, como é o caso do grafeno. Todos esses fenômenos descritos foram observados nos resultados obtidos para a condutividade térmica dos compósitos, embora o aumento desse parâmetro ainda seja bastante sutil, em função, provavelmente, dos efeitos da dispersão e homogeneidade, promovendo regiões densamente concentradas de partículas.

O tamanho e o formato das nanopartículas utilizadas também influenciou o resultado final da condutividade térmica do compósito, pois cargas termicamente condutoras com tamanho menor facilitam a formação da rede condutora (REN *et al.*, 2019). Vale destacar também que, partículas esféricas promovem um contato pontual entre si, o que resulta em propriedades térmicas inferiores se comparado com enchimentos lineares (como nanotubos de carbono), e lamelares (como grafeno) (FU *et al.*, 2014).

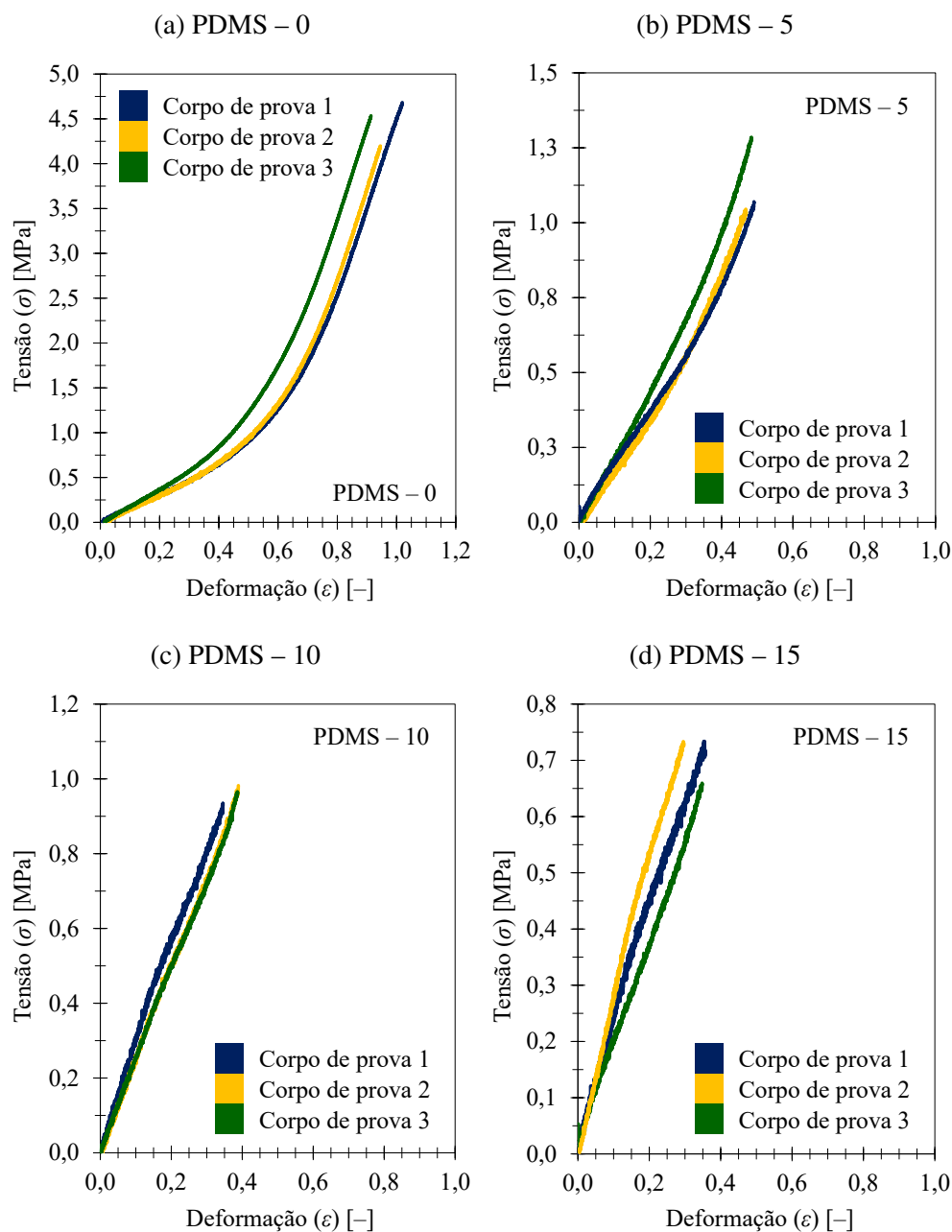
Para que essa melhoria das propriedades térmicas seja efetiva, é necessária uma boa dispersão e homogeneidade do compósito. Regiões com alta concentração elevam o contato entre partículas, favorecendo a rede de condução e, consequentemente, a condutividade térmica. Por outro lado, regiões com baixa concentração ou fraca adesão criam lacunas que aumentam a resistência térmica local. Em relação ao preenchimento, o tamanho das nanopartículas também influencia o resultado final da condutividade térmica do compósito, sendo que, de acordo com Guo *et al.* (2020), cargas termicamente condutoras com tamanho menor facilitam a formação da rede condutora (REN *et al.*, 2019). Quanto ao formato, a área de contato térmico influencia a resistência térmica do preenchimento, sendo que, preenchimentos de caráter esférico, como foi o caso dessa pesquisa,

Outro aspecto importante dentro deste contexto para compreender o comportamento observado diz respeito à disposição das nanopartículas no PDMS. Diferentemente da presente pesquisa, é notório que o material de preenchimento disposto de maneira orientada, em razão da direção específica, cria um cenário ideal para a condução térmica, como foi o caso do estudo de Liu *et al.* (2018) que obteve uma condutividade térmica de $0,32 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ para o compósito de PDMS com nanopartículas orientadas de argila em 5% de massa, em comparação com $0,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ do mesmo compósito sem orientação.

4.7 ANÁLISE DAS CURVAS σ - ε E DOS PARÂMETROS MECÂNICOS DOS COMPÓSITOS

Após ensaiados sob tração, os resultados obtidos dos corpos de prova fabricados com os compósitos de PDMS – nanopartícula foram organizados na forma de curvas σ - ε , como mostra a Figura 113. Nessa representação são destacados os comportamentos observados pelos três corpos de prova de cada concentração, isto é, PDMS – 0 (Figura 113a), PDMS – 5 (Figura 113b), PDMS – 10 (Figura 113c) e PDMS – 15 (Figura 110d).

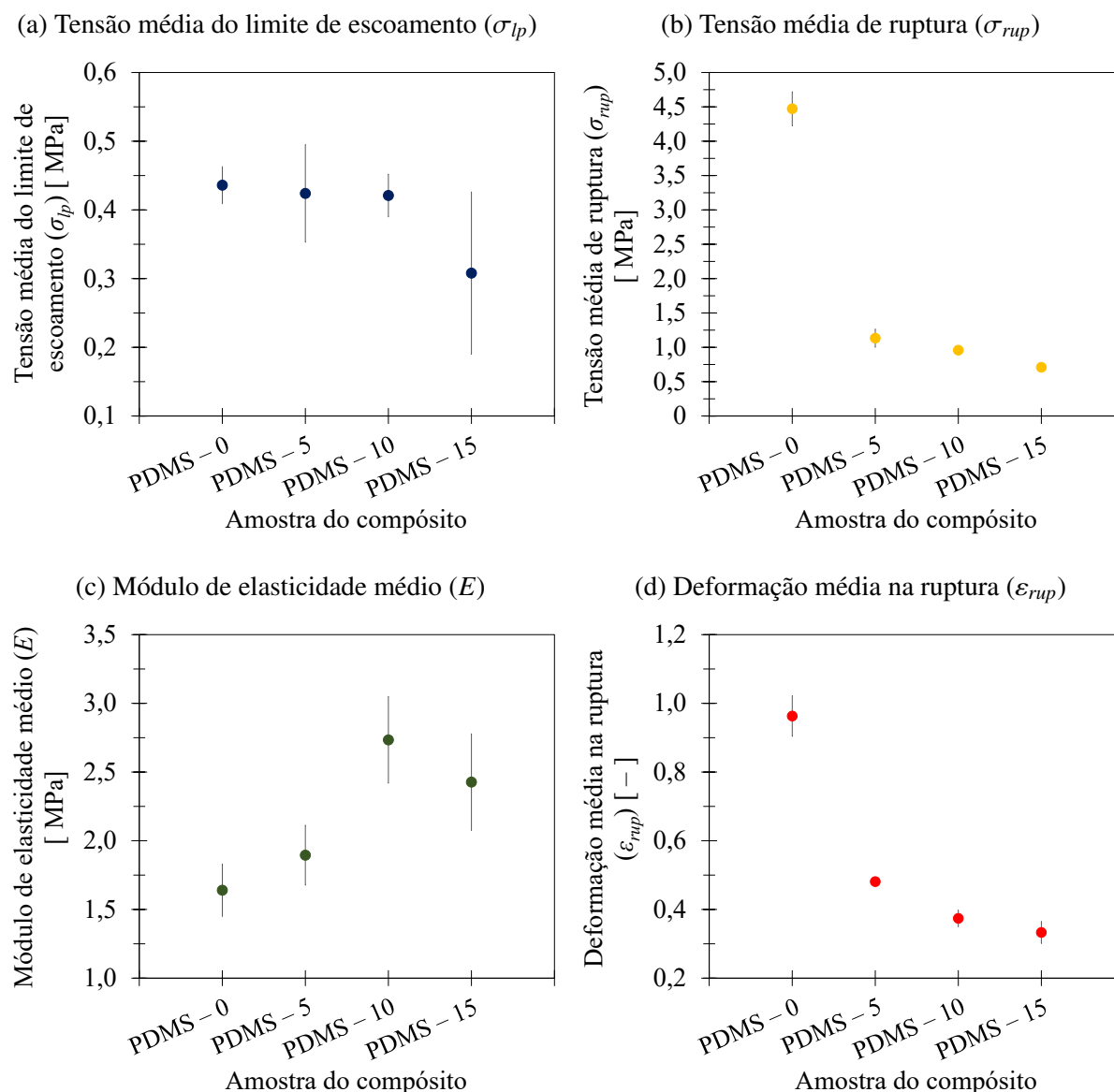
Figura 113 – Curvas σ - ϵ dos corpos de prova fabricados com os compósitos



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para representar os dados observados nas curvas σ - ϵ , a Figura 114 apresenta, em função de cada compósito, a média obtida das propriedades mecânicas individualmente, destacando a tensão limite de escoamento (σ_{lp}) (Figura 114a), a tensão de ruptura (σ_{rup}) (Figura 114b), o módulo de elasticidade (E) (Figura 114c), todos em [MPa], e a deformação na ruptura (ϵ_{rup}) (Figura 114d), um adimensional.

Figura 114 – Propriedades mecânicas médias dos corpos de prova fabricados em compósitos



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise das curvas σ - ε e dos resultados mecânicos obtidos sugere que a adição de nanopartículas derivadas da reciclagem de baterias de íons de lítio à matriz polimérica de PDMS prejudica a elasticidade inicial do material, indicando um início precoce da deformação plástica à medida que a concentração do material nanoparticulado aumentou nos compósitos, conforme evidenciado pela tensão de limite de escoamento (σ_{lp}).

O segundo parâmetro analisado – a tensão de ruptura (σ_{rup}) – também apresentou comportamento decrescente, indicando que o aumento da incorporação reduziu a capacidade do compósito de suportar carga antes da fratura. A observação desse comportamento da propriedade reforça a presença de defeitos estruturais provocados pela aglomeração na matriz que, atuando como discontinuidades, concentram tensões de maneira local e dificultam a distribuição da carga.

O módulo de elasticidade (E), por sua vez, apresentou crescimento até o corpo de prova de PDMS-10, exibindo posteriormente uma queda no PDMS-15, porém ainda superior ao

compósito com 5% de nanopartículas agregadas. Esse comportamento indica que os compósitos se tornam mais rígidos com a incorporação, o que também sugere uma menor deformação.

A redução da deformação na ruptura (ε_{rup}) é um efeito relacionado ao comportamento do módulo de elasticidade apresentado. O aumento da rigidez do compósito indica que a incorporação das nanopartículas no PDMS contribui para a restrição da mobilidade das cadeias poliméricas.

O conjunto dos resultados obtidos nessas propriedades indica que a dispersão das nanopartículas na matriz polimérica não ocorreu de forma homogênea, evidenciada pela presença de aglomerados que facilitam a formação de regiões frágeis onde ocorre concentração de tensão. Outro efeito correlato é a adesão das nanopartículas que, aparentemente, não foi totalmente eficaz, o que produz descontinuidades na matriz e favorece o processo de fratura.

Acerca da rigidez dos compósitos, a introdução natural do material de reforço provoca a restrição do movimento das cadeias poliméricas, tornando-o mais quebradiço. De maneira geral, é possível concluir que, embora essa incorporação tenha tornado o material mais rígido, reduziu sua resistência mecânica e elasticidade.

4.8 RESULTADOS TERMOHIDRODINÂMICOS COM MICROTROCADORES DE CALOR DESENVOLVIDOS

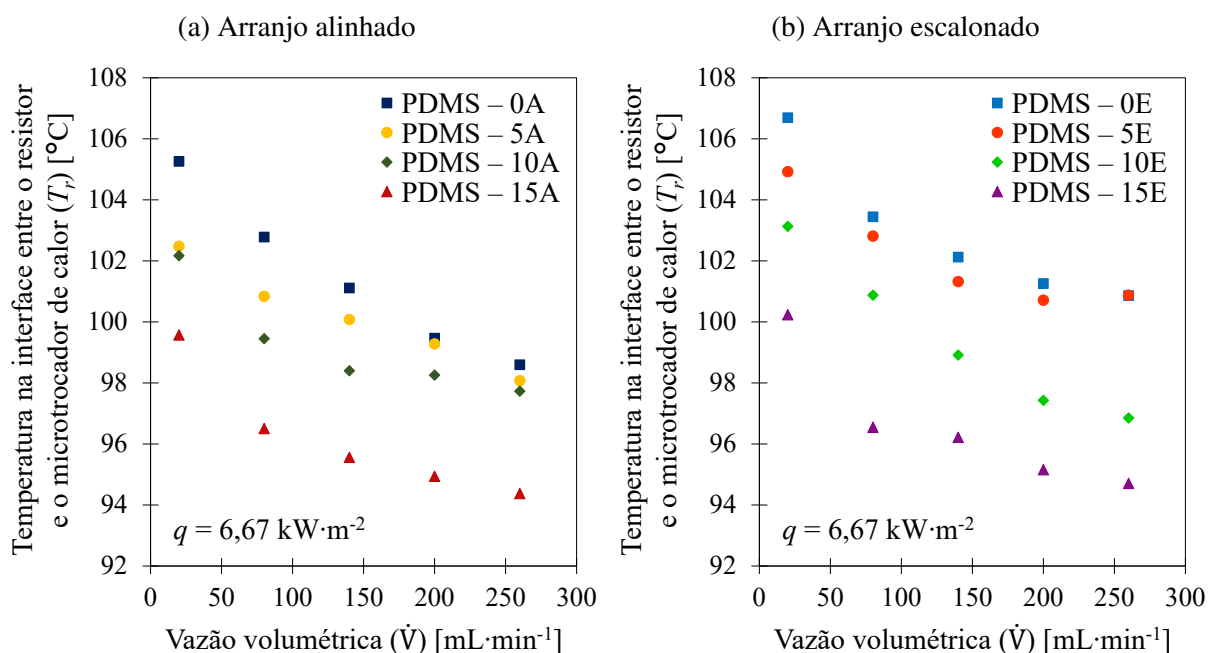
Esta seção reúne os resultados termohidrodinâmicos obtidos por meio da metodologia anteriormente descrita para os microtrocares de calor desenvolvidos. Dessa forma, ela é subdividida com o objetivo de apresentar análises completas acerca das temperaturas monitoradas e da queda de pressão no dispositivo térmico.

4.8.1 Temperaturas

4.8.1.1 Temperatura na interface entre o resistor e o microtrocares de calor (T_r)

Para iniciar a análise térmica, optou-se por apresentar os resultados obtidos para a temperatura na interface entre o microtrocares de calor desenvolvido e o resistor elétrico de aquecimento (T_r), em [°C]. A avaliação dessa temperatura fornece bons indícios da viabilidade do projeto, pois representa a condição que será encontrada no dispositivo que necessitará realizar o gerenciamento térmico. Tendo isso em vista, a Figura 115 apresenta os resultados obtidos em função da vazão, destacando os diferentes compósitos e os arranjos projetados – alinhado (Figura 115a) e escalonado (Figura 115b) – para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Figura 115 – Comparação da temperatura na interface (T_r) para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

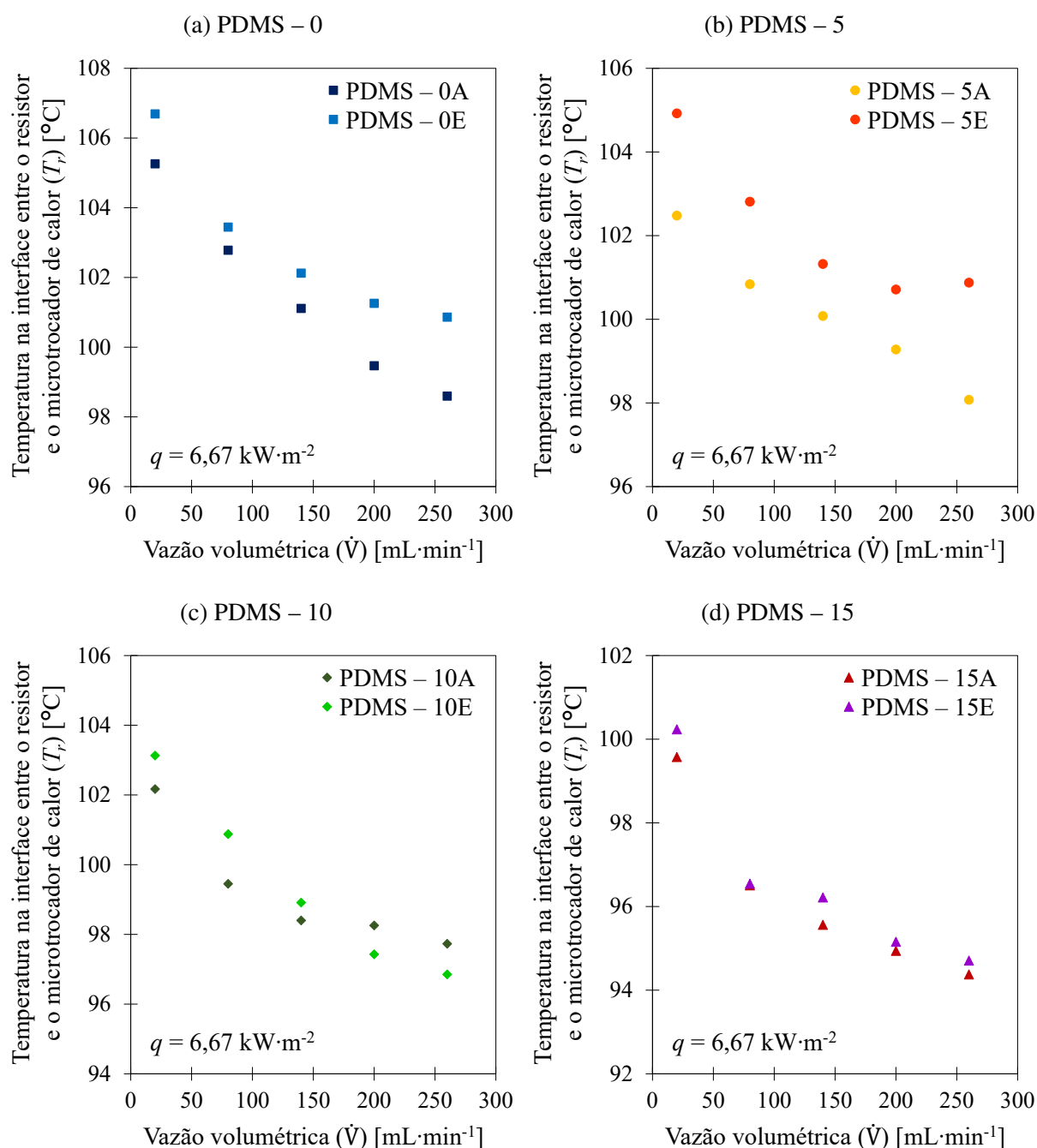
Em relação ao conjunto de microtrocadores de calor do arranjo alinhado para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, a análise dos resultados térmicos indica um comportamento exponencialmente decrescente da temperatura na interface entre o dispositivo e o resistor elétrico (T_r) à medida que a vazão é aumentada, sugerindo maior transferência de calor para o fluido de trabalho nesses casos. Também é possível constatar uma redução desse valor proporcional ao acréscimo de nanopartículas de caráter metálico na matriz polimérica. Ou seja, o microtrocador de calor PDMS – 15A apresentou, em todas as vazões, uma temperatura média $5,25^{\circ}\text{C}$ inferior à observada no PDMS – 0A, enquanto o PDMS – 5A e o PDMS – 10A posicionaram-se de forma intermediária e ordenada entre os extremos. Vale ressaltar que, em algumas situações, as temperaturas entre os microtrocadores de calor para uma mesma vazão ficaram muito próximas – como no caso de PDMS – 5A e PDMS – 10A, na vazão de $20 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, e de PDMS – 0A e PDMS – 5A, na vazão de $200 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. Sendo assim, esses valores permaneceram fora – ainda que minimamente – ou muito próximo das incertezas de medição dos termopares. Esse comportamento corrobora a proposta do projeto, indicando o uso das nanopartículas recuperadas como alternativa sustentável ao descarte inadequado de baterias de íons de lítio para aplicação em dispositivos de gerenciamento térmico.

As respostas obtidas para os microtrocadores de calor com arranjo escalonado seguem as mesmas conclusões discutidas. Entretanto, observa-se preliminarmente que o desempenho desse arranjo é inferior ao do anterior na maioria dos casos, aspecto que será ainda discutido. A exceção ocorre para o PDMS – 5E na vazão volumétrica de $260 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, que apresentou desempenho equivalente ao compósito de PDMS – 0E na mesma vazão, provavelmente devido à presença de alguma bolha de ar que entrou inadvertidamente no sistema, prejudicando os dados

térmicos locais.

Uma segunda abordagem é apresentada na Figura 116, a qual representa os dados anteriores de forma individual e comparativa. Nela, os resultados obtidos para cada arranjo são confrontados em função da vazão volumétrica e do composto desenvolvido, destacando o PDMS – 0 (Figura 116a), o PDMS – 5 (Figura 116b), o PDMS – 10 (Figura 116c) e o PDMS – 15 (Figura 116d).

Figura 116 – Comparação da temperatura na interface (T_r) para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Trazar uma análise comparativa entre os arranjos de micropilares desenvolvidos é essencial nesse tipo de projeto, pois, além de definir qual composto apresenta o melhor desempenho,

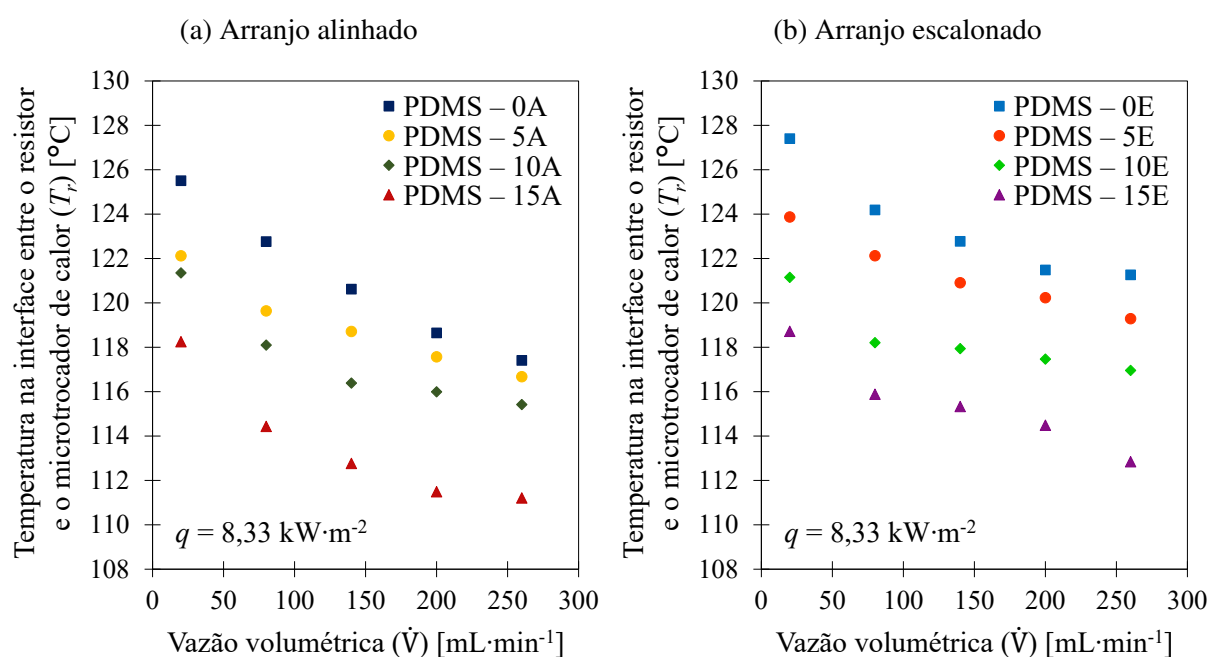
também auxilia na identificação do arranjo mais adequado para a aplicação.

Com base nisso, o arranjo alinhado mostra-se preferível nos microtrocares de calor fabricados com os compósitos PDMS – 0 e PDMS – 5, uma vez que, em todas as vazões volumétricas analisadas, apresenta temperaturas inferiores às observadas nos respectivos arranjos escalonados. Esse mesmo fenômeno ocorre com o compósito PDMS – 15, embora as diferenças sejam bastante sutis – entre 0,04 e 0,66 °C.

Um comportamento curioso ocorre no conjunto fabricado com o compósito PDMS – 10. Nas vazões mais baixas, o arranjo alinhado apresenta melhor desempenho, comportamento que se inverte nas duas últimas vazões. Isso indica que, a partir da vazão de $140 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, a taxa de redução de temperatura se torna menos significativa em relação às vazões anteriores.

A Figura 117 apresenta os resultados obtidos em função da vazão, destacando os diferentes compósitos e os arranjos projetados – alinhado (Figura 117a) e escalonado (Figura 117b) – para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

Figura 117 – Comparação da temperatura na interface (T_r) para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos



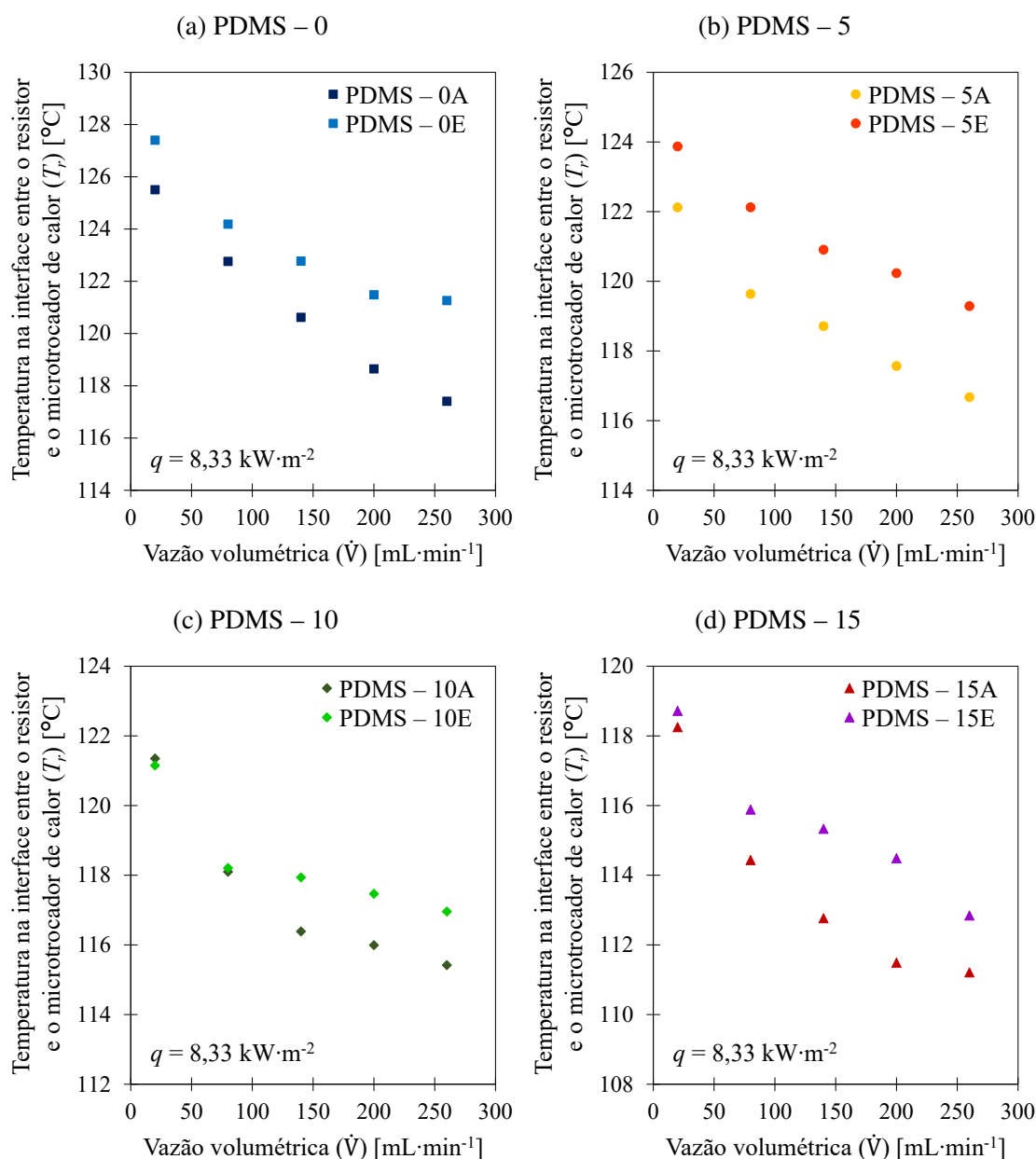
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados obtidos para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ reforçam os comportamentos apresentados para o fluxo anterior, ou seja, observa-se uma redução da temperatura analisada com o aumento da vazão volumétrica, intensificada pelo teor de nanopartículas na matriz polimérica do compósito de fabricação dos microtrocares de calor. Essa avaliação torna ainda mais evidente a predominância do arranjo alinhado em relação ao escalonado no que diz respeito à eficiência na transferência de calor.

Semelhantemente, uma segunda abordagem é apresentada na Figura 118, a qual representa os dados anteriores de forma individual e comparativa. Nela, os resultados obtidos para cada arranjo

são confrontados em função da vazão volumétrica e do compósito desenvolvido, destacando o PDMS – 0 (Figura 118a), o PDMS – 5 (Figura 118b), o PDMS – 10 (Figura 118c) e o PDMS – 15 (Figura 118d).

Figura 118 – Comparação da temperatura na interface (T_r) para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica



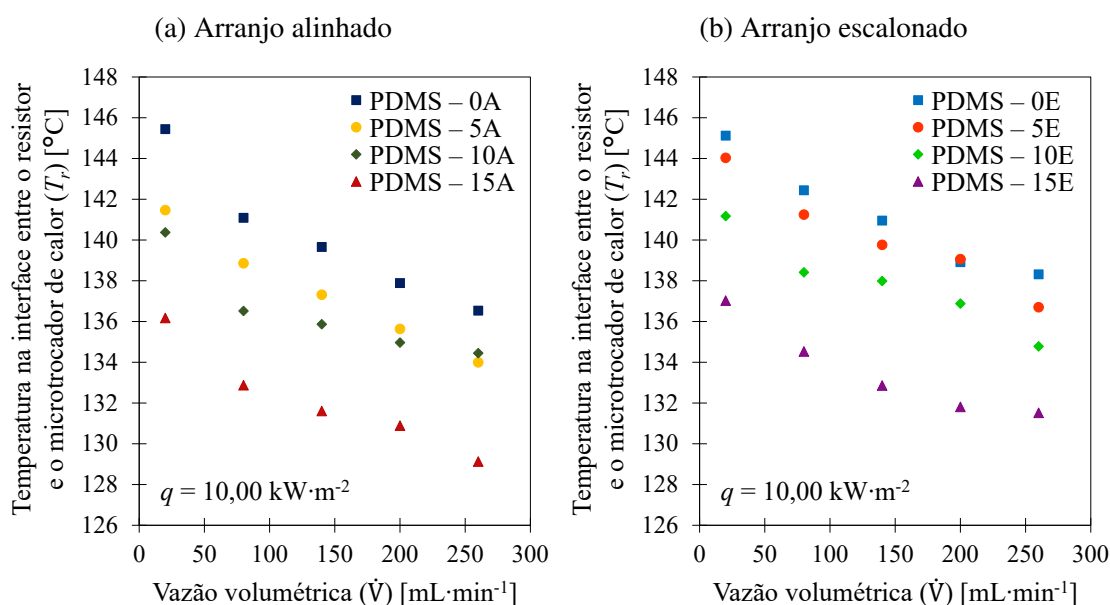
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Seguindo o mesmo comportamento observado para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, o arranjo alinhado apresenta melhor desempenho térmico nos compósitos PDMS – 0 e PDMS – 5. No entanto, sob este novo fluxo térmico ($8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$), o compósito PDMS – 10 passa a apresentar predomínio do arranjo alinhado em praticamente todas as vazões volumétricas. Apesar de o arranjo escalonado apresentar ligeira vantagem na primeira vazão, o alinhado torna-se superior a partir da segunda vazão, inicialmente de forma sutil (quase desprezível), mas evoluindo para

uma diferença consistente nas vazões subsequentes. Por fim, para o compósito PDMS – 15, o comportamento difere daquele observado no fluxo térmico anterior. Neste caso, o arranjo alinhado demonstrou uma superioridade nas vazões volumétricas avaliadas – entre 0,47 e 3 °C.

A Figura 119 apresenta os resultados obtidos em função da vazão, destacando os diferentes compósitos e os arranjos projetados – alinhado (Figura 119a) e escalonado (Figura 119b) – para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Figura 119 – Comparação da temperatura na interface (T_r) para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Até de forma redundante, os resultados obtidos para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ deixam claro que a incorporação de nanopartículas no PDMS mostrou-se benéfica no contexto do gerenciamento térmico. As tendências seguem os mesmos comportamentos descritos anteriormente para outros fluxos de calor, evidenciando a preferência pelo compósito PDMS – 15 em relação ao polímero puro.

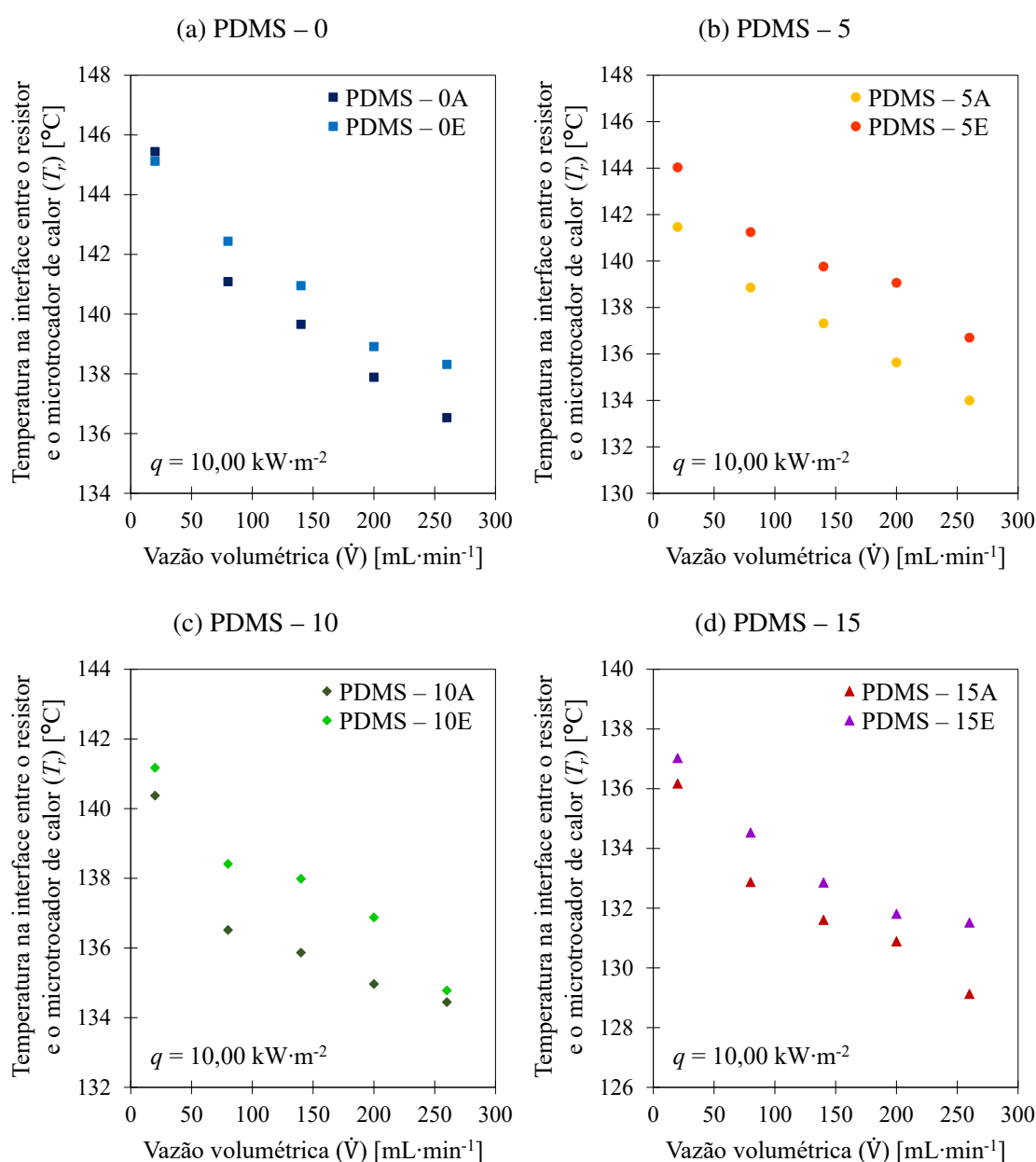
Algumas particularidades desse novo conjunto de dados, como é o caso do PDMS – 10A, reforçam as análises já observadas. Para este microtrocador de calor, a taxa de redução da temperatura na interface com o resistor elétrico decai rapidamente a partir da vazão volumétrica de $80 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, o que, inclusive, prejudica seu desempenho quando comparado ao PDMS – 5A na vazão volumétrica máxima. Embora a discrepância seja bastante sutil – 0,47 °C, destaca-se que o desempenho do microtrocador de calor PDMS – 5A foi superior ao PDMS – 10A na vazão de $260 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$.

Em relação ao conjunto escalonado de microtrocadores de calor, observa-se comportamento semelhante: o desempenho do PDMS – 0E foi ligeiramente superior ao PDMS – 5E na vazão de $200 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. Diferentemente do caso descrito anteriormente, verifica-se que a curva do PDMS – 5E segue de forma consistente até a referida vazão, na qual ocorre um salto pontual,

retornando ao comportamento previsto na vazão máxima. Essa observação sugere que tal reação é localizada e pode estar associada a uma variação do escoamento durante o regime permanente, provavelmente devido à presença não observada de uma bolha de ar.

Semelhantemente, uma segunda abordagem é apresentada na Figura 120, a qual representa os dados anteriores de forma individual e comparativa. Nela, os resultados obtidos para cada arranjo são confrontados em função da vazão volumétrica e do compósito desenvolvido, destacando o PDMS – 0 (Figura 120a), o PDMS – 5 (Figura 120b), o PDMS – 10 (Figura 120c) e o PDMS – 15 (Figura 120d).

Figura 120 – Comparação da temperatura na interface (T_r) para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

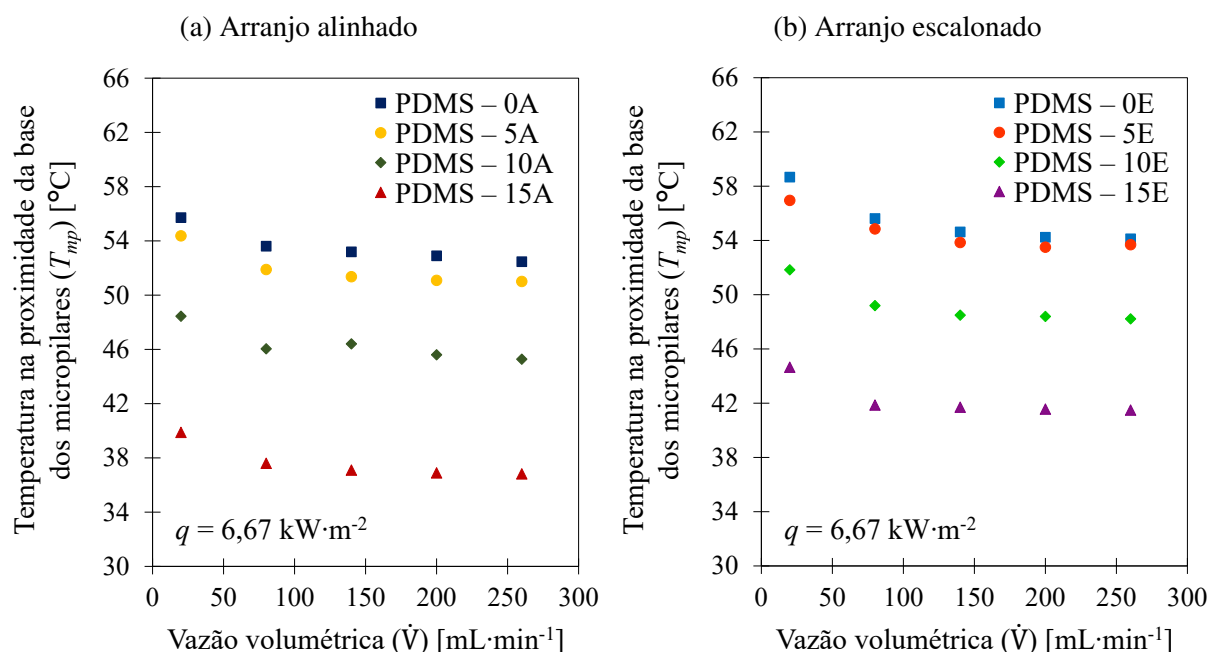
Diferentemente de algumas particularidades observadas nas demais condições de aqueci-

mento, o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ confirma a preferência pelo arranjo alinhado em detrimento do escalonado. Para quase todos os microtrocaadores de calor submetidos a esse fluxo térmico, as temperaturas registradas na interface com o resistor elétrico são inferiores no arranjo alinhado, destacando-se pontos mais sutis – como observado para o PDMS – 0 na vazão de $20 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ (a exceção de todo o conjunto, na qual ocorre a preferência do arranjo escalonado) – e outros mais consistentes, como no caso do PDMS – 15 na vazão de $260 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$.

4.8.1.2 Temperatura na proximidade da base dos micropilares do dispositivo (T_{mp})

Dando seguimento à análise térmica, a partir daqui serão representados os resultados obtidos para a temperatura na proximidade da base dos micropilares dos microtrocaadores de calor desenvolvidos (T_{mp}), em $^{\circ}\text{C}$. Tendo isso em vista, a Figura 121 apresenta os resultados obtidos em função da vazão, destacando os diferentes compósitos e os arranjos projetados – alinhado (Figura 121a) e escalonado (Figura 121b) – para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Figura 121 – Comparação da temperatura na base dos micropilares (T_{mp}) para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos

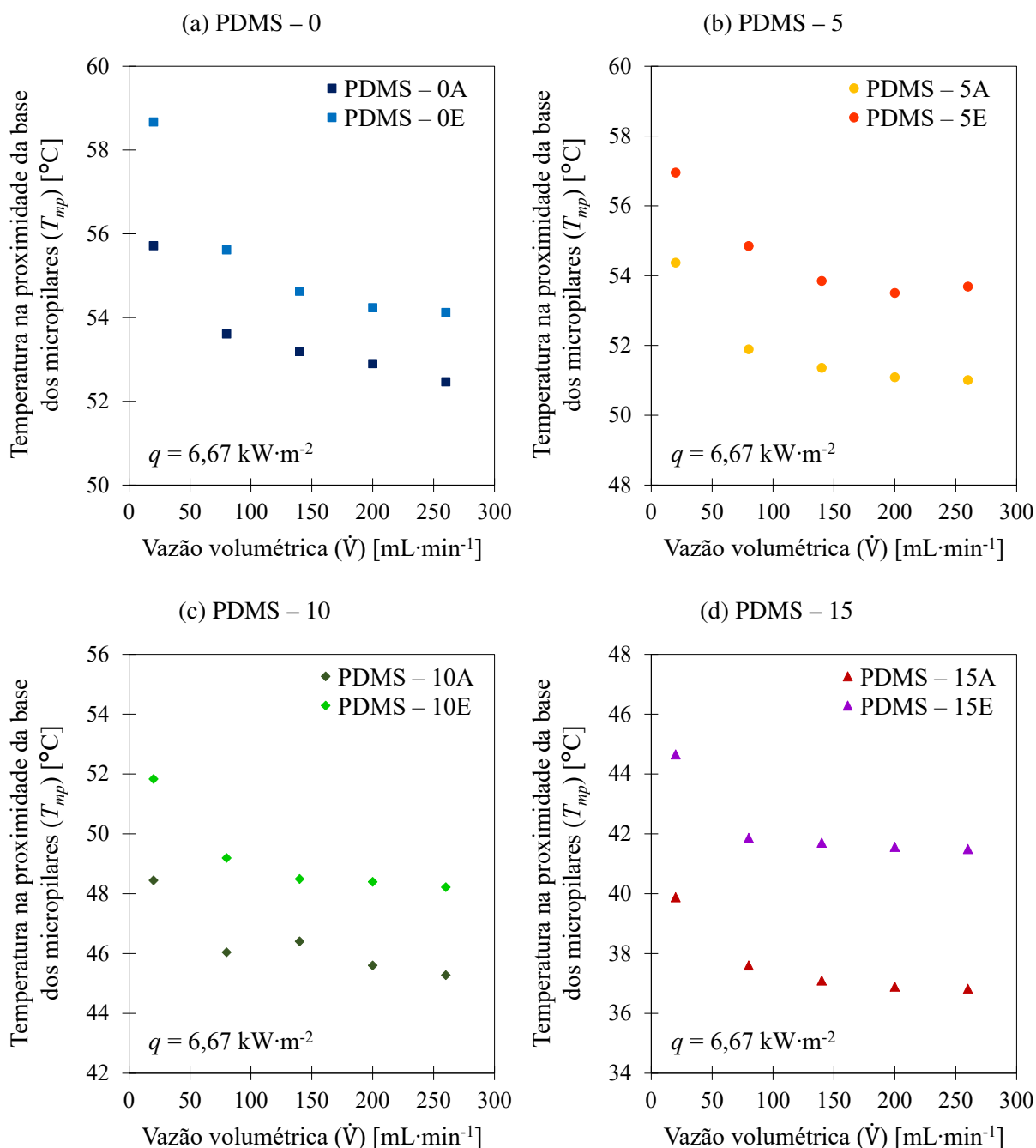


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados obtidos para a análise da temperatura na proximidade da base dos micropilares seguem as mesmas tendências observadas para a temperatura na interface.

Uma segunda abordagem é apresentada na Figura 122, a qual representa os dados anteriores de forma individual e comparativa. Nela, os resultados obtidos para cada arranjo são confrontados em função da vazão volumétrica e do compósito desenvolvido, destacando o PDMS – 0 (Figura 122a), o PDMS – 5 (Figura 122b), o PDMS – 10 (Figura 122c) e o PDMS – 15 (Figura 122d).

Figura 122 – Comparação da temperatura na base dos micropilares (T_{mp}) para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica



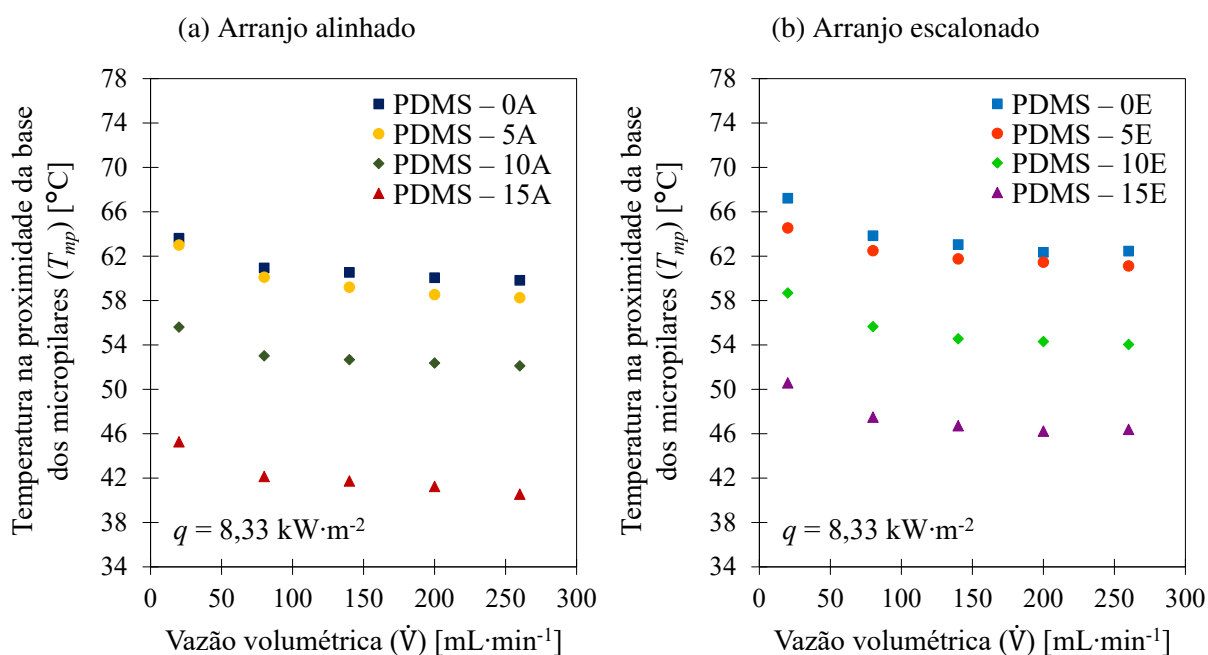
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados obtidos para a análise da temperatura na proximidade da base dos micropilares seguem as mesmas tendências observadas para a temperatura na interface, isto é, redução da temperatura proporcional ao teor de nanopartículas e aumento da vazão volumétrica.

O comportamento ainda dá indícios de que o arranjo alinhado supera o escalonado, no qual ocorre uma equivalência das temperaturas observadas para o PDMS – 0E e PDMS – 5E na vazão volumétrica de $260 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, consoante ao que foi observado para o caso da temperatura na interface do microtrocador de calor com o resistor elétrico.

A Figura 123 apresenta os resultados obtidos em função da vazão, destacando os diferentes compósitos e os arranjos projetados – alinhado (Figura 123a) e escalonado (Figura 123b) – para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

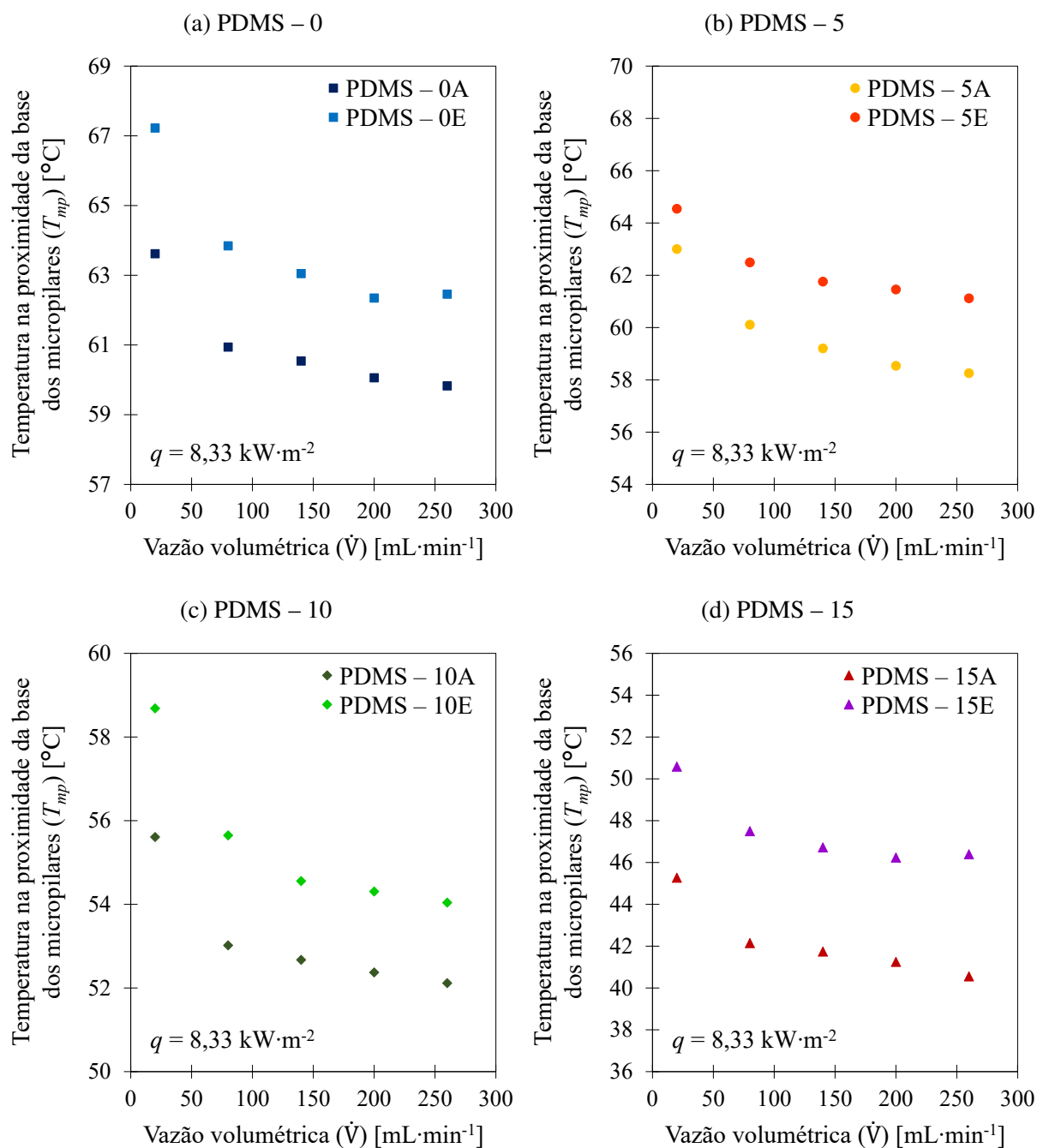
Figura 123 – Comparação da temperatura na base dos micropilares (T_{mp}) para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Semelhantemente, uma segunda abordagem é apresentada na Figura 124, a qual representa os dados anteriores de forma individual e comparativa. Nela, os resultados obtidos para cada arranjo são confrontados em função da vazão volumétrica e do compósito desenvolvido, destacando o PDMS – 0 (Figura 124a), o PDMS – 5 (Figura 124b), o PDMS – 10 (Figura 124c) e o PDMS – 15 (Figura 124d).

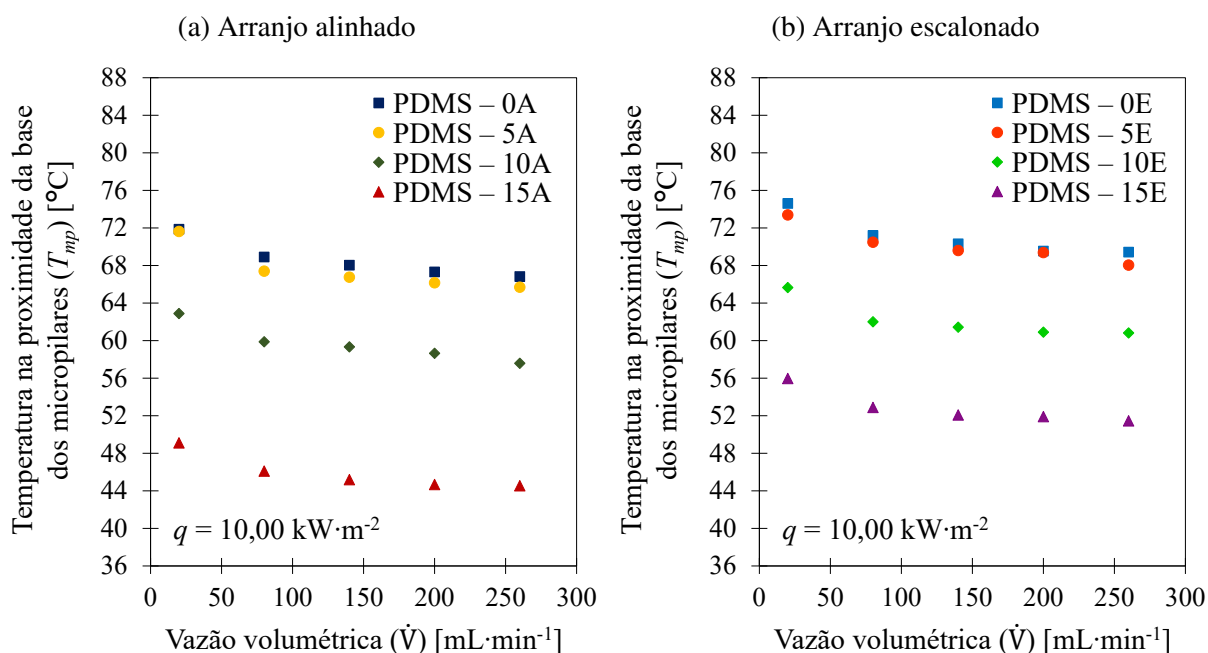
Figura 124 – Comparação da temperatura na base dos micropilares (T_{mp}) para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 125 apresenta os resultados obtidos em função da vazão, destacando os diferentes compósitos e os arranjos projetados – alinhado (Figura 125a) e escalonado (Figura 125b) – para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Figura 125 – Comparação da temperatura na base dos micropilares (T_{mp}) para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos

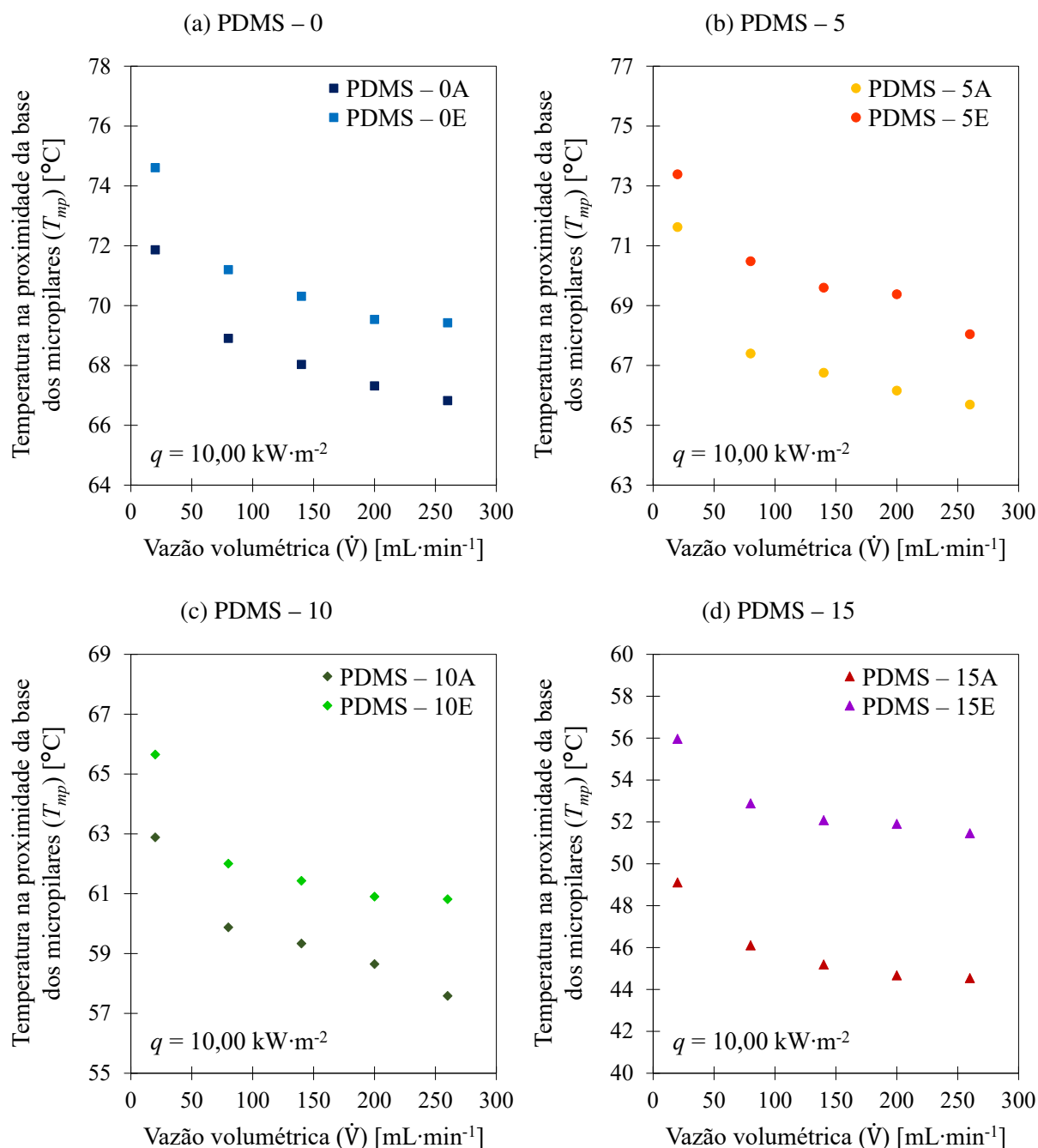


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Exceto pelo comportamento comum, no caso do microtrocador de calor PDMS – 5E para a vazão volumétrica de $200 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ existe uma equivalência com o PDMS – 0E, perfil que também foi observado para a temperatura da interface, apresentada anteriormente.

Uma segunda abordagem é apresentada na Figura 126, a qual representa os dados anteriores de forma individual e comparativa. Nela, os resultados obtidos para cada arranjo são confrontados em função da vazão volumétrica e do compósito desenvolvido, destacando o PDMS – 0 (Figura 126a), o PDMS – 5 (Figura 126b), o PDMS – 10 (Figura 126c) e o PDMS – 15 (Figura 126d).

Figura 126 – Comparação da temperatura na base dos micropilares (T_{mp}) para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados obtidos para a análise da temperatura na proximidade da base dos micropilares seguem as mesmas tendências observadas para a temperatura na interface. A caracterização térmica dos compósitos evidenciou o aumento da condutividade térmica proporcional ao teor de nanopartículas incorporadas à matriz polimérica, tornando o PDMS, um material termicamente isolante, relativamente mais condutor. Essa melhoria das propriedades é refletida nos resultados termohidrodinâmicos coletados.

Embora a medição da condutividade térmica tenha deixado claro o aumento do parâmetro, as

imagens microscópicas trazem à tona fenômenos de agregação e aglomeração das nanopartículas na matriz polimérica, o que cria um cenário anisotrópico nos compósitos. Essa observação ajuda a compreender o comportamento tão definido e contrastante do PDMS – 15 em comparação com o seu adjacente, PDMS – 10, por exemplo, para o caso da temperatura na proximidade da base dos micropilares.

Revendo os métodos de fabricação dos microtrocares de calor, constatou-se a sedimentação das nanopartículas na matriz polimérica devido à densidade desse nanomaterial. Esse fenômeno era dificilmente solucionado, pois, após a homogeneização da mistura, o composto era levado ao dessecador a vácuo, onde o tempo que permanecia lá era suficiente para a decantação. Se, posteriormente a esse processo, fosse realizada uma nova homogeneização, bolhas de ar adentrariam no composto, o que significaria que ele deveria retornar à desgaseificação, onde todo o fenômeno tornava a ocorrer.

Inadvertidamente, isso foi percebido de forma tardia no caso do compósito de PDMS – 15, onde era mais evidente. Outro efeito apenas percebido posteriormente foi o vertimento dessa porção inferior do composto, mais densamente carregada, das bordas para o centro da região microaletada, criando regiões localizadas fortemente condutoras. A união desses fenômenos resultou em temperaturas, nas proximidades da base aletada, consistentemente inferiores ao composto adjacente. Por exemplo, para o arranjo alinhado, com fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, a diferença média entre o PDMS – 5A e o PDMS – 0A é de $1,63 \text{ }^{\circ}\text{C}$; entre PDMS – 10A e PDMS – 5A, $5,58 \text{ }^{\circ}\text{C}$; e entre PDMS – 15A e PDMS – 10A, $8,69 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – uma tendência crescente com o aumento do material de preenchimento.

No caso dessa temperatura em especial, isto é, a temperatura na proximidade com a base dos micropilares, fica evidente que a incorporação das nanopartículas obtidas é eficaz na formação de uma rede termicamente condutora de baixa resistência térmica, embora pontual (nas regiões centrais, por exemplo, onde estiveram dispostos os sensores térmicos) e influenciada por aglomeração e agregação do material nanoparticulado. Outro ponto a se destacar é que o termopar responsável por essa medição foi completamente penetrado no microtrocar de calor, aferindo com mais precisão a temperatura, devido à redução de efeitos interfaciais de contato, como é o caso do instalado na interface com o resistor elétrico que, embora tenha consolidado o comportamento, apresentou decaimento térmico mais sutil, provavelmente endossado pela disposição não favorável.

Tendo todas essas proposições em vista, dentro do conjunto de análise, o PDMS – 15 possui maior condutividade térmica, favorecendo a transferência de calor em sua estrutura, o que ocorre com dificuldade no PDMS – 0, por exemplo. Esse efeito, cerceado pelo que foi apresentado, justifica os resultados obtidos para ambas as temperaturas analisadas, isto é, os microtrocares do compósito PDMS – 15 apresentarem temperaturas inferiores aos fabricados com o polímero puro (PDMS – 0), sendo que os compósitos de PDMS – 5 e PDMS – 10 se dispõem ordenadamente dentro desses limites. Dentro desse aspecto, condutividades térmicas superiores facilitam a uniformidade do calor no dispositivo, especialmente na distribuição deste

nos micropilares, que representam a interface entre sólido e fluido.

Esse comportamento, que destaca os compósitos em detrimento do polímero puro no quesito térmico, foi endossado em todas as literaturas relacionadas ao tema e descritas no tópico correspondente desta pesquisa.

A diminuição dessas temperaturas é um fator também observado com o aumento da vazão volumétrica em ambos os casos. Esse fenômeno está associado à convecção, outro processo de transferência de calor presente nessas aplicações.

Esse aumento também contribui para um aquecimento reduzido do fluido ao longo da superfície, intensificando a troca térmica, isto é, o fluido tem maior capacidade de transferir calor no mesmo intervalo de tempo.

Todos esses fenômenos são observados em trabalhos correlatos, que também identificam uma região de estabilização para altas vazões volumétricas, onde esses efeitos se saturam e predomina apenas a condução térmica.

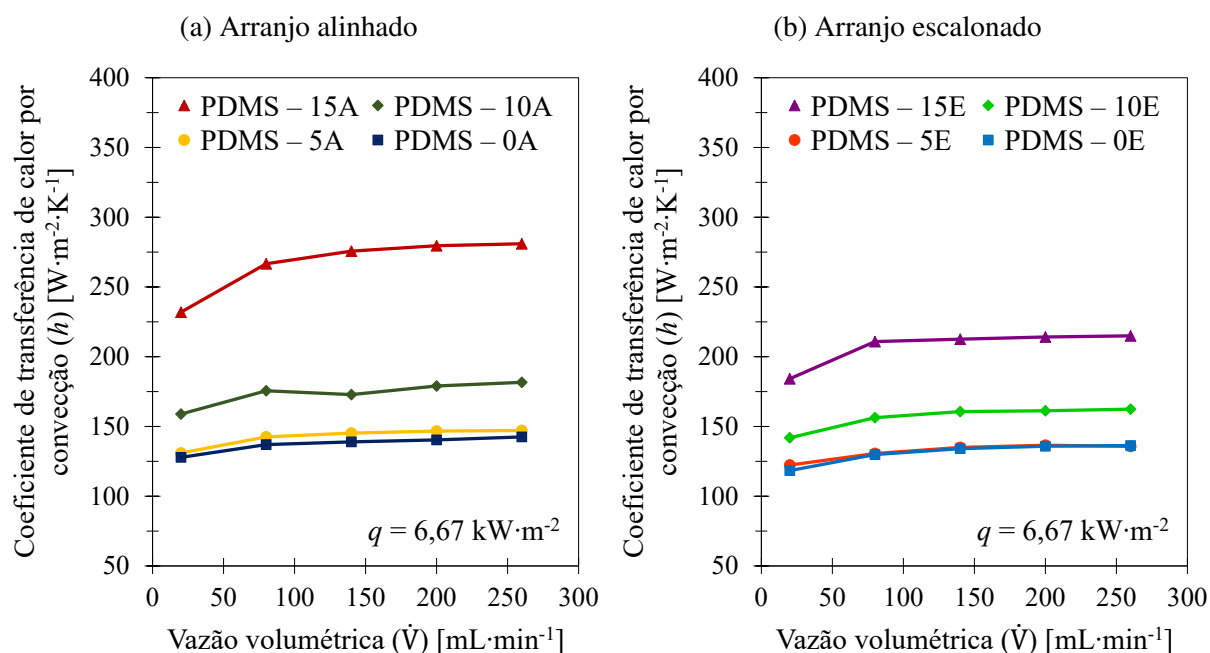
A contribuição do tipo de arranjo dos microtrocares de calor, ou melhor, da qualidade geométrica dos micropilares em cada arranjos, já foi discutida anteriormente e repercute em todas as análises realizadas. Vale ressaltar que o desempenho obtido não decorre de uma ineficiência do arranjo escalonado, mas sim de uma limitação associada à qualidade de fabricação dos seus micropilares. Como consequência dessa condição, a área efetiva de transferência térmica no arranjo escalonado é inferior a obtida no alinhado, que apresenta melhor desempenho, relacionado à maior qualidade e quantidade de microaletas.

4.8.1.3 Coeficiente de transferência de calor por convecção (h)

Para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção (h), referente à troca térmica nos microtrocares de calor, é conveniente aplicar os conceitos já apresentados ao longo desta pesquisa, no capítulo de Metodologia.

A Figura 127 apresenta os resultados obtidos para o coeficiente de transferência de calor por convecção nos microtrocares de calor (h) em função da vazão, destacando os diferentes compósitos e os arranjos projetados – alinhado (Figura 127a) e escalonado (Figura 127b) – para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

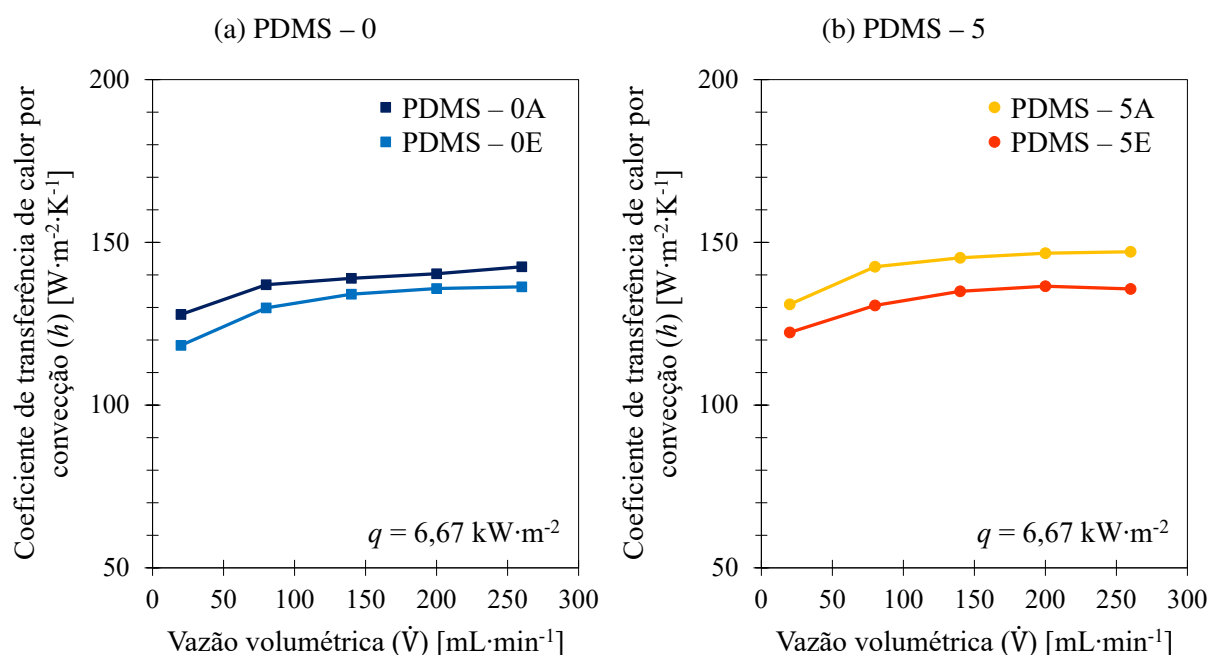
Figura 127 – Comparação do coeficiente de transferência de calor por convecção nos microtrocadores de calor (h) para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos

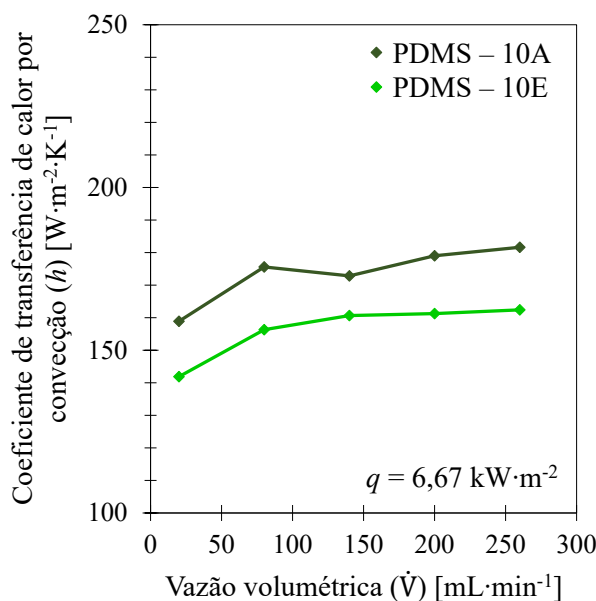


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

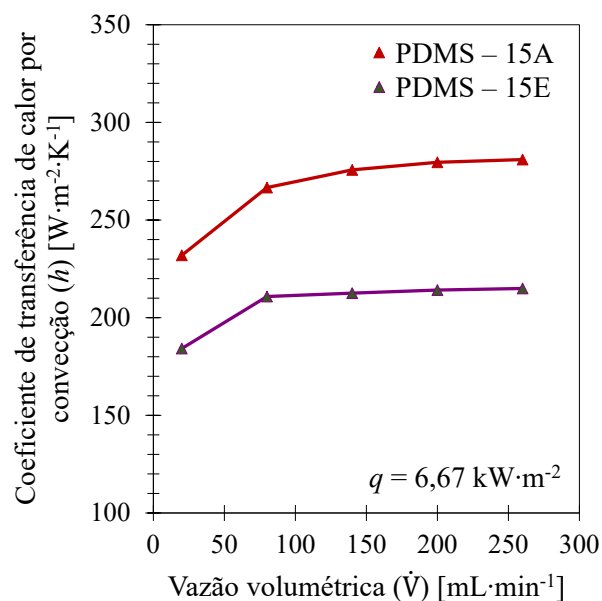
Na Figura 128, os resultados anteriores obtidos para cada arranjo são confrontados em função da vazão volumétrica e do compósito desenvolvido, destacando o PDMS – 0 (Figura 128a), o PDMS – 5 (Figura 128b), o PDMS – 10 (Figura 128c) e o PDMS – 15 (Figura 128d).

Figura 128 – Comparação do coeficiente de transferência de calor por convecção nos microtrocadores de calor (h) para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica





(c) PDMS - 10

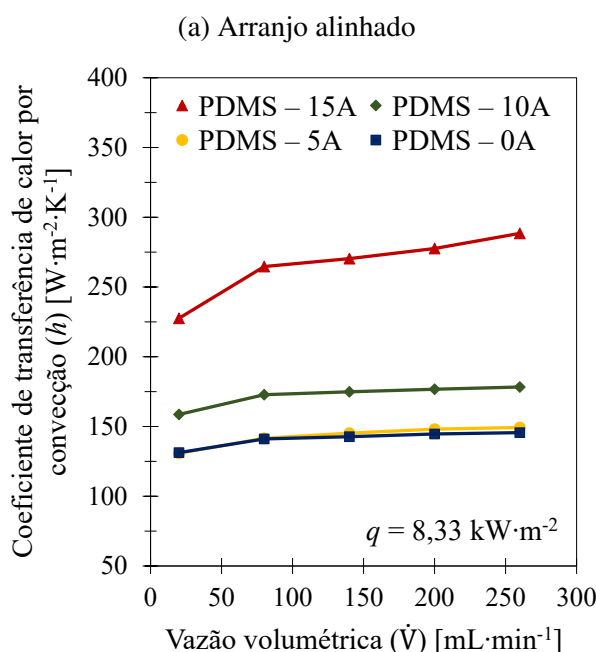


(d) PDMS - 15

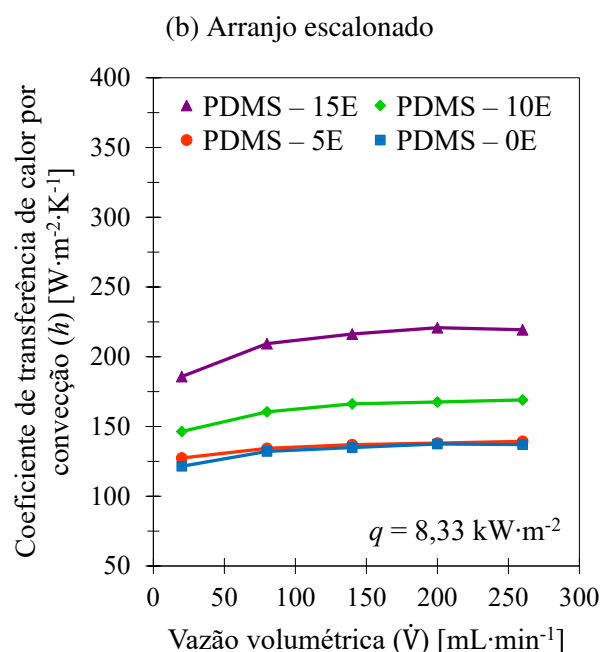
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 129 apresenta os resultados obtidos para o coeficiente de transferência de calor por convecção nos microtrocares de calor (h) em função da vazão, destacando os diferentes compósitos e os arranjos projetados – alinhado (Figura 129a) e escalonado (Figura 129b) – para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Figura 129 – Comparação do coeficiente de transferência de calor por convecção nos microtrocares de calor (h) para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos



(a) Arranjo alinhado



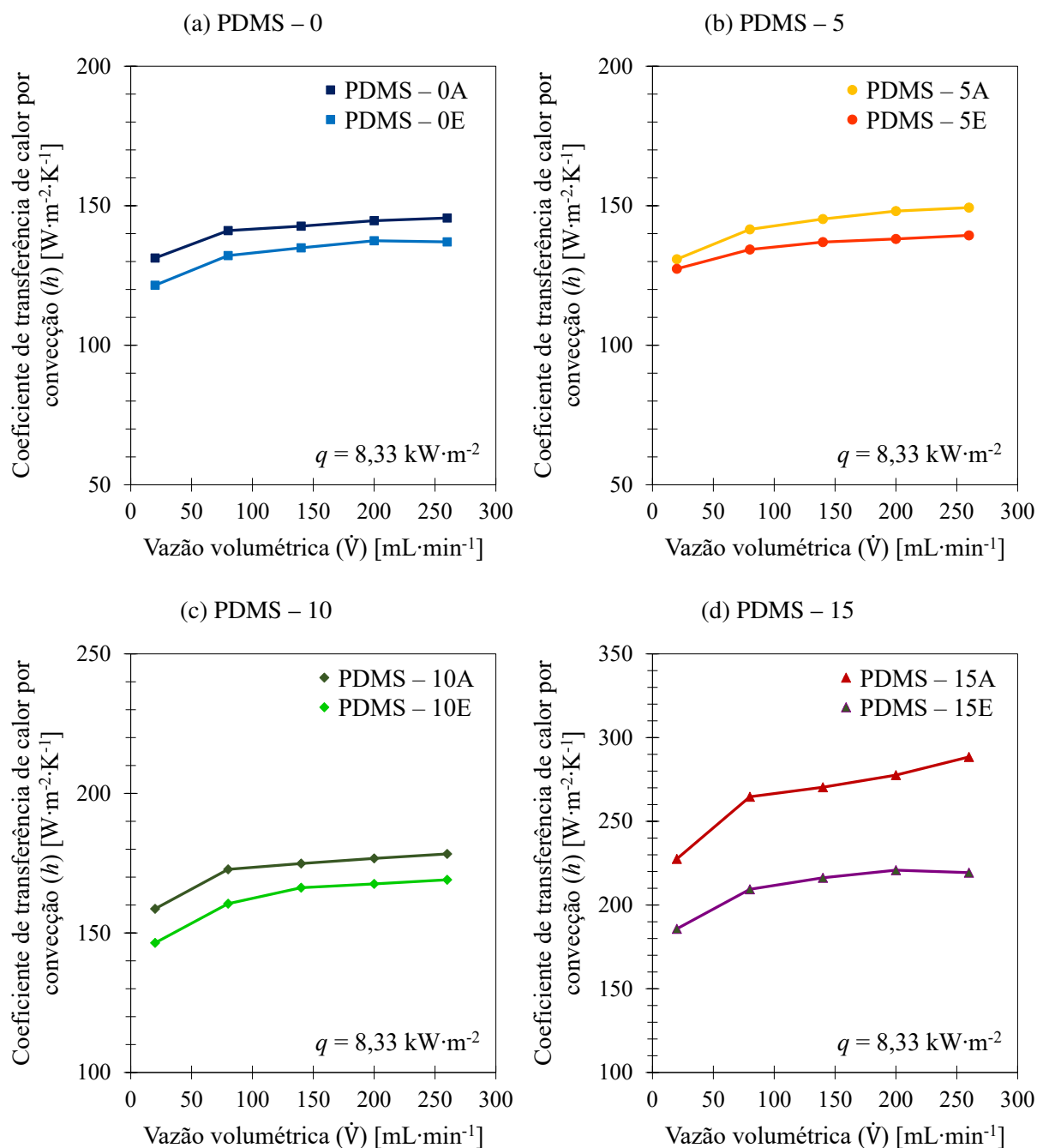
(b) Arranjo escalonado

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na Figura 130, os resultados anteriores obtidos para cada arranjo são confrontados em função

da vazão volumétrica e do compósito desenvolvido, destacando o PDMS – 0 (Figura 130a), o PDMS – 5 (Figura 130b), o PDMS – 10 (Figura 130c) e o PDMS – 15 (Figura 130d).

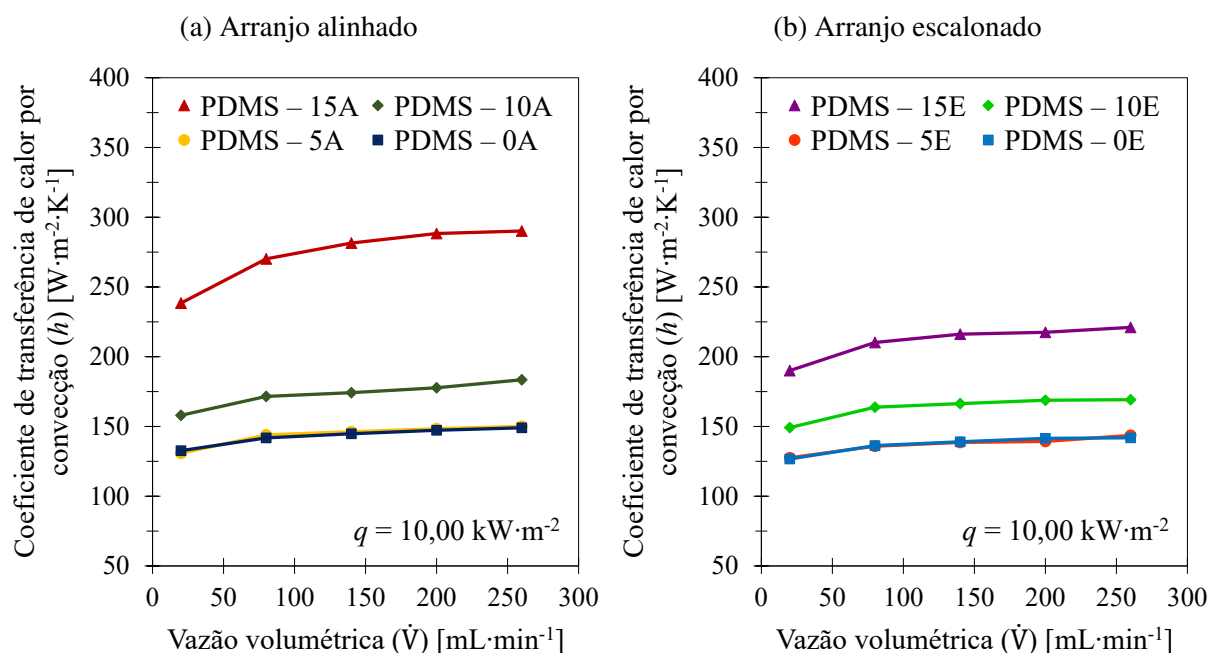
Figura 130 – Comparação do coeficiente de transferência de calor por convecção nos microtrocaadores de calor (h) para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 131 apresenta os resultados obtidos para o coeficiente de transferência de calor por convecção nos microtrocaadores de calor (h) em função da vazão, destacando os diferentes compósitos e os arranjos projetados – alinhado (Figura 131a) e escalonado (Figura 131b) – para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

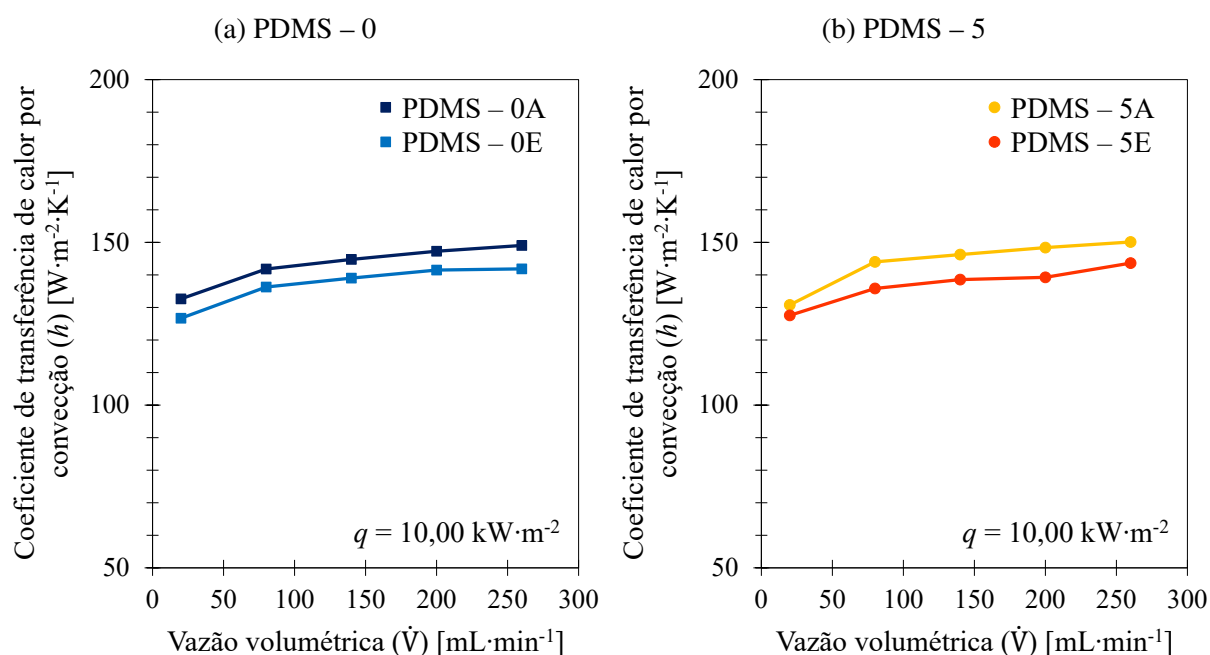
Figura 131 – Comparação do coeficiente de transferência de calor por convecção nos microtrocares de calor (h) para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos

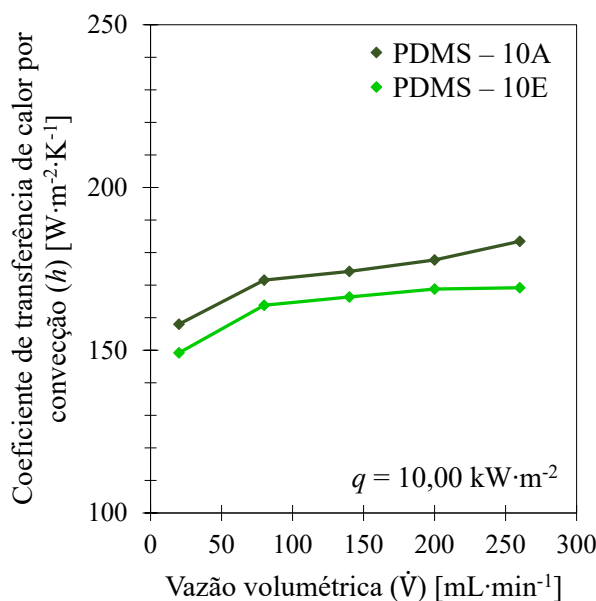


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

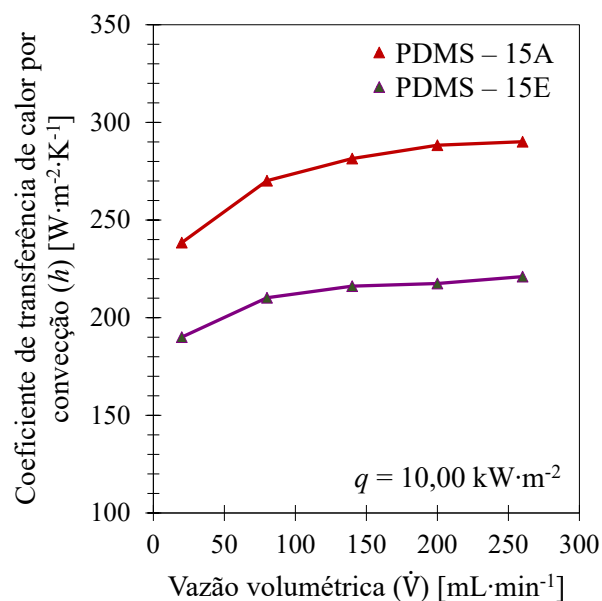
Na Figura 132, os resultados anteriores obtidos para cada arranjo são confrontados em função da vazão volumétrica e do compósito desenvolvido, destacando o PDMS – 0 (Figura 132a), o PDMS – 5 (Figura 132b), o PDMS – 10 (Figura 132c) e o PDMS – 15 (Figura 132d).

Figura 132 – Comparação do coeficiente de transferência de calor por convecção nos microtrocares de calor (h) para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica





(c) PDMS - 10



(d) PDMS - 15

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados obtidos para esse parâmetro térmico mostraram-se de maneira tão consistente que possibilitam uma análise única, a qual fortalece tudo o que foi discutido para o caso das temperaturas.

Em todos os casos, é possível observar um comportamento crescente do coeficiente de transferência de calor por convecção à medida que é aumentada a vazão volumétrica de escoamento. Esse efeito ocorre devido ao aumento da velocidade média do fluido, ao afinamento da camada limite térmica junto às paredes e à renovação do fluido na superfície, responsáveis por intensificar a transferência de calor, conforme mencionado anteriormente.

Embora o fenômeno da convecção não dependa diretamente da condutividade térmica do sólido, mas sim das condições do escoamento – entre elas, as propriedades do fluido e o próprio regime de escoamento – observou-se que a incorporação de nanopartículas de caráter metálico na matriz polimérica de fabricação dos microtrocares de calor desenvolvidos influenciou diretamente esse parâmetro. Isso é observado pela ordenação dos resultados obtidos, destacando o compósito de PDMS - 15 com os maiores valores de coeficiente de transferência de calor, seguido pelo PDMS - 10, posteriormente pelo PDMS - 5 e, por último, pelo PDMS - 0, correspondente ao compósito de polímero puro. A baixa melhoria de condução térmica observada no PDMS - 5 em comparação com o PDMS - 0 é retratada nessa análise também, pois a diferença entre esses conjuntos é bastante sutil, sinalizando alguns pontos em que o compósito puro apresenta coeficiente levemente superior ao incorporado com 5% de nanopartículas, sob as mesmas condições.

A justificativa mais provável para esses resultados reside no cálculo experimental do coeficiente de transferência de calor, que utiliza parâmetros como a taxa de calor transferida e a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido. O aumento da condutividade térmica dos compósitos, provocado pelo material de preenchimento, favoreceu a condução de calor através

das paredes dos microtrocaadores, o que contribuiu para a redução da resistência térmica do sólido e, especialmente, entre a base dos micropilares e a interface sólido-fluido, promovendo uma distribuição mais uniforme de temperatura nessa interface.

De forma semelhante, o arranjo alinhado predominou em todos os casos, reforçando o contexto já apresentado. Essa superioridade é bastante similar nos conjuntos de PDMS – 0, PDMS – 5 e PDMS – 10, tornando-se bastante evidente no conjunto de maior condutividade térmica.

4.8.2 Análise da queda de pressão nos microtrocaadores de calor (Δp_{mt})

O gargalo mais expressivo desta pesquisa diz respeito aos instrumentos utilizados e à medição da queda de pressão, pois a ampla faixa de operação e a incerteza dos transdutores de pressão empregados, aliadas aos baixos valores coletados, criaram um cenário no qual a queda de pressão observada para a maioria das vazões volumétricas testadas se encontrava dentro das incertezas de medição das vazões adjacentes.

Sendo assim, antes de os resultados serem apresentados, é possível prever que flutuações na medição comprometam as medidas, bem como dificultem análises mais pontuais.

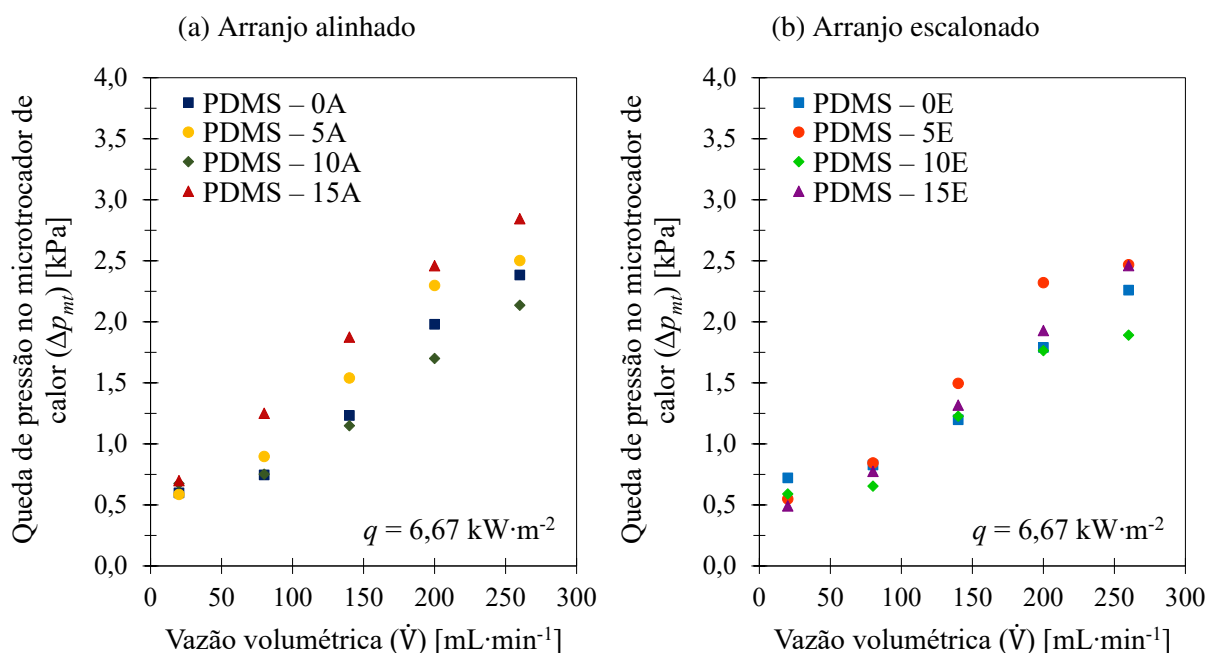
O segundo gargalo está relacionado à qualidade geométrica dos micropilares dos microtrocaadores de calor desenvolvidos, um parâmetro presente em todas as análises relacionadas à queda de pressão a seguir descritas. As análises microscópicas desses micropilares permitiram observar uma superioridade geométrica e estrutural dos micropilares dispostos no arranjo alinhado, em detrimento do escalonado, possivelmente em razão da limitação geométrica da impressora 3D de resina fotopolimerizável em construir geometrias de dimensões milimétricas orientadas a 45° do sentido de impressão.

A olho nu, foi possível verificar que os micropilares do arranjo escalonado tiveram suas dimensões comprometidas pelo método de fabricação, dando à maioria deles o aspecto de uma simples protuberância disposta escalonadamente na superfície microaletada. Essa constatação indica que a queda de pressão nos microtrocaadores de calor munidos desse arranjo será de baixa expressividade, pois o escoamento “sofre” menos ao percorrer uma superfície na qual as estruturas estendidas têm menores dimensões, atrapalhando menos o escoamento.

Por outro lado, os micropilares do arranjo alinhado eram proeminentes à superfície aletada, na qual eram visualmente bem definidos. Esse aspecto favorece uma queda de pressão mais expressiva nesse arranjo, pois representa uma restrição maior ao escoamento.

A Figura 133 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão nos microtrocaadores de calor (Δp_{mt}) em função da vazão, destacando os diferentes compósitos e os arranjos projetados – alinhado (Figura 133a) e escalonado (Figura 133b) – para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

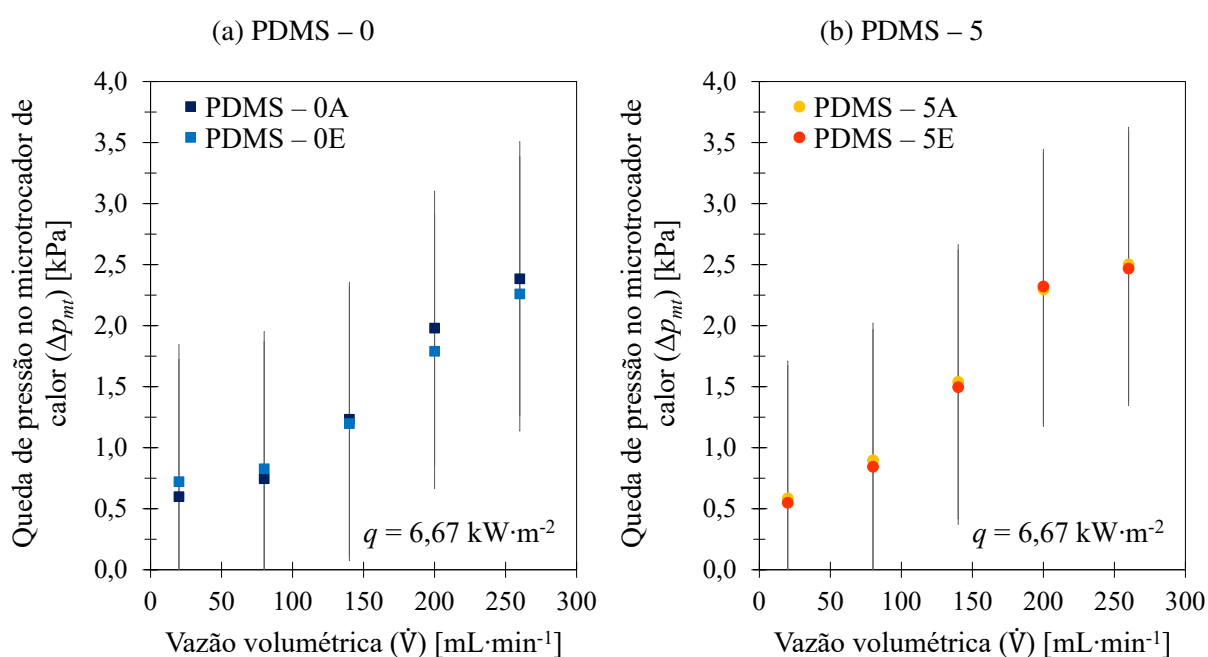
Figura 133 – Comparação da queda de pressão nos microtrocares de calor (Δp_{mt}) para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos

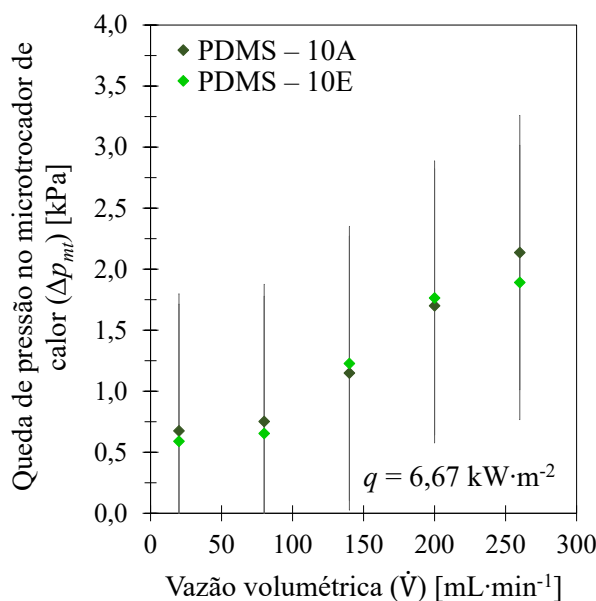


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

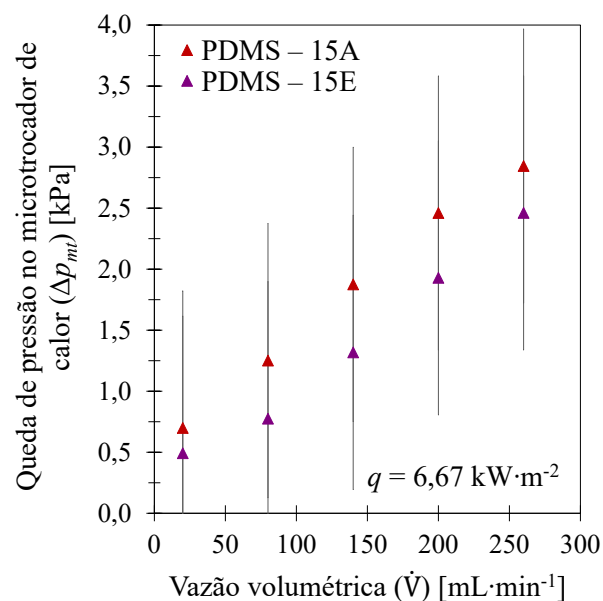
Na Figura 134, os resultados anteriores obtidos para cada arranjo são confrontados em função da vazão volumétrica e do compósito desenvolvido, destacando o PDMS – 0 (Figura 134a), o PDMS – 5 (Figura 134b), o PDMS – 10 (Figura 134c) e o PDMS – 15 (Figura 134d).

Figura 134 – Comparação da queda de pressão nos microtrocares de calor (Δp_{mt}) para o fluxo térmico de $6,67 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica





(c) PDMS - 10

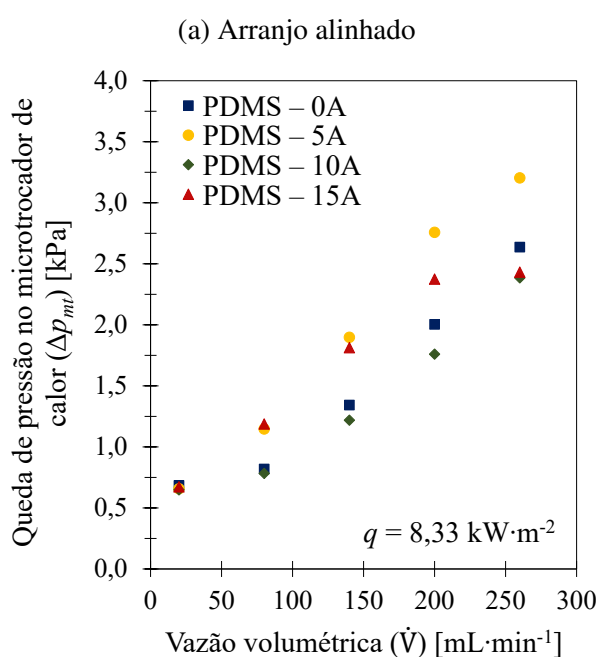


(d) PDMS - 15

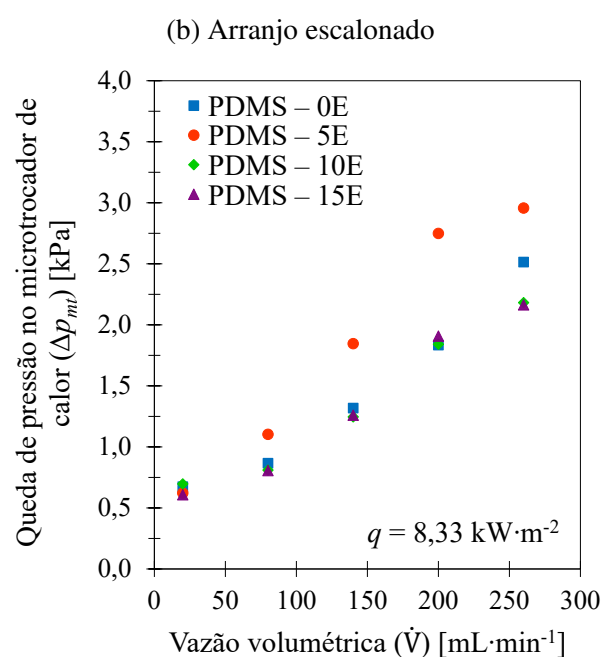
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 135 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão nos microtrocadores de calor (Δp_{mt}) em função da vazão, destacando os diferentes compósitos e os arranjos projetados – alinhado (Figura 135a) e escalonado (Figura 135b) – para o fluxo térmico de 8,33 kW·m⁻².

Figura 135 – Comparação da queda de pressão nos microtrocadores de calor (Δp_{mt}) para o fluxo térmico de 8,33 kW·m⁻² em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos



(a) Arranjo alinhado



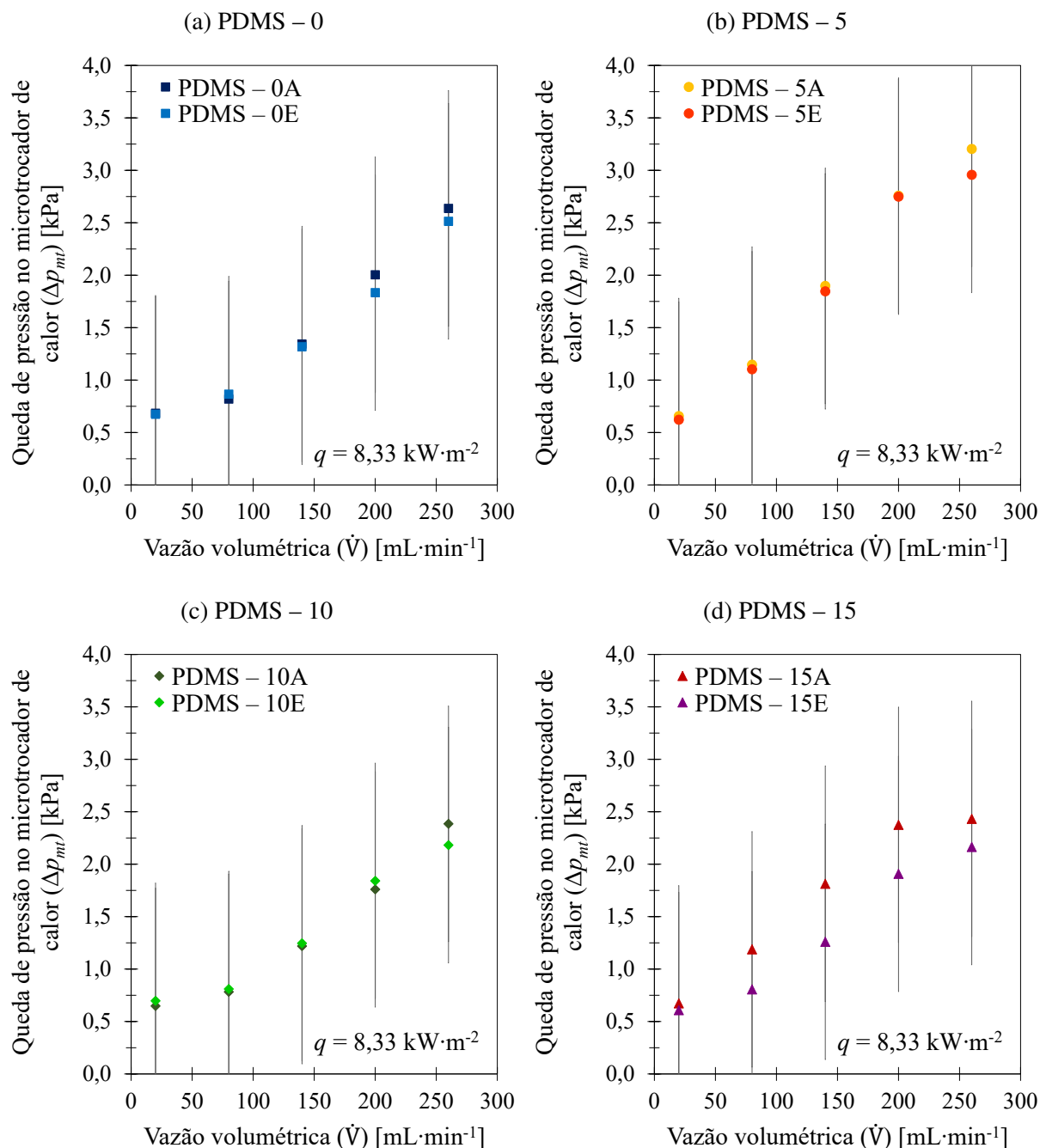
(b) Arranjo escalonado

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na Figura 136, os resultados anteriores obtidos para cada arranjo são confrontados em função da vazão volumétrica e do compósito desenvolvido, destacando o PDMS - 0 (Figura 136a), o

PDMS – 5 (Figura 136b), o PDMS – 10 (Figura 136c) e o PDMS – 15 (Figura 136d).

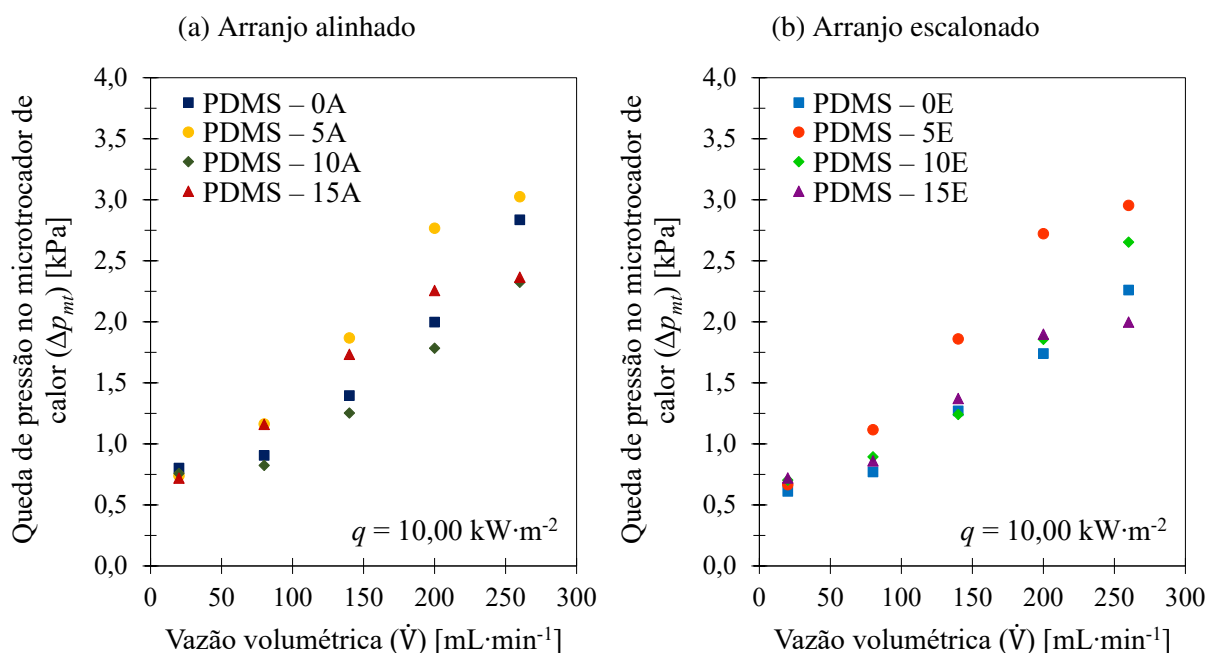
Figura 136 – Comparação da queda de pressão nos microtrocares de calor (Δp_{mt}) para o fluxo térmico de $8,33 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 137 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão nos microtrocares de calor (Δp_{mt}) em função da vazão, destacando os diferentes compósitos e os arranjos projetados – alinhado (Figura 137a) e escalonado (Figura 137b) – para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

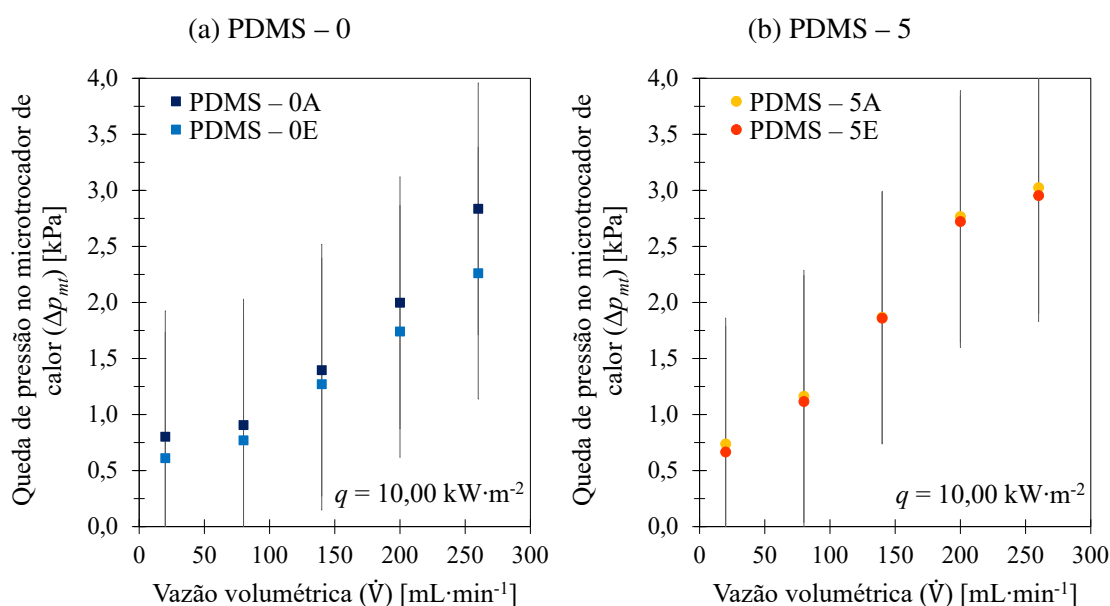
Figura 137 – Comparação da queda de pressão nos microtrocares de calor (Δp_{mt}) para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ em função da vazão volumétrica para os diferentes compósitos desenvolvidos

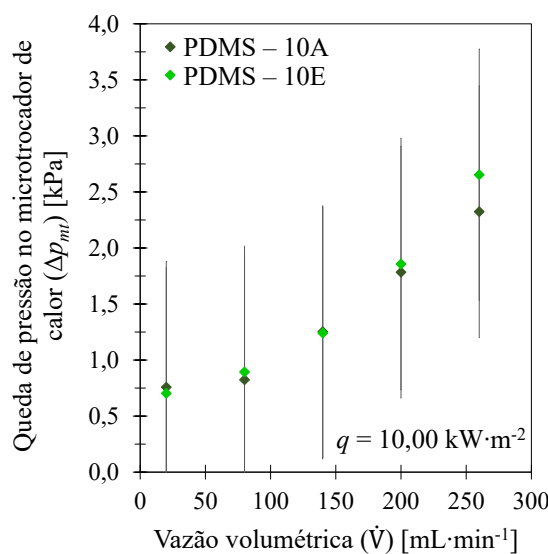


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

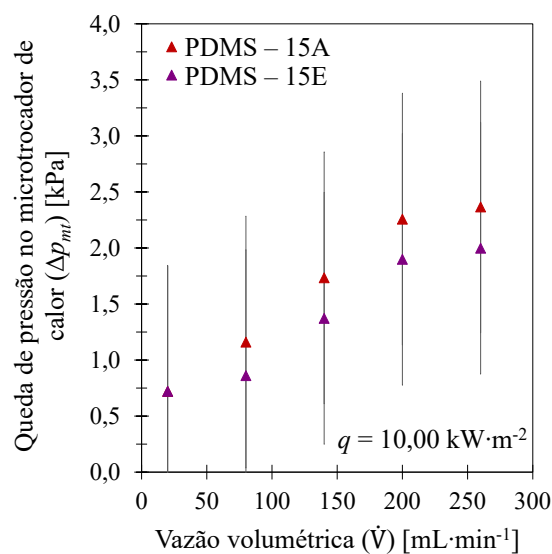
Na Figura 138, os resultados anteriores obtidos para cada arranjo são confrontados em função da vazão volumétrica e do compósito desenvolvido, destacando o PDMS – 0 (Figura 138a), o PDMS – 5 (Figura 138b), o PDMS – 10 (Figura 138c) e o PDMS – 15 (Figura 138d).

Figura 138 – Comparação da queda de pressão nos microtrocares de calor (Δp_{mt}) para o fluxo térmico de $10,00 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ entre os arranjos em função da vazão volumétrica





(c) PDMS - 10



(d) PDMS - 15

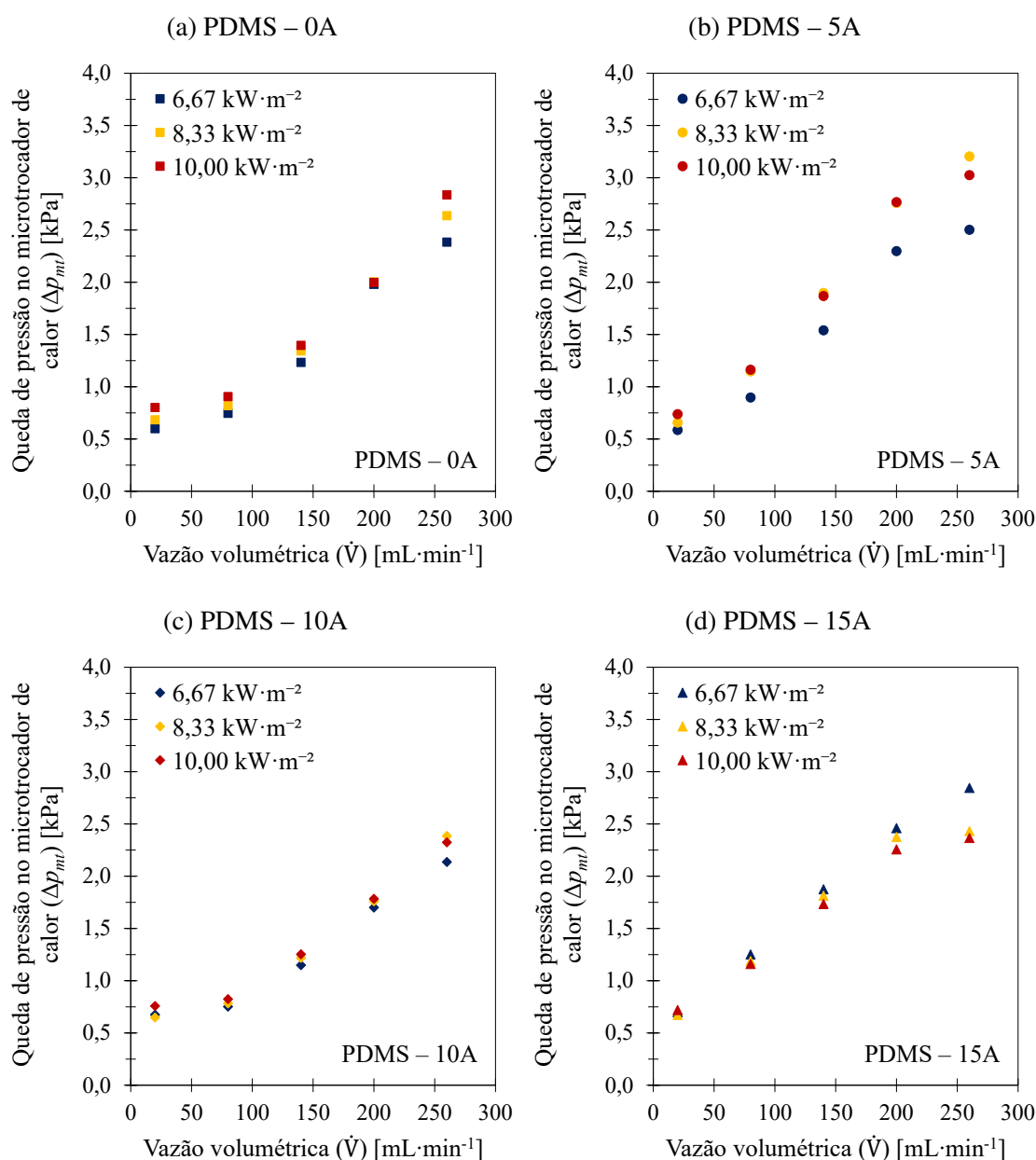
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Dadas as flutuações que eram previstas, de maneira geral, é possível verificar que o conjunto de microtrocadores de calor com disposição alinhada de micropilares apresentou maior queda de pressão associada, independentemente do fluxo de calor aplicado.

As diferenças observadas para os arranjos alinhado e escalonado do compósito PDMS - 15 nos fluxos térmicos, indicam, antes de tudo, que algum efeito geométrico predomina no arranjo escalonado fabricado com esse compósito. A hipótese levantada é que, embora a presença das nanopartículas contribua para a formação de aglomerações que prejudiquem a coesão com a matriz polimérica em ambos os casos, o arranjo escalonado é mais fortemente afetado, devido à combinação com os efeitos negativos do método de fabricação.

É interessante investigar também se os diferentes fluxos térmicos afetam os valores da queda de pressão nos microtrocadores de calor (Δp_{mt}), uma vez que, devido à flexibilidade dos compósitos, alterações na temperatura podem deformar, ainda que minimamente, a estrutura dos dispositivos térmicos, restringindo os canais e influenciando a queda de pressão. Para isso, a Figura 139 apresenta uma perspectiva geral da queda de pressão para cada microtrocador de calor do arranjo alinhado individualmente, em função da vazão volumétrica e do fluxo térmico aplicado. Nesta figura são destacados os microtrocadores: PDMS - 0A (Figura 139a), o PDMS - 5A (Figura 139b), o PDMS - 10A (Figura 139c) e o PDMS - 15A (Figura 139d).

Figura 139 – Comparação da queda de pressão nos microtrocares de calor (Δp_{mt}) entre os diferentes fluxos térmicos para o arranjo alinhado dos microtrocares de calor em função da vazão volumétrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

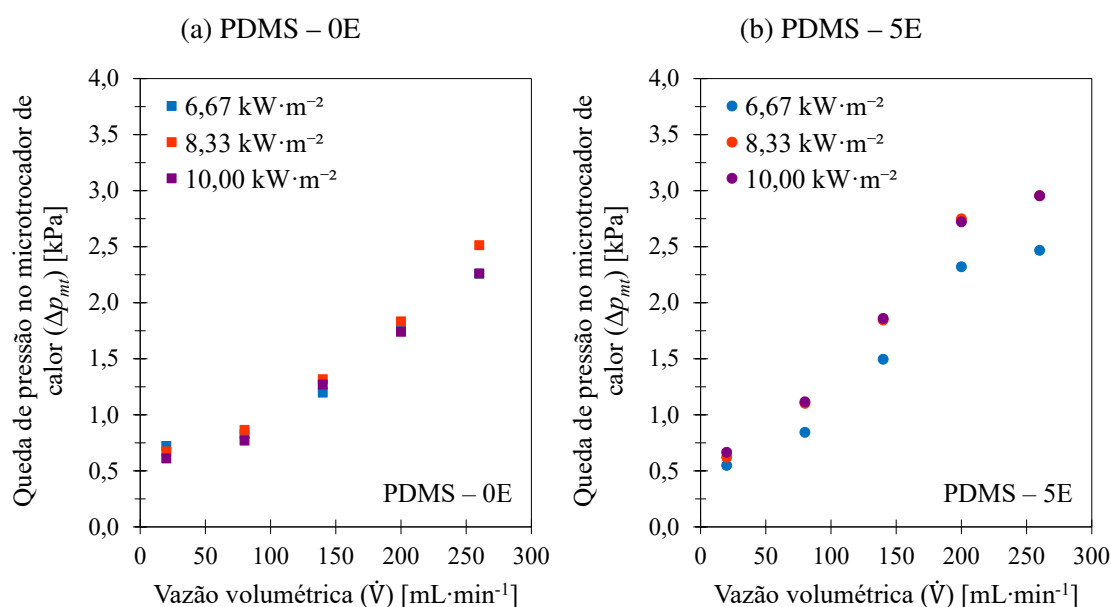
A análise dessa comparação evidencia um efeito secundário previsto para a queda de pressão sob diferentes fluxos térmicos aplicados nos microtrocares de calor. Embora bastante sutil, os microtrocares PDMS – 0A, PDMS – 5A e PDMS – 10A aquecidos com o menor fluxo térmico apresentaram quedas de pressão inferiores às dos demais fluxos, especialmente o de 10,00 kW·m⁻². A única exceção dentro desse conjunto foi o PDMS – 10A sob a vazão volumétrica de 20 mL·min⁻¹, na qual a menor queda de pressão esteve associada ao fluxo térmico intermediário, resultado de uma flutuação da medida. Grande parte desses casos apresentou crescimento da queda de pressão proporcional ao aumento do fluxo térmico, embora de forma bastante sutil.

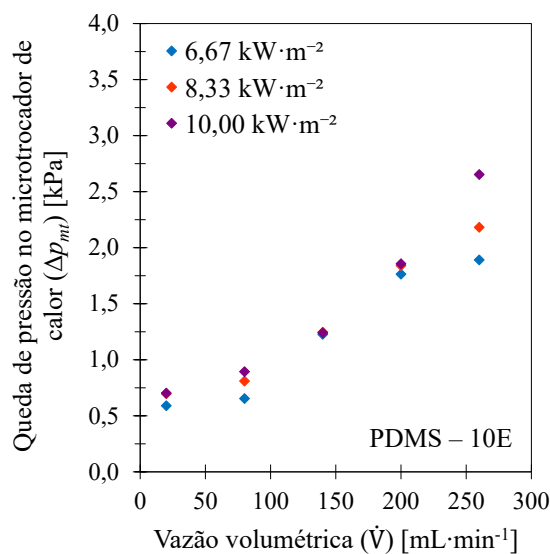
O comportamento do PDMS – 15A, por sua vez, é completamente contrário ao observado para os demais, com menor concentração de material nanoparticulado. Para esse microtrocaador de calor em específico, a maioria das vazões volumétricas aplicadas provoca uma queda de pressão que é inversamente proporcional ao aumento do fluxo térmico. O compósito PDMS – 15 é um caso particular em todos os aspectos, especialmente em razão da formação de aglomerações, que contribuem para a menor hidrofobicidade da superfície e para o aumento da rugosidade superficial da aplicação. Sob esse regime, o escoamento depende diretamente da viscosidade do fluido de trabalho, que diminui com o aumento da temperatura/fluxo térmico, reduzindo o atrito e, conseqüentemente, a queda de pressão.

Embora esse fenômeno não seja predominante nos demais, é possível observar que a variação entre as quedas de pressão diminui entre PDMS – 5A e PDMS – 10A, por exemplo.

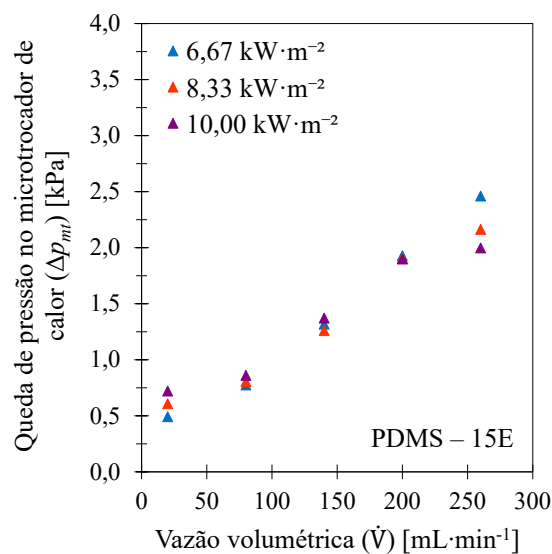
Seguindo o mesmo raciocínio, a Figura 140 apresenta uma perspectiva geral da queda de pressão para cada microtrocaador de calor do arranjo escalonado individualmente, em função da vazão volumétrica e do fluxo térmico aplicado. Nesta figura, são destacados os microtrocaadores: PDMS – 0E (Figura 140a), PDMS – 5E (Figura 140b), PDMS – 10E (Figura 140c) e PDMS – 15E (Figura 140d).

Figura 140 – Comparação da queda de pressão nos microtrocaadores de calor (Δp_{mt}) entre os diferentes fluxos térmicos para o arranjo escalonado dos microtrocaadores de calor em função da vazão volumétrica





(c) PDMS - 10E



(d) PDMS - 15E

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Neste caso, diversos fatores têm contribuído para a formação de um cenário mais difuso que o anterior. Ainda assim, prevalece a maior queda de pressão para o caso de fluxo térmico máximo. No PDMS - 0E, o comportamento é alternado, ora apresentando queda de pressão máxima para o fluxo térmico mínimo, ora para o intermediário. Para o PDMS - 5E, esse comportamento aparece em três dos casos de vazão volumétrica, sendo os outros dois liderados pelo fluxo intermediário em detrimento do mínimo. Mais evidente ainda é o caso do PDMS - 10E, no qual isso ocorre em quatro vazões volumétricas. No PDMS - 15E ocorre fenômeno similar ao PDMS - 15A para as duas últimas vazões, enquanto as três primeiras se assemelham aos demais casos, possivelmente influenciadas pelas características geométricas finais do arranjo escalonado.

5 CONCLUSÕES

Este estudo experimental focou na caracterização de amostras de compósitos de polidimetilsiloxano (PDMS) incorporadas em concentrações de 0%, 5%, 10% e 15% com nanopartículas metálicas obtidas a partir da reciclagem de baterias de íons de lítio em fim de vida útil, destacando sua aplicação no desenvolvimento de microtrocares de calor flexíveis através de experimentos termohidrodinâmicos. Com base na análise de imagens obtidas por meio de técnicas de microscopia e espectroscopia, medições de calor específico e condutividade térmica, análises mecânicas das curvas σ - ε e propriedades fundamentais, avaliação das superfícies, e dos resultados obtidos para os parâmetros termohidrodinâmicos, as seguintes conclusões foram obtidas:

- A análise microscópica das partículas empregadas nesta pesquisa revelou que o processo hidrometalúrgico produziu um material com diferentes tamanhos, o que é marcado pela presença de particulados de escala micrométrica revestidos por uma fase porosa de escala submicrométrica e/ou nanométrica;
- A avaliação espectroscópica dessas partículas revelou a presença de elementos metálicos, como o cobalto, cuja origem é o LiCoO_2 das baterias empregadas;
- Em concentrações mais elevadas, observou-se uma distribuição não homogênea do material nanoparticulado, resultando em regiões de aglomeração potencialmente prejudiciais à integridade estrutural do compósito e à formação de uma rede termicamente condutora eficaz;
- A análise das superfícies microaletadas revelou a redução do ângulo de contato proporcional ao aumento do teor particulado, indicando que o preenchimento compromete a definição geométrica dos micropilares;
- As imagens microscópicas (ETD e vCD) apontaram que a qualidade geométrica dos micropilares do arranjo escalonado foi comprometida pelo molde utilizado nesta pesquisa, fenômeno que interferiu minimamente no caso do arranjo alinhado. Fenômenos de aglomeração foram visíveis nas estruturas;
- O comportamento decrescente do calor específico a pressão constante nas amostras indica alterações benéficas nas propriedades térmicas dos compósitos desenvolvidos com nanopartículas recicladas, proporcionais à sua concentração;
- O aumento significativo na condutividade térmica da amostra PDMS – 15 em comparação com a PDMS – 0 – aproximadamente 67,12% – corrobora sua aplicação em contextos que requerem transferência de calor. No entanto, o valor absoluto relativamente baixo ainda pode representar uma limitação;

- O aparato desenvolvido para medição experimental da condutividade térmica dos compósitos fortaleceu os resultados laboratorialmente obtidos, embora sinalize a necessidade de dispositivos mais confiáveis para o desenvolvimento desse tipo de aparato, pois superestimou os valores em 2,18%, 5,47%, 3,51% e 8,01% em relação aos valores laboratoriais medidos para o PDMS – 0, PDMS – 5, PDMS – 10 e PDMS – 15, respectivamente;
- As amostras de PDMS contendo nanopartículas apresentaram maior rigidez em comparação com o PDMS – 0, conferindo às curvas σ - ϵ um comportamento semelhante ao de materiais frágeis à medida que a concentração aumentava, conforme demonstrado pelo aumento no módulo de elasticidade;
- A resistência mecânica do PDMS foi afetada pela incorporação de nanopartículas, como evidenciado pela redução nos limites de escoamento e de resistência à tração, em razão da formação de descontinuidades na matriz provocadas pela aglomeração do material de preenchimento;
- Os resultados térmicos dos microtrocares de calor desenvolvidos fortaleceram a proposta, revelando um desempenho melhorado proporcional ao teor de material de preenchimento no PDMS;
- O desempenho térmico dos arranjos corrobora as observações anteriores acerca da qualidade geométrica dos micropilares, indicando que as menores temperaturas estiveram relacionadas ao arranjo alinhado, cuja área de troca térmica é superior ao escalonado, devido à quantidade e qualidade dos seus micropilares;
- O parâmetro de transferência de calor investigado – o coeficiente de transferência de calor por convecção (h) – consolida as análises observadas, evidenciando o aumento da transferência térmica proporcional ao teor incorporado e ao aumento da vazão volumétrica;
- Observou-se um comportamento crescente da queda de pressão em função do aumento da vazão volumétrica nos microtrocares de calor, indicando o aumento da resistência ao fluxo da água deionizada; e
- O comportamento da queda de pressão é, mais uma vez, influenciado pelo arranjo. O arranjo alinhado apresentou maiores quedas de pressão, reforçando os aspectos geométricos dos micropilares desse arranjo, que representam uma barreira mais significativa ao escoamento.

5.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Diante das análises realizadas nesta pesquisa, surgem naturalmente outras propostas relevantes, com potencial para promover a sustentabilidade e o aperfeiçoamento das técnicas de transferência e dissipação de calor, entre as quais se destacam:

- Estudar outras tecnologias de reciclagem e reaproveitamento de baterias eletroquímicas ao final de sua vida útil, incluindo processos aplicáveis a baterias primárias e a outros tipos de baterias secundárias;
- Estudar metodologias aplicáveis não apenas ao material catódico, mas também ao material anódico das baterias;
- Avaliar outros processos de fabricação de nanopartículas obtidas a partir de resíduos de baterias;
- Realizar análises e caracterizações individuais do material reciclado obtido;
- Aperfeiçoar os processos de incorporação de materiais de preenchimento em matrizes poliméricas, incluindo sua avaliação em outros polímeros;
- Aperfeiçoar a fabricação e os processos de finalização e acabamento de moldes destinados à produção de microestruturas, garantindo a precisão geométrica requerida, o que inclui o estudo de outros tipos de microtrocaadores e arranjos de micropilares;
- Realizar outras análises das superfícies microaletadas, como estudos de capilaridade;
- Estudar métodos de integração da avaliação térmica em diferentes regiões de microtrocaadores de calor, incluindo a avaliação do fluido de trabalho nos *plenuns*;
- Utilizar equipamentos de medição de pressão mais precisos e compatíveis com a faixa observada, além de considerar os efeitos de contração e expansão nas regiões de *plenum* de microtrocaadores de calor, podendo empregar correlações matemáticas preditivas; e
- Avaliar parâmetros como o número de Nusselt e as correlações matemáticas pertinentes.

REFERÊNCIAS

ABOELAZM, E. A. A. *et al.* Magnetic electrodeposition of the hierarchical cobalt oxide nanostructure from spent lithium-ion batteries: Its application as a supercapacitor electrode. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 122, n. 23, p. 12200–12206, 2018. ISSN 1932-7447. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b03306>. Acesso em: 12 dez. 2025.

ACOSTA-CUEVAS, J. M. *et al.* Surface roughness analysis of microchannels featuring microfluidic devices fabricated by three different materials and methods. **Coatings**, v. 13, n. 10, p. 1676, 2023. ISSN 2079-6412. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/coatings13101676>. Acesso em: 10 jan. 2026.

AL-ASHEH, S. *et al.* Treatment and recycling of spent lithium-based batteries: a review. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 2023. ISSN 1438-4957. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-023-01842-1>. Acesso em: 5 mar. 2026.

ALUGOJU, U. K.; DUBEY, S. K.; JAVED, A. Experimental and numerical investigations of heat transfer and flow characteristics during flow boiling in straight and diverging pdms microchannel. **Journal of Micromechanics and Microengineering: Structures, Devices, and Systems**, v. 33, n. 9, p. 095002, 2023. ISSN 0960-1317. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6439/ace267>. Acesso em: 9 nov. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D638-14**: standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken: ASTM International, 2014. Disponível em: <https://borgoltz.aoe.vt.edu/aoe3054/manual/expt5/D638.38935.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2026.

BAHALOO-HOREH, N.; MOUSAVI, S. M.; BANIASADI, M. Use of adapted metal tolerant aspergillus niger to enhance bioleaching efficiency of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries. **Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 1546–1557, 2018. ISSN 0959-6526. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.299>. Acesso em: 2 out. 2025.

BARK, H. *et al.* Deformable high loading liquid metal nanoparticles composites for thermal energy management. **Advanced Energy Materials**, v. 11, n. 35, p. 2101387, 2021. ISSN 1614-6832. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/aenm.202101387>. Acesso em: 8 out. 2025.

BASF SE. White paper, **Creating a circular value chain with electronic waste in China**: A creator space™ white paper. 2016. Creator Space™ Program.

BERGMAN, T. L. **Incropera - Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. E-book. ISBN 9788521636656.

BORG, G. van der *et al.* Pla 3d printing as a straightforward and versatile fabrication method for pdms molds. **Polymers**, v. 15, n. 6, p. 1498, 2023. ISSN 2073-4360. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/polym15061498>. Acesso em: 26 nov. 2025.

BOTELHO, M. H. C. **Resistência dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2013. E-book, pag. 1. ISBN 9788521207504.

BURZYNSKI, K. M. *et al.* Graphite nanocomposite substrates for improved performance of flexible, high-power algal/gan electronic devices. **ACS Applied Electronic Materials**, v. 3, n. 3, p. 1228–1235, 2021. ISSN 2637-6113. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acsaelm.0c01063>. Acesso em: 6 jan. 2026.

CAI, H. *et al.* Flexible composite heat sink with embedded silver microchannels for potential application in flexible electronics. In: **Electronic Components and Technology Conference**. Gaylord Palms: IEEE, 2024. p. 722–726. ISSN 0569-5503.

CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. Tradução: Sergio Murilo Stamile Soares.

CAO, N. *et al.* An innovative approach to recover anode from spent lithium-ion battery. **Journal of Power Sources**, v. 483, n. 229163, p. 229163, 2021. ISSN 0378-7753. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229163>. Acesso em: 6 dez. 2025.

CARDONA-VIVAS, N.; CORREA, M. A.; COLORADO, H. A. Multifunctional composites obtained from the combination of a conductive polymer with different contents of primary battery waste powders. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 28, p. e00281, 2021. ISSN 2214-9937. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993721000361>. Acesso em: 27 nov. 2025.

CASSIE, A. B. D.; BAXTER, S. Wettability of porous surfaces. **Transactions of the Faraday Society**, v. 40, p. 546–551, 1944.

CAVAS, L. *et al.* Reinforcement effects of multiwall carbon nanotubes and graphene oxide on pdms marine coatings. **Journal of Coatings Technology and Research**, v. 15, n. 1, p. 105–120, 2018. ISSN 1547-0091. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11998-017-9956-z>. Acesso em: 19 out. 2025.

CENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2009. E-book, pág. 1. ISBN 9788580551280.

CHAUDHARY, V. *et al.* Nanoporous carbon/cobalt composite derived from end-of-life lithium cobalt oxide-type lithium-ion batteries for supercapacitor applications. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 61, n. 50, p. 18492–18502, 2022. ISSN 0888-5885. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.iecr.2c03293>. Acesso em: 1 nov. 2025.

CHEN, H. *et al.* Leaching of cathode materials from spent lithium-ion batteries by using a mixture of ascorbic acid and hno₃. **Hydrometallurgy**, v. 205, n. 105746, p. 105746, 2021. ISSN 0304-386X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105746>. Acesso em: 30 out. 2025.

CHEN, M. *et al.* Recycling spent lini1-x-yco_xmn_yo₂ cathodes to efficient catalysts for the oxygen evolution reaction. **Green Chemistry**, v. 26, n. 5, p. 2912–2921, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/D3GC04503J>. Acesso em: 9 out. 2025.

CHO, H. *et al.* Surface modification of zro₂ nanoparticles with teos to prepare transparent zro₂@sio₂-pdms nanocomposite films with adjustable refractive indices. **Nanomaterials**, v. 12, n. 14, p. 2328, 2022. ISSN 2079-4991. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/nano12142328>. Acesso em: 20 out. 2025.

CONINCK, J. de; DUNLOP, F.; HUILLET, T. Metastable wetting. **Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment**, IOP Publishing, 2011.

COOPER, T. Slower consumption reflections on product life spans and the “throwaway society”. **Journal of Industrial Ecology**, v. 9, p. 51 – 67, 01 2005.

COPELAND, D. Otimização de dissipadores de calor paralelos de placas para convecção forçada. In: **Décimo Sexto Simpósio Anual IEEE de Medição e Gestão Térmica de Semicondutores (Cat No. 00CH37068)**. [S.l.: s.n.], 2000. p. 266–272.

CORREA, R. G. *et al.* Enhancement of thermal performance of polymer-based micro-pin finned heat sinks by incorporating 2-d materials. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 150, n. 19, p. 14887–14901, 2025. ISSN 1388-6150. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-025-14736-1>. Acesso em: 29 out. 2025.

DAMLE, N. **Single and two-phase convection in flexible PDMS microchannels with micropillar arrays**. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2021.

DAMLE, N.; JOSHI, Y. Experimental and analytical study of the hydrodynamic and single and two-phase convective heat transfer performance of flexible pdms microchannels with micropillar arrays. **Applied Thermal Engineering**, v. 224, n. 119799, p. 119799, 2023. ISSN 1359-4311. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119799>. Acesso em: 4 abr. 2026.

DIEKMANN, A.; OMELAN, M. C. V.; GIESE, U. Influence of carbon nanotube-pretreatment on the properties of polydimethylsiloxane/carbon nanotube-nanocomposites. **Polymers**, v. 13, n. 9, p. 1355, 2021. ISSN 2073-4360. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/polym13091355>. Acesso em: 18 out. 2025.

EDDINGTON, D. T.; PUCCINELLI, J. P.; BEEBE, D. J. Thermal aging and reduced hydrophobic recovery of polydimethylsiloxane. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 114, n. 1, p. 170–172, 2006. ISSN 0925-4005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2005.04.037>. Acesso em: 7 jan. 2026.

FARZANA, R. *et al.* Zinc oxide nanoparticles from waste zn-c battery via thermal route: Characterization and properties. **Nanomaterials**, v. 8, n. 9, p. 717, 2018. ISSN 2079-4991. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano8090717>. Acesso em: 30 set. 2025.

FARZANA, R. *et al.* Thermal nanosizing: Novel route to synthesize manganese oxide and zinc oxide nanoparticles simultaneously from spent zn–c battery. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 478–488, 2018. ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618317050>. Acesso em: 10 out. 2025.

FECHINE, P. B. A. **Avanços no desenvolvimento de nanomateriais**. [S.l.]: Imprensa Universitária, 2020. ISBN 9786599149375.

FENG, N. *et al.* Recycling electrode materials of spent lithium-ion batteries for high-efficiency catalyst application: Recent advances and perspectives. **Energy & Fuels**, v. 38, n. 20, p. 19174–19187, 2024. ISSN 0887-0624. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c02887>. Acesso em: 19 nov. 2025.

FORTI, V. *et al.* Relatório técnico, **Monitor Global de Resíduos Eletrônicos 2020: Quantidades, Fluxos e o Potencial da Economia Circular**. 2020.

FRIEND, J.; YEO, L. Fabrication of microfluidic devices using polydimethylsiloxane. **Biomicrofluidics**, v. 4, n. 2, p. 026502, 2010. ISSN 1932-1058. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3259624>. Acesso em: 28 nov. 2025.

FU, Y.-X. *et al.* Thermal conductivity enhancement with different fillers for epoxy resin adhesives. **Applied Thermal Engineering**, v. 66, n. 1–2, p. 493–498, 2014. ISSN 1359-4311. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.044>. Acesso em: 3 fev. 2026.

GAO, W. *et al.* Selective recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries – process development and kinetics evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 833–845, 2018. ISSN 0959-6526. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.040>. Acesso em: 2 out. 2025.

GIDDE, R. R.; PAWAR, P. M. On effect of viscoelastic characteristics of polymers on performance of micropump. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 9, n. 2, p. 168781401769121, 2017. ISSN 1687-8132. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/1687814017691211>. Acesso em: 25 nov. 2025.

GOKALTUN, A. *et al.* Simple surface modification of poly(dimethylsiloxane) via surface segregating smart polymers for biomicrofluidics. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 7377, 2019. ISSN 2045-2322. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-43625-5>. Acesso em: 15 jan. 2026.

GOKALTUN, A. *et al.* Recent advances in nonbiofouling pdms surface modification strategies applicable to microfluidic technology. **Technology**, v. 5, n. 1, p. 1–12, 2017. ISSN 2339-5478. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1142/S2339547817300013>. Acesso em: 20 mar. 2026.

GONCALVES, S. A. *et al.* Development of non-enzymatic glucose sensor using recycled cobalt from cell phone li-ion batteries. **Waste Management**, v. 46, p. 497–502, 2015. ISSN 0956-053X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.026>. Acesso em: 4 fev. 2026.

GU, J. *et al.* Thermal percolation behavior of graphene nanoplatelets/polyphenylene sulfide thermal conductivity composites. **Polymer Composites**, v. 35, n. 6, p. 1087–1092, 2014. ISSN 0272-8397. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/pc.22756>. Acesso em: 5 nov. 2025.

GUO, Y. *et al.* Factors affecting thermal conductivities of the polymers and polymer composites: A review. **Composites Science and Technology**, v. 193, n. 108134, p. 108134, 2020. ISSN 0266-3538. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108134>. Acesso em: 6 nov. 2025.

GUOXING, R. *et al.* Recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries by smelting reduction process based on mno-sio₂-al₂o₃ slag system. In: _____. **Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts 2016**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 211–218. ISBN 9783319486253.

HAGGENMUELLER, R. *et al.* Single wall carbon nanotube/polyethylene nanocomposites: Thermal and electrical conductivity. **Macromolecules**, v. 40, n. 7, p. 2417–2421, 2007. ISSN 0024-9297. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/ma0615046>. Acesso em: 21 out. 2025.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física - Gravitação, Ondas e Termodinâmica - Volume 2**. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2023. E-book, pág. 214. ISBN 9788521638568.

HANISCH, C.; HASELRIEDER, W.; KWADE, A. Recuperação de materiais ativos de eletrodos de íons de lítio usados e rejeitos de produção de eletrodos. In: _____. **Soluções glocalizadas para sustentabilidade na fabricação**. Berlim, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 85–89. ISBN 9783642196911.

HEJAZI, M.-A.; TRABZON, L. Development of a flexible porous gnp-pdms composite: Tunable thermal and electrical properties for novel applications. **Applied Composite Materials**, 2024. ISSN 0929-189X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10443-024-10246-9>. Acesso em: 16 nov. 2025.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010.

HIMANEN, L.; RINKE, P.; FOSTER, A. S. Materials structure genealogy and high-throughput topological classification of surfaces and 2d materials. **npj Computational Materials**, v. 4, n. 1, 2018. ISSN 2057-3960. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41524-018-0107-6>. Acesso em: 2 out. 2025.

HONG, S. *et al.* Enhanced stretchability of porous pdms/cip composites via weak interfacial bonding and their electromagnetic noise suppression properties. **Applied Surface Science**, v. 664, n. 160200, p. 160200, 2024. ISSN 0169-4332. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160200>. Acesso em: 16 out. 2025.

HUANG, C.; QIAN, X.; YANG, R. Thermal conductivity of polymers and polymer nanocomposites. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 132, p. 1–22, 2018. ISSN 0927-796X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mser.2018.06.002>. Acesso em: 23 out. 2025.

HUANG, S.-Y. *et al.* Tailoring mechanical and electrical properties of polydimethylsiloxane nanocomposites with graphene and carbon nanotubes for wearable electronics. **Polymers and Polymer Composites**, v. 31, 2023. ISSN 0967-3911. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/09673911231188296>. Acesso em: 16 out. 2025.

HUANG, X. *et al.* Functional modification of polydimethylsiloxane nanocomposite with silver nanoparticles-based montmorillonite for antibacterial applications. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 642, n. 128666, p. 128666, 2022. ISSN 0927-7757. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128666>. Acesso em: 9 out. 2025.

HUANG, Y. *et al.* Conductive polymer composites from renewable resources: An overview of preparation, properties, and applications. **Polymers**, v. 11, n. 2, p. 187, 2019. ISSN 2073-4360. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/polym11020187>. Acesso em: 2 out. 2025.

IKRAM, R. *et al.* Recycling waste sources into nanocomposites of graphene materials: Overview from an energy-focused perspective. **Nanotechnology Reviews**, v. 12, n. 1, 2023. ISSN 2191-9089. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1515/ntrev-2022-0512>. Acesso em: 2 dez. 2025.

ILIESCU, C. *et al.* A practical guide for the fabrication of microfluidic devices using glass and silicon. **Biomicrofluidics**, v. 6, n. 1, p. 16505–1650516, 2012. ISSN 1932-1058. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3689939>. Acesso em: 5 out. 2025.

IQBAL, A. A.; HARCEN, C. S.; HAQUE, M. Graphene (gnp) reinforced 3d printing nanocomposites: An advanced structural perspective. **Heliyon**, v. 10, n. 7, p. e28771, 2024. ISSN 2405-8440. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28771>. Acesso em: 5 jan. 2026.

ISILDAR, A. *et al.* Biotechnological strategies for the recovery of valuable and critical raw materials from waste electrical and electronic equipment (weee) - a review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 362, p. 467–481, 2019. ISSN 0304-3894. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.050>. Acesso em: 11 dez. 2025.

IULIANO, A. *et al.* Coupling 3d printing and novel replica molding for in house fabrication of skeletal muscle tissue engineering devices. **Advanced Materials Technologies**, v. 5, n. 9, p. 2000344, 2020. ISSN 2365-709X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/admt.202000344>. Acesso em: 28 nov. 2025.

JOHNSTON, I. D. *et al.* Mechanical characterization of bulk sylgard 184 for microfluidics and microengineering. **Journal of Micromechanics and Microengineering: Structures, Devices, and Systems**, v. 24, n. 3, p. 035017, 2014. ISSN 0960-1317. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/24/3/035017>. Acesso em: 14 nov. 2025.

KANDLIKAR, S.; GRANDE, W. Evolution of microchannel flow passages—thermohydraulic performance and fabrication technology. **Heat Transfer Engineering**, v. 24, 01 2003.

KATZ, S. *et al.* Studying the physical and chemical properties of polydimethylsiloxane matrix reinforced by nanostructured tio2 supported on mesoporous silica. **Polymers**, v. 15, n. 1, p. 81, 2022. ISSN 2073-4360. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/polym15010081>. Acesso em: 15 set. 2025.

KGAA, M. **Milli-Q® SQ 2Series Water Purification Systems – Installation and Use Manual**. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://www.sigmaaldrich.com/deepweb/assets/sigmaaldrich/product/documents/444/790/milli-q-sq-2series-br-mk.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2025.

KIM, S. J.; HONG, C.; JANG, K.-S. Theoretical analysis and development of thermally conductive polymer composites. **Polymer**, v. 176, p. 110–117, 2019. ISSN 0032-3861. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2019.05.044>. Acesso em: 11 nov. 2025.

KUKU, M. Value-added energy storage by harnessing spent lithium-ion battery components toward high-performance asymmetric supercapacitor electrodes. **Rare Metals**, 2025. ISSN 1001-0521. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12598-025-03575-6>. Acesso em: 30 set. 2025.

KUMAR, A. *et al.* Enhanced heat dissipation and hydrophobicity of pdms/silver nanoshells nanocomposites. **Physica Scripta**, v. 100, n. 6, p. 065938, 2025. ISSN 0031-8949. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/1402-4896/add0ef>. Acesso em: 29 set. 2025.

KUMAR, R.; SINGH, R. K.; SINGH, D. P. Natural and waste hydrocarbon precursors for the synthesis of carbon based nanomaterials: Graphene and cnts. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 976–1006, 2016. ISSN 1364-0321. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.120>. Acesso em: 5 dez. 2025.

KUMAR, S. S. A. *et al.* The synergistic effects of graphene on the physical, hydrophobic, surface, and thermal properties of acrylic-epoxy-polydimethylsiloxane composite coatings. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 128, n. 103546, p. 103546, 2024. ISSN 0143-7496. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103546>. Acesso em: 27 set. 2025.

LAFRATTA, C. N. *et al.* Replication of two-photon-polymerized structures with extremely high aspect ratios and large overhangs. **The Journal of Physical Chemistry B**, v. 108, n. 31, p. 11256–11258, 2004. ISSN 1520-6106. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/jp048525r>. Acesso em: 30 nov. 2025.

LAKE, M. *et al.* Microfluidic device design, fabrication, and testing protocols. **Protocol Exchange**, 2015. ISSN 2043-0116. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/protex.2015.069>. Acesso em: 5 nov. 2025.

LALAGI, G. *et al.* Influence of design of microchannel heat exchangers and use of nanofluids to improve the heat transfer and pressure drop characteristics: A review. **International Journal of Ambient Energy**, v. 43, n. 1, p. 6849–6877, 2022. ISSN 0143-0750. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/01430750.2022.2056918>. Acesso em: 14 dez. 2025.

LATINI, D. *et al.* A comprehensive review and classification of unit operations with assessment of outputs quality in lithium-ion battery recycling. **Journal of Power Sources**, v. 546, n. 231979, p. 231979, 2022. ISSN 0378-7753. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231979>. Acesso em: 15 out. 2025.

LEADFLUID. **CT3000F Micro Gear Pump**. 2023. Disponível em: <https://www.leadfluid.us/product/ct3000f-micro-gear-pump/>. Acesso em: 9 jan. 2026.

LEAL, V. M. *et al.* Recycling of spent lithium-ion batteries as a sustainable solution to obtain raw materials for different applications. **Journal of Energy Chemistry**, v. 79, p. 118–134, 2023. ISSN 2095-4956. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095495622004259>. Acesso em: 21 out. 2025.

LEE, J. N.; PARK, C.; WHITESIDES, G. M. Solvent compatibility of poly(dimethylsiloxane)-based microfluidic devices. **Analytical Chemistry**, v. 75, n. 23, p. 6544–6554, 2003. ISSN 0003-2700. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/ac0346712>. Acesso em: 2 out. 2025.

LENOVO. **Safety Data Sheet: JK50 Lithium Ion Polymer Battery (SCUD)**. 2020. Disponível em: <https://static.lenovo.com/ww/docs/regulatory/msds/JK50-SCUD-SDS.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2026.

LI, L. *et al.* Preparação de filmes de licoo2 a partir de baterias de íons de lítio usadas por um processo combinado de reciclagem. **Hydrometallurgy**, v. 108, n. 3–4, p. 220–225, 2011. ISSN 0304-386X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.04.013>. Acesso em: 5 nov. 2025.

LI, L. *et al.* Sustainable recovery of cathode materials from spent lithium-ion batteries using lactic acid leaching system. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 5, n. 6, p. 5224–5233, 2017. ISSN 2168-0485. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00571>. Acesso em: 5 jan. 2026.

LI, L. *et al.* Ascorbic-acid-assisted recovery of cobalt and lithium from spent li-ion batteries. **Journal of Power Sources**, v. 218, p. 21–27, 2012. ISSN 0378-7753. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.06.068>. Acesso em: 5 dez. 2025.

LI, W. *et al.* Review of two types of surface modification on pool boiling enhancement: Passive and active. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 130, n. 109926, p. 109926, 2020. ISSN 1364-0321. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.109926>. Acesso em: 10 set. 2025.

LIMA, R. *et al.* Magnetic pdms microparticles for biomedical and energy applications. In: _____. **VipIMAGE 2019**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 578–584. ISBN 9783030320393.

LIMA, R. A. The impact of polydimethylsiloxane (pdms) in engineering: Recent advances and applications. **Fluids**, v. 10, n. 2, p. 41, 2025. ISSN 2311-5521. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/fluids10020041>. Acesso em: 13 out. 2025.

LIU, P. *et al.* Resynthesis and electrochemical performance of $\text{lini}_{0.5}\text{co}_{0.2}\text{mn}_{0.3}\text{O}_2$ from spent cathode material of lithium-ion batteries. **Vacuum**, 2018. ISSN 0042-207X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.08.002>. Acesso em: 13 out. 2025.

LIU, T. *et al.* Recycling valuable cobalt from spent lithium ion batteries for controllably designing a novel sea-urchin-like cobalt nitride-graphene hybrid catalyst: Towards efficient overall water splitting. **Journal of Energy Chemistry**, v. 62, p. 440–450, 2021. ISSN 2095-4956. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jechem.2021.03.052>. Acesso em: 16 out. 2025.

LIU, Z. *et al.* Electric-field-induced out-of-plane alignment of clay in poly(dimethylsiloxane) with enhanced anisotropic thermal conductivity and mechanical properties. **Composites Science and Technology**, v. 165, p. 39–47, 2018. ISSN 0266-3538. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.015>. Acesso em: 1 out. 2025.

LOU, X. *et al.* Grave-to-cradle photothermal upcycling of waste polyesters over spent licoo2. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 2730, 2024. ISSN 2041-1723. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-024-47024-x>. Acesso em: 10 jan. 2025.

LUO, W.-J. *et al.* Microfluidic modular heat sink with improved material characteristics towards thermal management of flexible electronics. **Applied Thermal Engineering**, v. 216, n. 119142, p. 119142, 2022. ISSN 1359-4311. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119142>. Acesso em: 29 ago. 2025.

LUO, W.-J.; VISHWAKARMA, P.; PANIGRAHI, B. Synergistic thermal and hydrodynamic effects in 3d-printed heat sinks with intricate microchannel patterns. **Microfluidics and Nanofluidics**, v. 28, n. 9, 2024. ISSN 1613-4982. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10404-024-02751-x>. Acesso em: 2 set. 2025.

LV, L. *et al.* Upcycling valuable metals of spent lib cathode into high-performance catalysts for co2-ch4 dry reforming. **Fuel**, v. 405, n. 136429, p. 136429, 2026. ISSN 0016-2361. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136429>. Acesso em: 2 out. 2025.

MA, H. *et al.* Vertical alignment of carbon fibers under magnetic field driving to enhance the thermal conductivity of silicone composites. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 32, n. 11, p. 4318–4325, 2021. ISSN 1042-7147. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/pat.5434>. Acesso em: 24 set. 2025.

MA, J. *et al.* Development of polymer composites using modified, high-structural integrity graphene platelets. **Composites Science and Technology**, v. 91, p. 82–90, 2014. ISSN 0266-3538. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.11.017>. Acesso em: 14 nov. 2025.

MAGODA, K.; MEKUTO, L. Biohydrometallurgical recovery of metals from waste electronic equipment: Current status and proposed process. **Recycling**, v. 7, n. 5, p. 67, 2022. ISSN 2313-4321. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/recycling7050067>. Acesso em: 8 dez. 2025.

MANDAL, S. K.; KUMAR, D. Waste-derived rgo-doped calcium carbonate nanocomposites: A green approach for enhanced electrochemical energy storage. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 36, n. 27, 2025. ISSN 0957-4522. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10854-025-15861-1>. Acesso em: 2 nov. 2025.

MANNU, A. *et al.* Selective and sustainable recovery of lithium from black mass via microwave and green leaching techniques. **Materials Science and Engineering: B**, v. 323, n. 118734, p. 118734, 2026. ISSN 0921-5107. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mseb.2025.118734>. Acesso em: 7 fev. 2026.

MAXTHERM. **Espuma Elastomérica**. 2025. Disponível em: <https://www.maxtherm.com.br/espuma-elastomerica>. Acesso em: 4 nov. 2025.

MCNEIL, D. A. *et al.* Uma investigação sobre a transferência de calor por ebulição em fluxo e a queda de pressão em um dissipador de calor com aletas. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 67, p. 65–84, 2014. ISSN 0301-9322. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.06.012>. Acesso em: 12 out. 2025.

MEHENDALE, S. S.; JACOBI, A. M.; SHAH, R. K. Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design. **Applied Mechanics Reviews**, v. 53, p. 175–193, 2000. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:122405453>. Acesso em: 2 out. 2025.

MIRANDA, I. *et al.* Properties and applications of pdms for biomedical engineering: A review. **Journal of Functional Biomaterials**, v. 13, n. 1, p. 2, 2021. ISSN 2079-4983. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/jfb13010002>. Acesso em: 23 dez. 2025.

MISHRA, G. *et al.* A review on recycling of lithium-ion batteries to recover critical metals. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 6, p. 108534, 2022. ISSN 2213-2929. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2022.108534>. Acesso em: 10 dez. 2025.

MOHAMMADI, A.; KOŞAR, A. Review on heat and fluid flow in micro pin fin heat sinks under single-phase and two-phase flow conditions. **Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering**, p. 1–45, 2018. ISSN 1556-7265. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/15567265.2018.1475525>. Acesso em: 13 out. 2025.

MONTÉGUTTI, M. C.; JUNIOR, C. A.; HAUS, T. L. Construção de modelo para avaliação da condutividade térmica em isolantes. **Caderno PAIC**, v. 17, n. 1, p. 191–209, dez. 2016. Disponível em: <https://cadernopaic.fae.edu/cadernopaic/article/view/212>. Acesso em: 2 jan. 2026.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N. F. **Estatística para Engenharia, 5ª Edição**. [S.l.]: Wiley, 2010. 544 p. ISBN 978-0-470-63147-8.

MORBIOLI, G. G. *et al.* Rapid and low-cost development of microfluidic devices using wax printing and microwave treatment. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 284, p. 650–656, 2019. ISSN 0925-4005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2018.12.053>. Acesso em: 10 dez. 2025.

MORBIOLI, G. G.; SPELLER, N. C.; STOCKTON, A. M. Um guia prático para prototipagem rápida de dispositivos microfluídicos baseados em pdms: Um tutorial. **Analytica Chimica Acta**, v. 1135, p. 150–174, 2020. ISSN 0003-2670. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2020.09.013>. Acesso em: 22 nov. 2025.

MOSSALI, E. *et al.* Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments. **Journal of Environmental Management**, v. 264, n. 110500, p. 110500, 2020. ISSN 0301-4797. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110500>. Acesso em: 5 jan. 2026.

MROZIK, W. *et al.* Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries. **Energy & Environmental Science**, v. 14, n. 12, p. 6099–6121, 2021. ISSN 1754-5692. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/d1ee00691f>. Acesso em: 21 out. 2025.

MURATA, L. C. M. *et al.* Construção e teste de um dispositivo para ensaio de condutividade térmica de novos materiais de construção. In: ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais do 17º Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC)**. Foz do Iguaçu, PR, Brasil: ANTAC, 2018. Porto Alegre: ANTAC, 2018.

NASCIMENTO, F. J. d. **Estudo teórico-experimental da transferência de calor e da perda de pressão em um dissipador de calor baseado em microcanais**. 153 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Escola de Engenharia de São Carlos – EESC.

NASERI, T.; MOUSAVI, S. M. Improvement of li and mn bioleaching from spent lithium-ion batteries, using step-wise addition of biogenic sulfuric acid by acidithiobacillus thiooxidans. **Heliyon**, v. 10, n. 18, p. e37447, 2024. ISSN 2405-8440. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37447>. Acesso em: 10 out. 2025.

NATARAJAN, S. *et al.* Recovered spinel mnco₂o₄ from spent lithium-ion batteries for enhanced electrocatalytic oxygen evolution in alkaline medium. **Dalton Transactions**, v. 46, n. 41, p. 14382–14392, 2017. ISSN 1477-9226. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/c7dt02613g>. Acesso em: 30 set. 2025.

NEUMANN, J. *et al.* Recycling of lithium-ion batteries—current state of the art, circular economy, and next generation recycling. **Advanced Energy Materials**, v. 12, n. 17, p. 2102917, 2022. ISSN 1614-6832. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/aenm.202102917>. Acesso em: 7 nov. 2025.

NUNES, J. M. **Caracterização experimental do desempenho térmico e fluidodinâmico de dissipadores de calor microaletados durante a ebulição convectiva**. 220 p. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Estadual Paulista - UNESP, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2023. Área de conhecimento: Ciências Térmicas.

ONG, Y. S.; KUSHAARI, K. Cfd investigation of the feasibility of polymer-based microchannel heat sink as thermal solution. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 28, n. 4, p. 980–994, 2020. ISSN 1004-9541. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cjche.2020.01.007>. Acesso em: 2 nov. 2025.

ONYEKANNE, C. E. *et al.* Mechanical and thermal properties of polydimethylsiloxane/magnetite nanocomposites for cancer treatment by localized hyperthermia and photothermal ablation. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 139, n. 30, 2022. ISSN 0021-8995. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/app.52667>. Acesso em: 11 out. 2025.

ORIKASA, K. *et al.* Exploring thermal and in-situ mechanical properties of flexible 2d tungsten disulfide foam-polymer composite for thermal management. **Composites Part B: Engineering**, v. 284, n. 111743, p. 111743, 2024. ISSN 1359-8368. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111743>. Acesso em: 4 out. 2025.

PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; NUNES, A. S. Determinação experimental da condutividade e difusividade térmica de grãos em regime permanente. **Food Science and Technology**, v. 19, n. 2, p. 264–269, 1999. ISSN 0101-2061. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20611999000200020>. Acesso em: 22 nov. 2025.

PARTICHELI, M. J. **Estrutura e Molhabilidade de Filmes de a-C:H**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade do Estado de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil, 2015. Programa de Pós-Graduação em Física.

PINEDA-VASQUEZ, T. *et al.* From e-waste to high-value materials: Sustainable synthesis of metal, metal oxide, and mof nanoparticles from waste printed circuit boards. **Nanomaterials**, v. 14, n. 1, p. 69, 2023. ISSN 2079-4991. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/nano14010069>. Acesso em: 8 dez. 2025.

QU, W.; PFEFFERKORN, F. Experimental study of pressure drop and heat transfer in a single-phase micropin-fin heat sink. **Journal of Electronic Packaging - J ELECTRON PACKAGING**, v. 129, 12 2007.

QUANTUM-DESIGN. **PPMS Heat Capacity Option User's Manual, 1085-150 Rev. M7**. [S.l.], 2017. Disponível em: https://files.wmich.edu/s3fs-public/attachments/u1045/2019/07_1085-150%20Rev%20M7%20HEAT%20CAPACITY%20OPTION%20USER%27S%20MANUAL.pdf. Acesso em: 4 nov. 2025.

RAUTELA, R.; YADAV, B. R.; KUMAR, S. A review on technologies for recovery of metals from waste lithium-ion batteries. **Journal of Power Sources**, v. 580, n. 233428, p. 233428, 2023. ISSN 0378-7753. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233428>. Acesso em: 10 out. 2025.

REN, L. *et al.* Spray-assisted assembled spherical boron nitride as fillers for polymers with enhanced thermally conductivity. **Chemical Engineering Journal**, v. 370, p. 166–175, 2019. ISSN 1385-8947. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.217>. Acesso em: 1º dez. 2025.

RIBEIRO, J. S.; FREITAS, M. B. J. G.; FREITAS, J. C. C. Recycling of graphite and metals from spent li-ion batteries aiming the production of graphene/coo-based electrochemical sensors. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 1, p. 104689, 2021. ISSN 2213-2929. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2020.104689>. Acesso em: 27 ago. 2025.

RICCUCCI, G. *et al.* Investigation of the thermal conductivity of silicon-base composites: The effect of filler materials and characteristic on thermo-mechanical response of silicon composite. **Applied Sciences**, v. 11, n. 12, p. 5663, 2021. ISSN 2076-3417. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/app11125663>. Acesso em: 9 out. 2025.

RINNE, M.; LAPPALAINEN, H.; LUNDSTRÖM, M. Evaluating the possibilities and limitations of the pyrometallurgical recycling of waste li-ion batteries using simulation and life cycle assessment. **Green Chemistry**, v. 27, n. 9, p. 2522–2537, 2025. ISSN 1463-9262. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/d4gc05409a>. Acesso em: 22 dez. 2025.

ROSHANFAR, M.; GOLMOHAMMADZADEH, R.; RASHCHI, F. An environmentally friendly method for recovery of lithium and cobalt from spent lithium-ion batteries using gluconic and lactic acids. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 1, p. 102794, 2019. ISSN 2213-2929. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2018.11.039>. Acesso em: 28 out. 2025.

ROY, J. J.; SRINIVASAN, M.; CAO, B. Bioleaching as an eco-friendly approach for metal recovery from spent nmc-based lithium-ion batteries at a high pulp density. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 9, n. 8, p. 3060–3069, 2021. ISSN 2168-0485. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c06573>. Acesso em: 15 nov. 2025.

SA, Q. *et al.* Synthesis of high performance $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ from lithium ion battery recovery stream. **Journal of Power Sources**, v. 282, p. 140–145, 2015. ISSN 0378-7753. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.02.046>. Acesso em: 29 nov. 2025.

SALES, F. *et al.* Composite material of pdms with interchangeable transmittance: Study of optical, mechanical properties and wettability. **Journal of Composites Science**, v. 5, n. 4, p. 110, 2021. ISSN 2504-477X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/jcs5040110>. Acesso em: 12 nov. 2025.

SANTOS, M. P. d. *et al.* A technology for recycling lithium-ion batteries promoting the circular economy: The recyclib. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 175, n. 105863, p. 105863, 2021. ISSN 0921-3449. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105863>. Acesso em: 24 out. 2025.

SARDO, C. L. *et al.* Spent lithium battery recycling: Traditional and innovative approaches. **Processes**, v. 13, n. 4, p. 950, 2025. ISSN 2227-9717. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/pr13040950>. Acesso em: 25 out. 2025.

SCHIAVI, P. G. *et al.* Full recycling of spent lithium ion batteries with production of core-shell nanowires/exfoliated graphite asymmetric supercapacitor. **Journal of Energy Chemistry**, v. 58, p. 336–344, 2021. ISSN 2095-4956. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.025>. Acesso em: 4 dez. 2025.

SEDERHOLM, J. G. *et al.* Emerging trends and future opportunities for battery recycling. **ACS Energy Letters**, v. 10, n. 1, p. 107–119, 2025. ISSN 2380-8195. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acsenergylett.4c02198>. Acesso em: 20 out. 2025.

SHARIF, N. A. *et al.* Nanocomposite coatings based on modified graphene oxide and polydimethylsiloxane: Characterization and thermal properties. **Russian Journal of Applied Chemistry**, v. 93, n. 11, p. 1765–1773, 2020. ISSN 1070-4272. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1134/S1070427220110191>. Acesso em: 25 set. 2025.

SHITTU, O. S.; WILLIAMS, I. D.; SHAW, P. J. Global e-waste management: Can we make a difference? a review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges. **Waste Management**, v. 120, p. 549–563, 2021. ISSN 0956-053X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.016>. Acesso em: 20 dez. 2025.

SOE, H. M. *et al.* Surface-modification of silver nanoparticle–based polydimethylsiloxane composite for fabrication of strain sensor. **Materials Today Communications**, v. 36, n. 106486, p. 106486, 2023. ISSN 2352-4928. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106486>. Acesso em: 19 out. 2025.

SOUZA, R. *et al.* Thermal performance evaluation of pure pdms and pdms composites heat exchangers. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 150, n. 13, p. 10401–10412, 2025. ISSN 1388-6150. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-025-14394-3>. Acesso em: 24 jan. 2026.

SOUZA, R. R. *et al.* Experimental study of an innovative elastomer-based heat exchanger. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 49, n. 103365, p. 103365, 2023. ISSN 2214-157X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2023.103365>. Acesso em: 12 jan. 2026.

SRINIVASAN, S.; SHANTHAKUMAR, S.; ASHOK, B. Sustainable lithium-ion battery recycling: A review on technologies, regulatory approaches and future trends. **Energy Reports**, v. 13, p. 789–812, 2025. ISSN 2352-4847. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484724008588>. Acesso em: 23 out. 2025.

SURIYANARAYANAN, S. *et al.* Highly efficient recovery and recycling of cobalt from spent lithium-ion batteries using an n-methylurea-acetamide nonionic deep eutectic solvent. **ACS Omega**, v. 8, n. 7, p. 6959–6967, 2023. ISSN 2470-1343. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.2c07780>. Acesso em: 2 out. 2025.

SWAIN, B. *et al.* Hydrometallurgical process for recovery of cobalt from waste cathodic active material generated during manufacturing of lithium ion batteries. **Journal of Power Sources**, v. 167, n. 2, p. 536–544, 2007. ISSN 0378-7753. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.02.046>. Acesso em: 24 set. 2025.

TAKACOVA, Z. *et al.* Current trends in spent portable lithium battery recycling. **Materials**, v. 16, n. 12, p. 4264, 2023. ISSN 1996-1944. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma16124264>. Acesso em: 28 set. 2025.

TEKBOND. **Silicone Acético Alta Temperatura**. 2025. Disponível em: <https://www.tekbond.com.br/produtos/sela-e-veda/silicones/silicone-acetico-alta-temperatura>. Acesso em: 4 nov. 2025.

THE-DOW-CHEMICAL-COMPANY. **SYLGARD™ 184 Elastomer – Technical Data Sheet**. 2024. Disponível em: <https://www.dow.com/en-us/pdp/sylgard-184-silicone-elastomer-kit.01064291z>. Acesso em: 20 nov. 2025.

THERMTEST. **MP-2 Measurement Platform – User Manual**. [S.l.], 2025. Disponível em: <https://www.qitech.it/wp-content/uploads/2025/06/Thermtest-MP-2-1.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2025.

URBANSKA, W. Recovery of co, li, and ni from spent li-ion batteries by the inorganic and/or organic reducer assisted leaching method. **Minerals**, v. 10, n. 6, p. 555, 2020. ISSN 2075-163X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/min10060555>. Acesso em: 27 abr. 2026.

VALSON, A. *et al.* Withdrawn: Sustainable agriculture through battery recycling: Effect of recycled liquid nano manganese fertiliser on wheat yield. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-3236408/v1>. Acesso em: 15 nov. 2025. 2023.

VILARONGA, A. G. d. S. **Desenvolvimento de superfícies microporosas para intensificação da transferência de calor em ebulição em piscina**. 99 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)) — Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, SP, 2024. Área de concentração: Ciências Térmicas.

WANG, M.-M.; ZHANG, C.-C.; ZHANG, F.-S. An environmental benign process for cobalt and lithium recovery from spent lithium-ion batteries by mechanochemical approach. **Waste Management**, v. 51, p. 239–244, 2016. ISSN 0956-053X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.006>. Acesso em: 14 out. 2025.

WANG, Z.; VOLINSKY, A. A.; GALLANT, N. D. Crosslinking effect on polydimethylsiloxane elastic modulus measured by custom-built compression instrument. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 131, n. 22, 2014. ISSN 0021-8995. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/app.41050>. Acesso em: 28 nov. 2025.

WENZEL, R. N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 28, p. 988–994, 1936.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2011. Tradução de Mario Moro Fecchio e Nelson Manzanares Filho. Obra originalmente publicada como *Fluid Mechanics*, 6th edition. ISBN 978-85-8055-009-2.

WOLF, M. P.; SALIEB-BEUGELAAR, G. B.; HUNZIKER, P. Pdms with designer functionalities—properties, modifications strategies, and applications. **Progress in Polymer Science**, v. 83, p. 97–134, 2018. ISSN 0079-6700. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.06.001>. Acesso em: 30 set. 2025.

YANG, H. *et al.* Study on ageing characteristics and evaluation methods of rtv silicone rubber in high humidity area. **PLOS ONE**, v. 16, n. 6, p. e0251092, 2021. ISSN 1932-6203. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0251092>. Acesso em: 15 out. 2025.

YANG, T. *et al.* Surface modification of tio2 nanoparticles and preparation of tio2/pdms hybrid membrane materials. **Polymer Composites**, v. 38, n. 8, p. 1541–1548, 2017. ISSN 0272-8397. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/pc.23721>. Acesso em: 19 set. 2025.

YANG, Y.; XU, S.; HE, Y. Lithium recycling and cathode material regeneration from acid leach liquor of spent lithium-ion battery via facile co-extraction and co-precipitation processes. **Waste Management**, v. 64, p. 219–227, 2017. ISSN 0956-053X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.018>. Acesso em: 27 nov. 2025.

YAO, Y. *et al.* Achieving significant thermal conductivity enhancement via an ice-templated and sintered bn-sic skeleton. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 12, n. 2, p. 2892–2902, 2020. ISSN 1944-8244. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.9b19280>. Acesso em: 28 ago. 2025.

YE, M. *et al.* Experimental study on heat transfer performance and flow visualization in microchannels with micropillars. **Thermal Science**, v. 26, n. 5 Part B, p. 4169–4178, 2022. ISSN 0354-9836. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2298/tsci2205169y>. Acesso em: 3 dez. 2025.

YI, P. *et al.* Pdms nanocomposites for heat transfer enhancement in microfluidic platforms. **Lab on a Chip**, v. 14, n. 17, p. 3419–3426, 2014. ISSN 1473-0197. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/c4lc00615a>. Acesso em: 25 ago. 2025.

YOUSUFF, C. M. *et al.* Estudo sobre os parâmetros de corte ideais de um molde de alumínio para uma ligação eficaz de um dispositivo microfluídico de pdms. **Micromachines**, v. 8, n. 8, p. 258, 2017. ISSN 2072-666X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/mi8080258>. Acesso em: 20 out. 2025.

ZAGO, J. V. **Estudo da transferência de calor e da classificação de escoamentos em microcanais com base no diâmetro hidráulico**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual Paulista - UNESP, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Brasil, 2019.

ZANCAN, P. H. **Influência dos Parâmetros de Deposição na Molhabilidade de Filmes de a-C:H**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Programa de Pós-Graduação em Física, Joinville, SC, Brasil, 2017. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cct/id_cpmenu/877/Disserta__o_Paulo_Zancan_15180956415105_877.pdf. Acesso em: 5 set. 2025.

ZANOLETTI, A. *et al.* A review of lithium-ion battery recycling: Technologies, sustainability, and open issues. **Batteries**, v. 10, n. 1, p. 38, 2024. ISSN 2313-0105. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/batteries10010038>. Acesso em: 2 nov. 2025.

ZAPAROLLI, D. **Uma nova técnica para reciclar baterias de íons-lítio**. 2025. Revista Pesquisa FAPESP. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/uma-nova-tecnica-para-reciclar-baterias-de-ions-litio/>. Acesso em: 15 nov. 2025.

ZENG, X.; MATHEWS, J. A.; LI, J. Urban mining of e-waste is becoming more cost-effective than virgin mining. **Environmental Science & Technology**, v. 52, n. 8, p. 4835–4841, 2018. ISSN 0013-936X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.7b04909>. Acesso em: 26 out. 2025.

ZHANG, G. *et al.* A sustainable process for the recovery of anode and cathode materials derived from spent lithium-ion batteries. **Sustainability**, v. 11, n. 8, p. 2363, 2019. ISSN 2071-1050. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/su11082363>. Acesso em: 13 out. 2025.

ZHANG, Y.-F. *et al.* Enhanced thermal properties of pdms composites containing vertically aligned graphene tubes. **Applied Thermal Engineering**, v. 150, p. 840–848, 2019. ISSN 1359-4311. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.029>. Acesso em: 17 out. 2025.

ZHAO, Y.-H.; WU, Z.-K.; BAI, S.-L. Study on thermal properties of graphene foam/graphene sheets filled polymer composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 72, p. 200–206, 2015. ISSN 1359-835X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.02.011>. Acesso em: 5 jan. 2026.

ZHAO, Z.-B. *et al.* Fabrication of silver nanoparticles/copper nanoparticles jointly decorated nitride flakes to improve the thermal conductivity of polymer composites. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 635, n. 128104, p. 128104, 2022. ISSN 0927-7757. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.128104>. Acesso em: 7 out. 2025.

ZHOU, F. *et al.* Experimental and numerical studies on heat transfer enhancement of microchannel heat exchanger embedded with different shape micropillars. **Applied Thermal Engineering**, v. 175, n. 115296, p. 115296, 2020. ISSN 1359-4311. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115296>. Acesso em: 13 out. 2025.

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	Claysson Campos Soares Data nasc.: 02/10/2001
Nacionalidade	Brasileiro
Nome em citações bibliográficas	Soares, Claysson Campos Soares, C. C.
Currículo Lattes	http://lattes.cnpq.br/6190046967679198
ORCID	https://orcid.org/0009-0000-5408-5634
Outro identificador	–
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2024/Atual	Mestrado em Engenharia Mecânica (Mestre) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP/FEG)
2019/2023	Graduação em Engenharia Mecânica (Bacharel) Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE)
2017/2018	Curso Técnico em Mecânica (Técnico) ETEC Professor Eudécio Luiz Vicente (ETEC-CPS)
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
PINHAIS, L. G. R.; SOARES, C. C.; CALACHE, L. D. R. O design de experimentos aplicado à produção de bioetanol: uma revisão da literatura. <i>Bioenergia em Revista: Diálogos</i>, v. 15, p. 169–192, 2025. SOARES, C. C.; SILVA, M. M.; EDERLI, J. A. P. Refrigeração termoeétrica: explorando o efeito Peltier em um sistema caseiro de refrigeração. <i>Colloquium Exactarum</i>, v. 15, p. 1–14, 2023. SOARES, C. C.; NUNES, J. M.; DA SILVA, M. M. Analysis of the thermoelectric potential of a homemade Peltier refrigeration system under different electrical operating conditions. <i>In: 27th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2023</i>, 27., 2023, Florianópolis. Proceedings [...]. 2023. SOARES, C. C.; MOREIRA, A. P.; MORSCH FILHO, E. Experimental analysis of a micro-heat exchanger made of PDMS with the addition of nanoparticles from battery waste. <i>In: 28th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2025</i>, 28., 2025, Curitiba. Artificial Intelligence for a Sustainable Tomorrow [...]. 2025.	

PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES	
Bancas de trabalhos de conclusão	
MORSCH FILHO, E.; SOARES, C. C.; MAJI, N. A. Participação em banca de Isis Rodrigues Fernandes Faria de Souza. Investigação experimental de biomaterial de mudança de fase integrado com aleta para controle térmico . 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeronáutica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP/FESJ, São João da Boa Vista, 2025.	
Orientações	
–	
PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS	
International Congress of Mechanical Engineering – COBEM, 28., 2025, (Curitiba). Experimental analysis of a micro-heat exchanger made of PDMS with the addition of nanoparticles from battery waste. 2025. (Congresso).	
Escola de Primavera de Transição e Turbulência – EPTT, 14., 2024, (São João da Boa Vista). 2024. (Escola).	