MATERIAIS POLIMÉRICOS E DISPOSITIVOS DE REFRIGERAÇÃO ELASTOCALÓRICA: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Kawan de Souza Santos (PIBIC-AF-IS/FA), Flávio Clareth Colman (Orientador).
E-mail: fccolman@uem.br.

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Maringá, PR.

Área e subárea do conhecimento: Engenharia Mecânica/ Engenharia Térmica.

Palavras-chave: Materiais poliméricos; PRISMA 2020; Ciclos termodinâmicos.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre materiais poliméricos e sua aplicação em dispositivos de refrigeração elastocalórica. A revisão foi conduzida de acordo com as recomendações do PRISMA 2020, com buscas nas bases Web of Science e Scopus por combinações de termos relacionados ao efeito elastocalórico, a polímeros, elastômeros e dispositivos de refrigeração. Os registros foram exportados para o Microsoft Excel, no qual foram removidas as duplicatas e aplicados critérios de elegibilidade referentes ao tipo de publicação, idioma, aderência temática e disponibilidade de metodologia verificável. Foram identificados 123 registros nas duas bases. Após as etapas iniciais de deduplicação e elegibilidade, 43 registros foram mantidos para triagem, dos quais 25 foram encaminhados à leitura integral e à extração de dados. Os estudos foram classificados em três grupos: dispositivos experimentais e protótipos; modelos, simulações e conceitos de dispositivos; e materiais poliméricos com potencial de aplicação. A análise preliminar indicou predominância da borracha natural entre os polímeros investigados, associada à capacidade de produzir variações de temperatura relevantes sob deformação mecânica. Entretanto, a comparação com ligas de NiTi requer considerar, além da amplitude térmica, tensão de acionamento, transferência de calor, histerese, durabilidade cíclica e desempenho do dispositivo. Os resultados permitem mapear tendências e lacunas para o desenvolvimento de sistemas elastocalóricos baseados em polímeros.

INTRODUÇÃO

Os sistemas convencionais de refrigeração baseiam-se predominantemente em ciclos de compressão de vapor. Embora consolidados, esses sistemas dependem de fluidos refrigerantes e de componentes mecânicos cuja operação pode estar associada a impactos ambientais e consumo energético. Nesse contexto, tecnologias de refrigeração em estado sólido baseadas em efeitos calóricos vêm sendo investigadas como alternativas capazes de converter estímulos externos em variações térmicas (QIAN et al., 2016).

Entre essas tecnologias, o efeito elastocalórico corresponde à variação de temperatura de um material durante o carregamento e o descarregamento sob tensão uniaxial, em condições próximas às adiabáticas. Nas ligas NiTi, o fenômeno está principalmente relacionado à transformação martensítica induzida por tensão. Apesar das elevadas respostas térmicas, o emprego dessas ligas em dispositivos é condicionado por fatores como tensão de acionamento, histerese e vida em fadiga (QIAN et al., 2016).

Polímeros e elastômeros constituem uma classe alternativa de materiais elastocalóricos devido à baixa densidade, à flexibilidade geométrica e à possibilidade de processamento em tubos, filmes e estruturas regenerativas. Na borracha natural, o estiramento reduz a entropia configuracional das cadeias e pode promover cristalização induzida por deformação; o descarregamento rápido aumenta a entropia e produz resfriamento. Resultados experimentais mostram que a borracha natural pode apresentar variações térmicas relevantes sob tensões inferiores às requeridas por ligas metálicas, embora necessite de grandes deformações e apresente resposta dependente das condições de ensaio e da densidade de ligações cruzadas (CANDAU et al., 2023; LIU et al., 2023).

A aplicação tecnológica, entretanto, não depende apenas da resposta do material. Geometria do elemento ativo, taxa de carregamento, transferência de calor, frequência de operação e durabilidade determinam o desempenho do sistema. A demonstração de refrigeradores regenerativos constituídos por tubos de borracha natural evidencia a viabilidade de dispositivos poliméricos, mas também reforça a necessidade de avaliar conjuntamente o material e o ciclo termodinâmico (SEBALD et al., 2023).

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi identificar e analisar estudos sobre materiais poliméricos e dispositivos de refrigeração elastocalórica, comparando materiais, geometrias, condições mecânicas e térmicas, respostas elastocalóricas, durabilidade e parâmetros de desempenho.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizada uma revisão sistemática da literatura com base nas recomendações do PRISMA 2020, adaptadas ao contexto da engenharia, a fim de registrar de forma transparente as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos (PAGE et al., 2021).

As buscas foram realizadas nas bases Web of Science e Scopus, nos campos título, resumo e palavras-chave. Foram empregadas duas estratégias complementares: a primeira direcionada a dispositivos elastocalóricos baseados em polímeros e a segunda voltada à identificação de materiais poliméricos com resposta elastocalórica.

Estratégia 1 - dispositivos elastocalóricos:

(device OR refrigerator OR heat pump OR refrigeration OR cooling OR regenerator) AND
(polymer OR elastomer OR rubber OR polyurethane OR natural rubber) AND
(elastocaloric OR elastocaloric effect)

Estratégia 2 - materiais poliméricos:

(polymer OR elastomer OR rubber OR polyurethane OR natural rubber) AND (elastocaloric OR elastocaloric effect)

Foram incluídos artigos científicos e de revisão, em inglês, português ou espanhol, que apresentassem resultados experimentais, numéricos ou analíticos sobre materiais poliméricos, dispositivos, modelos ou conceitos de sistemas elastocalóricos. Foram excluídos registros duplicados, estudos exclusivamente magnetocalóricos, eletrocalóricos ou barocalóricos, documentos sem metodologia verificável e trabalhos sem aderência à pergunta de pesquisa.
Os registros foram organizados no Microsoft Excel para deduplicação e triagem. Nos estudos selecionados para leitura integral foram extraídos: tipo de estudo, material, geometria, modo de carregamento, tensão e deformação, condições térmicas, variação de temperatura, durabilidade, configuração do dispositivo e ciclo termodinâmico. A síntese foi estruturada em três grupos: (1) dispositivos experimentais e protótipos; (2) modelos, simulações e conceitos; e (3) materiais poliméricos ainda não integrados a dispositivos completos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As buscas recuperaram 123 registros nas duas bases. Após as etapas iniciais de deduplicação e aplicação dos critérios de elegibilidade, 43 registros permaneceram para triagem. A leitura de títulos e resumos resultou na seleção de 25 estudos para avaliação em texto completo, extração das variáveis e classificação. Como essa etapa ainda está em andamento, os resultados apresentados são preliminares.
A análise inicial mostrou que a literatura reúne tanto estudos de caracterização de materiais quanto modelos e protótipos de dispositivos. A borracha natural foi o polímero mais recorrente entre os estudos selecionados. Sua atratividade decorre da combinação entre resposta térmica, baixa tensão de acionamento e possibilidade de conformação em geometrias favoráveis à troca térmica. A densidade de ligações cruzadas, a deformação aplicada e a taxa de carregamento influenciam diretamente a resposta elastocalórica (CANDAU et al., 2023; LIU et al., 2023).
Também foram identificados dispositivos regenerativos baseados em tubos de borracha natural, indicando que a transição da caracterização do material para sistemas funcionais é tecnicamente possível (SEBALD et al., 2023). Entretanto, não é adequado afirmar, nesta etapa, que a borracha natural substitui diretamente o NiTi. A comparação deve considerar simultaneamente variação de temperatura, tensão e deformação de acionamento, potência de refrigeração, intervalo de temperatura, eficiência, transferência de calor e estabilidade cíclica.

CONCLUSÕES

A revisão sistemática permitiu organizar a literatura sobre polímeros e dispositivos elastocalóricos e mostrou que a borracha natural é, até o momento, o material polimérico mais recorrente e tecnologicamente avançado entre os estudos

selecionados. Sua baixa tensão de acionamento e sua resposta térmica favorecem aplicações em refrigeração, mas as grandes deformações requeridas e as limitações de transferência de calor, durabilidade e frequência de operação ainda precisam ser avaliadas de forma comparativa. Portanto, os resultados sustentam a borracha natural como candidata promissora, mas não permitem caracterizá-la como substituta direta do NiTi. A conclusão da leitura integral e da extração quantitativa será necessária para estabelecer comparações de desempenho e identificar as configurações de dispositivo mais adequadas.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária, pela concessão da bolsa de iniciação científica, e à Universidade Estadual de Maringá, pelo apoio institucional.

REFERÊNCIAS

CANDAU, N. *et al.* Elastocaloric waste/natural rubber materials with various crosslink densities. **Polymers**, v. 15, n. 11, 2566, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/polym15112566.

LIU, B. *et al.* A lower temperature difference of the elastocaloric effect by natural rubber. **International Journal of Refrigeration**, v. 155, p. 163-172, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.08.004.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n71, 2021. DOI: https://doi.org/10.1136/bmj.n71.

QIAN, S. *et al.* A review of elastocaloric cooling: materials, cycles and system integrations. **International Journal of Refrigeration**, v. 64, p. 1-19, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.12.001.

SEBALD, G. *et al.* High-performance polymer-based regenerative elastocaloric cooler. **Applied Thermal Engineering**, v. 223, 120016, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120016.