ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO EM REGENERADOR TORSIOCALÓRICO

Arthur Seidi Shiraishi Canavello Brandão (PIBIC/CNPq), Flávio Clareth Colman (Orientador). E-mail: fccolman@uem.br

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Maringá, PR.

Área e subárea do conhecimento: Engenharias/ Engenharia Mecânica/ Fenômenos de Transporte/ Princípios Variacionais e Métodos Numéricos.

Palavras-chave: Refrigeração em estado sólido; Fluidodinâmica computacional; Ligas com memória de forma.

RESUMO

A refrigeração em estado sólido, baseada em efeitos mecanocalóricos, surge como alternativa aos sistemas por compressão de vapor, dispensando fluidos refrigerantes de elevado potencial de aquecimento global. Entre esses efeitos, o torsiocalórico explora a torção pura como estímulo mecânico e permite variações adiabáticas de temperatura superiores às obtidas por tração uniaxial. O objetivo foi desenvolver e validar um modelo numérico transiente capaz de reproduzir o comportamento térmico de regeneradores torsiocalóricos construídos com fios de níquel-titânio. Adotou-se a abordagem de volumes finitos, com tratamento conjugado entre os domínios sólido e fluido, e a geração foi implementada como termo fonte volumétrico por meio de uma função definida pelo usuário. Modelaram-se dois sistemas: um feixe de três fios sob convecção forçada em água e outro de quatro fios sob convecção natural em ar. A energia específica de resfriamento foi reproduzida com um desvio de 0,879% em relação ao valor calorimétrico de referência, e as variações adiabáticas de temperatura apresentaram desvios inferiores a 1%. O coeficiente de desempenho de ciclo completo foi de 1,216, equivalente a 9,09% do limite de Carnot.

INTRODUÇÃO

A climatização de ambientes constitui o uso final de energia com crescimento mais acelerado no setor de edificações, e as restrições impostas pela Emenda de Kigali ao Protocolo de Montreal sobre os hidrofluorcarbonos tornam urgente o desenvolvimento de tecnologias que dispensem o uso de fluidos refrigerantes gasosos. A refrigeração em estado sólido responde a essa demanda ao transferir a variação de entropia do fluido para o material: em um dispositivo mecanocalórico, é o sólido que percorre o ciclo termodinâmico, enquanto o transporte de calor é realizado por um fluido secundário que não muda de fase, podendo ser água ou ar (TAKEUCHI; SANDEMAN, 2015).

O elemento que viabiliza esse acoplamento é o regenerador, uma matriz de material ativo por meio da qual o fluido secundário escoa alternadamente, de modo que o

encadeamento de pequenos ciclos locais estabelece um gradiente cuja amplitude supera a variação adiabática do material isolado (TUŠEK et al., 2015). Entre os efeitos mecanocalóricos, o torsiocalórico foi caracterizado sistematicamente por Wang et al. (2019), que observaram variações máximas de +37,9 e -20,8°C em feixes de quatro fios de níquel-titânio. A modelagem numérica desses dispositivos, contudo, permanece pouco explorada. Zhao et al. (2022) propuseram tratar a geração como termo fonte volumétrico com decaimento exponencial, porém com coeficientes ajustados para torção contínua a dezenas de rotações por minuto, condição incompatível com os ensaios de torção rápida, nos quais os tempos de liberação situam-se entre 65 e 455 milissegundos.

Decorre daí o problema que orienta este trabalho: construir um modelo confiável exige tratar separadamente a forma funcional da geração e a sua magnitude, esta última ancorada em medição calorimétrica independente. O objetivo foi desenvolver, verificar e validar um modelo numérico transiente para regeneradores torsiocalóricos, tomando como referência os resultados de Wang et al. (2019).

MATERIAIS E MÉTODOS

Formulação do termo fonte

A geração torsiocalórica decorre da liberação de calor latente durante a transformação martensítica induzida por deformação cisalhante. Sendo ξ a fração volumétrica transformada e Δh a entalpia específica de transformação, a geração volumétrica é proporcional à taxa de transformação.

$$Q_v(t) = \rho\, \Delta h\, \xi_\infty\, k \exp(-k\, t) = Q_0 \exp(-k\, t) \qquad (1)$$

A duração do evento mecânico foi parametrizada pelas grandezas do ensaio, conforme a equação 2, na qual φ representa a densidade de torção, L o comprimento do fio e N a taxa de rotação.

$$\Delta = \varphi\, L / N \qquad (2)$$

A amplitude não foi tratada como um parâmetro livre. Impôs-se que a integral da fonte sobre a janela finita de liberação fosse identicamente igual à energia específica medida experimentalmente, o que conduz à equação 3. A constante de decaimento foi vinculada à duração do evento pela relação k igual a três dividido por Δ, permanecendo como o único grau de liberdade do modelo.

$$Q_0 = \rho\, e\, k / [1 - \exp(-k\, \Delta)] \qquad (3)$$

Construção de domínio e malha

A construção geométrica representou os feixes de fios como cilindros equivalentes para preservar a área transversal e a massa ativa, extraindo fatias axiais de 14 mm de comprimento. A discretização do domínio foi realizada pelo método dos volumes finitos, com a malha construída de forma incremental ao longo de dez versões, isolando-se os parâmetros de qualidade por meio do Fluent Meshing e do Ansys Meshing.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema de 3 fios é provavelmente o maior feito no trabalho de Wang et al. (2019), sendo capaz de armazenar energia de uma maneira muito eficiente e rápida. Possuindo uma resposta térmica de -6,553K no instante de 0,111 segundos após a liberação de energia. Indicando que, aproximadamente 45% da capacidade de resfriamento do sistema foi transferida ao fluido e ao invólucro nesse curto período.

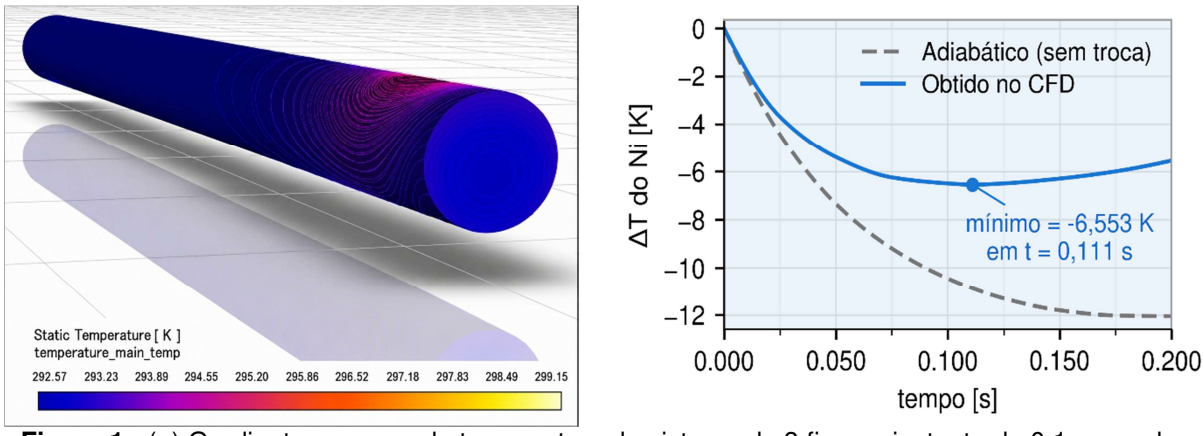


Figura 1 - (a) Gradiente e campo de temperatura do sistema de 3 fios no instante de 0,1 segundo e (b) curva de temperatura observada no volume de sólido submetido ao escoamento cruzado.

Para o sistema de 4 fios em convecção natural, observou-se a dificuldade do regenerador operar em ciclagem contínua, pois o ar parado não é capaz de rejeitar a carga térmica entre as meias-fases. Para contornar isso e reproduzir o procedimento experimental de Wang et al. (2019), que partiu do equilíbrio térmico em medições independentes, as duas metades do ciclo foram simuladas separadamente, sendo um meio ciclo de aquecimento e um meio ciclo de resfriamento. Com este modelo numérico, foi possível obter variações máximas de +37,65 e -20,67°C, resultando em desvios de apenas -0,66% e -0,63%, respectivamente, em relação aos resultados originais de Wang.

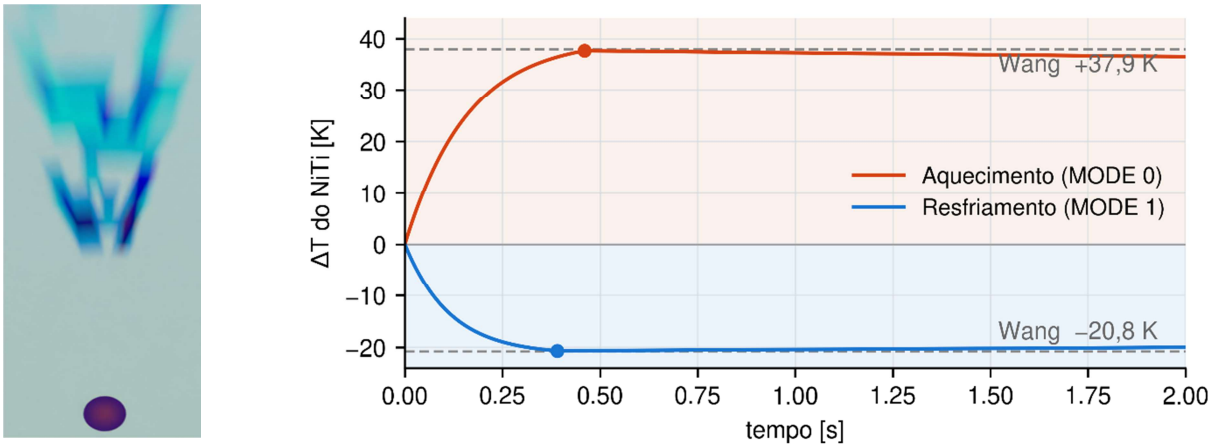


Figura 2 - (a) Pluma térmica observada na fase de resfriamento do sistema de 4 fios e (b) curvas de temperatura do volume de sólido, partindo da temperatura ambiente, em ambos os casos.

Os desvios, coeficiente de performance, dados comparativos e grandezas relacionadas, podem ser observados na tabela 1:

Tabela 1 – Resultados e grandezas comparativas.

Grandeza	Presente trabalho	Wang et al. (2019)	Desvio
ΔT de aquecimento [K]	+37,65	+37,9	–0,66 %
ΔT de resfriamento [K]	–20,67	–20,8	–0,63 %
Energia de resfriamento, 3 fios [J/g]	6,542	6,60	–0,879 %
Calor liberado em torção [J/g]	20,845	-	-
Calor absorvido em resfriamento [J/g]	11,440	-	-
Coeficiente de performance (COP)	1,216	-	-

CONCLUSÕES

O modelo reproduziu os resultados experimentais de referência com margem inferior a 1% em todas as grandezas avaliadas. A normalização por janela finita eliminou a dependência da energia entregue em relação à discretização temporal. O coeficiente de performance de 1,216, equivalente a 9,09% do limite de Carnot, situa o desempenho em um patamar compatível com o de dispositivos mecanocalóricos em estágio de demonstração. A comparação entre os regimes estabeleceu que a viabilidade da operação cíclica depende da razão entre a constante de tempo convectiva e a duração do evento mecânico, o que fundamenta numericamente o emprego de fluido em escoamento.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, à Fundação Araucária e à Universidade Estadual de Maringá pelo apoio financeiro e institucional por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS

TUŠEK, J. *et al.* Elastocaloric effect of Ni-Ti wire for application in a cooling device. **Journal of Applied Physics**, v. 117, n. 12, p. 124901, 2015.

WANG, R. *et al.* Torsional refrigeration by twisted, coiled, and supercoiled fibers. **Science**, v. 366, n. 6462, p. 216-221, 2019.

ZHAO, H.; WU, K. Experimental and numerical investigation of the transient thermal characteristics of twisted nitinol wires in a continuous torsional refrigeration system. **PLOS ONE**, v. 17, n. 11, e0277415, 2022.