

DESENVOLVIMENTO DE MÓDULO E METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA ESTUDO DO EFEITO ELASTOCALÓRICO EM MATERIAIS POLIMÉRICOS

Matheus Henrique Araújo Paz (PIBIC/CNPq/FA/Uem), Jean Rodrigo Bocca (Coorientador), Flávio Clareth Colman (Orientador). E-mail: ra129330@uem.br

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

Área e subárea do conhecimento: Engenharia Mecânica / Termodinâmica.

Palavras-chave: efeito elastocalórico; medição indireta; aparato experimental.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um módulo experimental acoplado a uma prensa mecânica para investigação do efeito elastocalórico em materiais poliméricos. O módulo foi construído por meio de *retrofit*, incluindo usinagem em torno, furação e faceamento, com componentes intercambiáveis. Ensaios foram realizados com elastômero termoplástico e tubos de látex (nº 200 e nº 201) submetidos a deformação de 300 %, monitorada por câmera térmica FLIR EDGE com pontos de medição específicos (*Spot Meters*). O material termoplástico apresentou variação de temperatura de 1,4 °C (13,3 –14,7 °C), enquanto os tubos de látex alcançaram até 27,4 °C (nº 200) e 24,4 °C (nº 201). O efeito elastocalórico observado resulta da reorganização das cadeias poliméricas, sem contribuição da cristalização induzida por deformação, que ocorre apenas acima de 400 %. A taxa de aplicação da deformação, controlada pelo movimento do eixo da prensa, foi de 58 mm/s no estiramento e 34 mm/s na contração, aproximando-se de condições adiabáticas.

INTRODUÇÃO

O efeito elastocalórico ($E\sigma e-C$) foi o primeiro fenômeno i-calórico descoberto, identificado por John Gough na borracha natural (BN) no início do século XIX. Mais recentemente, estudos sistemáticos aprofundaram a compreensão do efeito elastocalórico em BN, analisando a influência da temperatura (Xie; Sebald; Guyomar, 2017) e da fadiga por ciclos (Sebald; Xie; Guyomar, 2016). Nessas investigações, foi utilizada uma bancada experimental que aplicava esforços de tração ao material e monitorava a evolução térmica por meio de câmera infravermelha.

Com base nesses avanços, foi desenvolvido o primeiro regenerador utilizando BN como matriz ativa. O sistema promoveu trocas térmicas por meio do escoamento de água nos tubos de BN e apresentou desempenho dependente da razão entre os volumes de fluido de trabalho e matriz regenerativa, bem como da frequência de operação. Nas condições ideais (0,1 Hz, razão volumétrica 1 e alongação de 3,5–5,5%), alcançou-se uma diferença de temperatura de 8,3 K, COP > 6 e capacidade de refrigeração específica de 0,14 W·g⁻¹ (Sebald et al., 2023).

Diante desse contexto, o presente projeto tem como objetivo desenvolver um módulo experimental acoplado a uma prensa mecânica e estabelecer uma metodologia para a caracterização do efeito elastocalórico em materiais poliméricos, utilizando câmera térmica para monitoramento da resposta térmica.

MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foi elaborado o projeto do módulo a ser acoplado a um equipamento pré-existente, concebido de modo que suas peças constituintes fossem intercambiáveis. A Figura 1a apresenta o modelo desenvolvido em ambiente CAD 3D (SolidWorks® 2024). O módulo possui estrutura de fixação superior conectada ao pistão da prensa e estrutura inferior acoplada à sua base. Em ambas as extremidades foram instalados mandris fixados por parafusos, destinados à fixação da amostra. A Figura 1b ilustra o sistema já construído e integrado à máquina real.

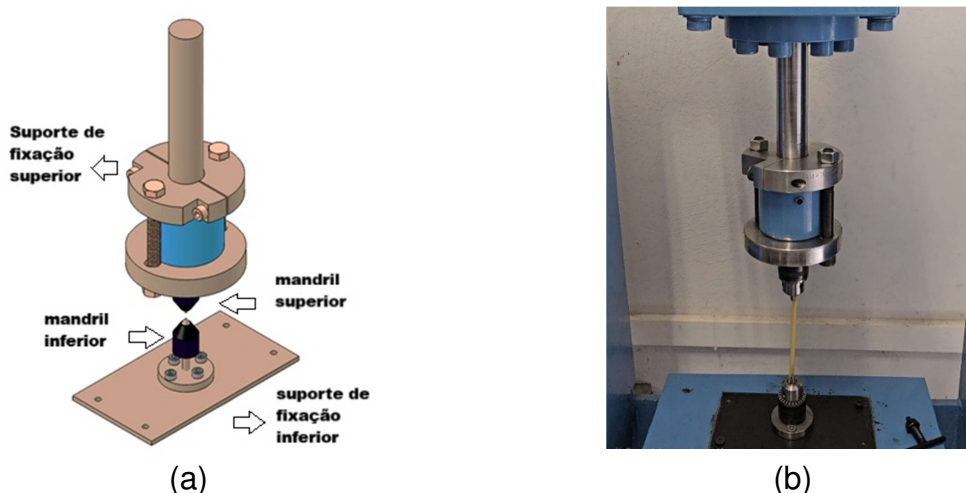


Figura 1 – Módulo Experimental (a) Modelo 3D em CAD e (b) Módulo integrado ao equipamento

Em seguida, foi desenvolvida uma metodologia para a observação do efeito elastocalórico. Para os ensaios, foram utilizados como materiais de análise um elastômero termoplástico (TPE, Fortiprene TPE 7116A35BR) com dimensões de $85 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$ (comprimento, largura e espessura) e tubos de látex natural de dois tipos: nº 200 (diâmetro externo de 5,5 mm, interno de 3 mm, parede de 1,25 mm e comprimento de 40 mm) e nº 201 (diâmetro externo de 8 mm, interno de 4 mm, parede de 2 mm e comprimento de 30 mm). A variação de temperatura resultante foi monitorada indiretamente por meio de uma câmera térmica FLIR One Edge, durante deformações constantes de até 300%. A taxa de deformação foi determinada com o auxílio do software *Tracker*, no qual se introduz uma referência no sistema e, a partir da análise de vídeos de ensaios reais, obtêm-se os valores de deformação e de sua taxa aplicada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como primeiro resultado, apresenta-se o módulo experimental desenvolvido e construído pelo aluno por meio de um retrofit em equipamento pré-existente, incluindo usinagem em torno, furação em bancada e faceamento das peças. Na Figura 2a, é possível visualizar uma das peças que compõem o suporte superior (em processo de torneamento), enquanto a Figura 2b apresenta o conjunto completo das peças fabricadas.



(a)



(b)

Figura 2 – Fabricação: (a) torneamento de peça do suporte superior e (b) Conjunto completo

Nos primeiros ensaios, foi avaliado o comportamento térmico do TPE e dos tubos de látex sob deformação de 300 %. Na imagem térmica, o retângulo central indica a área selecionada para coleta de dados, enquanto os círculos coloridos, denominados *Spot Meters*, representam pontos de medição específicos: o vermelho indica a temperatura máxima e o azul a mínima. No TPE, observou-se uma variação de temperatura de 1,4 °C, com ponto mínimo de 13,3 °C e ponto máximo de 14,7 °C. No tubo de látex nº 200 (ver Figura 3), a temperatura inicial era próxima a 25 °C, alcançando 27,4 °C após a deformação, enquanto no tubo nº 201 as temperaturas iniciais variaram entre 22,9 °C e 23,7 °C, atingindo 24,4 °C com a deformação aplicada. Esses resultados refletem o efeito elastocalórico, que neste caso ocorre devido à reorganização das cadeias poliméricas durante a deformação. Como a deformação aplicada (300 %) é inferior à condição necessária para o desenvolvimento da cristalização induzida por deformação (CID), não foram observadas contribuições da CID nos resultados obtidos. Para aproximar-se de uma condição adiabática, a taxa de aplicação da deformação em função do tempo é um parâmetro crítico. A velocidade de movimentação do eixo da prensa influencia diretamente os resultados obtidos: durante o movimento de retração (estiramento do material), a velocidade média é de 58 mm/s (0,11 Hz), enquanto no movimento de avanço (contração do material) atinge 34 mm/s (0,08 Hz). A taxa de aplicação da deformação, controlada pelo movimento do eixo da prensa, corresponde a uma frequência aproximada de 0,08 Hz, considerando o ciclo completo de estiramento e contração. Esses valores estão longe da condição ideal, acima de 1 Hz, necessária para aproximação de uma condição adiabática, indicando que os resultados obtidos refletem apenas parcialmente o efeito elastocalórico ideal.

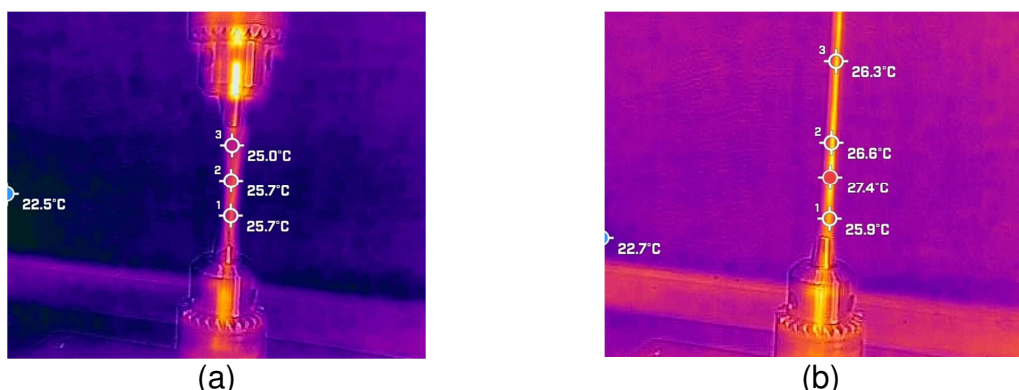


Figura 3 – Imagem Termográfica (a) Antes da deformação e (b) Depois da deformação, para o Látex n.200

CONCLUSÕES

Desenvolveu-se um módulo experimental acoplado a uma prensa mecânica para investigação do efeito elastocalórico em materiais poliméricos, construído por meio de retrofit com peças intercambiáveis. Ensaios com TPE e tubos de látex (nº 200 e nº 201) submetidos a deformação de 300 % foram monitorados por câmera térmica FLIR. O TPE apresentou variação de temperatura de 1,4 °C, enquanto os tubos de látex atingiram até 27,4 °C e 24,4 °C, respectivamente. O efeito observável resulta da reorganização das cadeias poliméricas, sem contribuição da cristalização induzida por deformação (CID). A frequência efetiva do ciclo (~0,08 Hz) está longe do ideal (>1 Hz) para aproximação de condição adiabática. Os resultados confirmam a funcionalidade do módulo, que deverá ser acoplado a um equipamento capaz de deformações em maior frequência para melhor caracterização do efeito elastocalórico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq pelo financiamento da bolsa, a UEM pela estrutura e ao meu orientador que colaborou com o projeto.

REFERÊNCIAS

SEBALD, Gael *et al.* High-performance polymer-based regenerative elastocaloric cooler. **Applied Thermal Engineering**, v. 223, p. 120016, 25 mar. 2023.

SEBALD, Gael; XIE, Zhongjian; GUYOMAR, Daniel. Fatigue effect of elastocaloric properties in natural rubber. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 374, n. 2074, p. 20150302, 13 ago. 2016.

XIE, Zhongjian; SEBALD, Gael; GUYOMAR, Daniel. Temperature dependence of the elastocaloric effect in natural rubber. **Physics Letters A**, v. 381, n. 25–26, p. 2112–2116, 12 jul. 2017.