

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELAGEM COMPUTACIONAL DO EFEITO JOULE NA RESISTIVIDADE DO CROMEL EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Carlos Alberto de Oliveira Filho¹ (IC), Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: Cromel. Efeito Joule. Método dos Quatro Fios. Modelagem Computacional. Resistividade.

Introdução

A resistividade elétrica é uma propriedade intrínseca dos materiais que expressa sua capacidade de resistir ao fluxo de corrente elétrica, sendo usualmente medida em ohm-metro ($\Omega \cdot m$). Ao contrário da resistência elétrica, que depende das dimensões físicas do condutor, a resistividade está relacionada apenas à natureza do material. Em ligas metálicas como o cromel, uma liga composta predominantemente por níquel e cromo, a resistividade não permanece constante, apresentando variações significativas em função da temperatura (CALLISTER, 2014). Essa dependência é particularmente relevante em aplicações que envolvem aquecimento resistivo ou fenômenos térmicos transientes, tais como sensores térmicos, sistemas de instrumentação científica e elementos de aquecimento.

A compreensão da variação da resistividade do cromel em função da temperatura é essencial para a modelagem precisa de processos térmicos e elétricos. Destaca-se, nesse contexto, a influência do efeito Joule, fenômeno físico pelo qual a passagem de corrente elétrica através de um condutor resulta na dissipação de energia sob a forma de calor. Esse aquecimento interno do material, decorrente da interação entre os elétrons livres e a rede cristalina, provoca um aumento da agitação térmica dos átomos, intensificando as colisões e, conseqüentemente, reduzindo a mobilidade eletrônica (ASHCROFT; MERMIN, 1976). Como resultado, a resistividade elétrica do material tende a aumentar com o acréscimo de temperatura, estabelecendo uma relação intrínseca entre os aspectos térmicos e elétricos do sistema.

Tal fenômeno é especialmente relevante em condições de regime transiente ou sob elevadas densidades de corrente, nas quais as variações térmicas promovidas pelo efeito Joule influenciam diretamente o comportamento elétrico do material ao longo do tempo. Assim, o conhecimento aprofundado dessa característica torna-se fundamental não apenas para assegurar a acurácia de medições experimentais, mas também para o

desenvolvimento de modelos computacionais que permitam prever, com maior precisão, a resposta eletrotérmica do material em condições operacionais variadas.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo medir a resistividade do cromel em função da temperatura, por meio de medições experimentais controladas, realizadas sob atmosfera inerte de argônio. As medidas experimentais são conduzidas utilizando o método de quatro fios, o qual proporciona elevada precisão ao minimizar os efeitos da resistência de contato, mesmo em amostras com baixa resistência elétrica. A metodologia experimental envolve a utilização de fios de cromel para a condução de corrente elétrica e para a medição da diferença de potencial, sendo a temperatura da amostra monitorada por um termopar tipo K posicionado no centro do corpo de prova.

Complementarmente, este estudo integra os resultados experimentais obtidos com uma modelagem computacional do efeito Joule, desenvolvida na plataforma COMSOL Multiphysics®, com o intuito de simular a distribuição de temperatura e as variações de resistividade ao longo do condutor submetido à passagem de corrente elétrica. A modelagem computacional proposta busca fornecer uma análise preditiva das interações eletrotérmicas no cromel, permitindo comparar os dados experimentais com os resultados simulados. Tal comparação visa validar o modelo desenvolvido e contribuir para a compreensão dos fenômenos envolvidos, além de oferecer subsídios para o aprimoramento de dispositivos e sistemas baseados em aquecimento resistivo.

Dessa forma, o presente trabalho propõe uma abordagem integrada, que articula a caracterização experimental da resistividade elétrica com a modelagem numérica do efeito Joule, de modo a fornecer uma compreensão abrangente das propriedades eletrotérmicas do cromel e a apoiar o desenvolvimento de aplicações tecnológicas que utilizam esse material.

Metodologia

Os ensaios experimentais foram conduzidos utilizando o método dos quatro fios. Nessa configuração, a corrente elétrica é aplicada por meio dos pontos A e B, enquanto a diferença de potencial é registrada entre os pontos A' e B'. Essa separação assegura maior precisão, pois elimina a contribuição da resistência de contato e das conexões elétricas na medição da tensão efetiva do corpo de prova (SMITS, 1958; VAN DER PAUW, 1958).. A disposição esquemática do circuito é apresentada na Figura 1, que evidencia a separação entre condutores de corrente e de tensão.

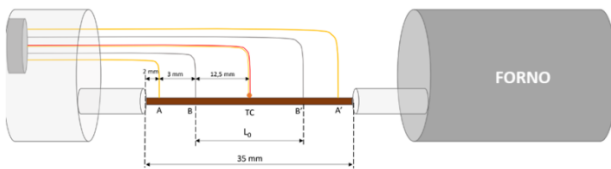


Figura 1 – Esquema do método dos quatro fios.

As amostras consistiram em fios de cromel de diâmetro padronizado, mantidos sob atmosfera inerte de argônio em um forno tubular de alta temperatura, conforme ilustrado na Figura 2. Nesse arranjo, o fio foi submetido a correntes elétricas controladas e monitorado por dois tipos de termopares: tipo S (para controle da temperatura no forno) e tipo K (fixado no centro do corpo de prova, para leitura local da temperatura).

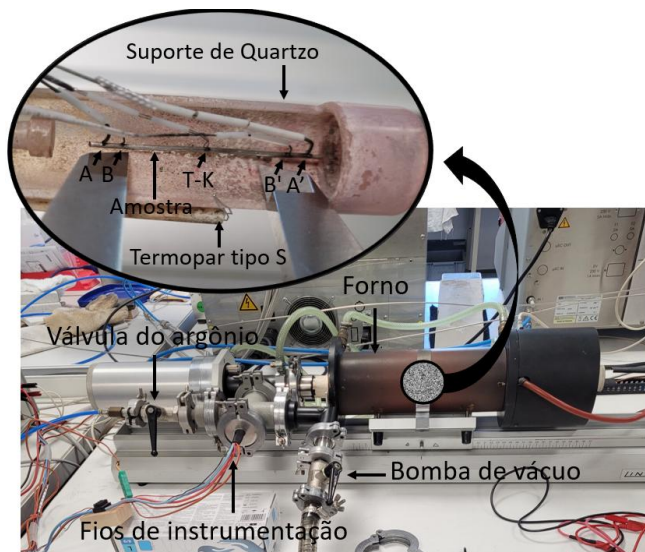


Figura 2 – Forno tubular empregado para determinação da resistividade.

Para garantir a confiabilidade da aquisição de dados,

utilizou-se a montagem mostrada na Figura 3, composta por duas representações complementares: a subfigura (a) apresenta o diagrama esquemático, com os pontos de conexão à fonte, o termopar e o sistema de aquisição de dados; a subfigura (b) mostra a montagem real, evidenciando os suportes ajustáveis que mantêm o condutor em posição durante os ensaios.

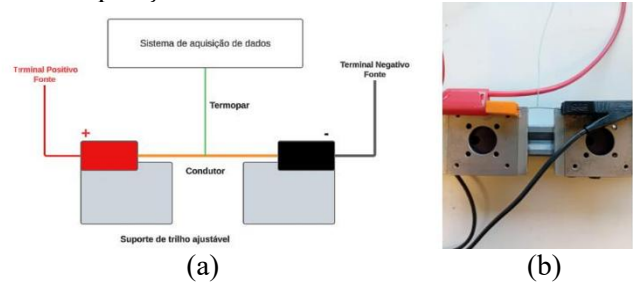


Figura 3 – Esquema ilustrativo (a) e montagem experimental real (b) do aparato utilizado para aquisição de dados.

A resistividade nominal foi calculada pela expressão:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} \quad (1)$$

em que ρ é a resistividade elétrica ($\Omega \cdot m$), R a resistência medida (Ω), A a área da seção transversal do fio (m^2) e L o comprimento útil entre os pontos de medição (m).

Para complementar os dados experimentais, desenvolveu-se um modelo computacional no software *COMSOL Multiphysics*®, simulando a distribuição de temperatura resultante do efeito Joule. A Figura 4 apresenta a geometria implementada no modelo, destacando as regiões de aplicação de corrente elétrica, as condições de troca térmica por convecção e os pontos de monitoramento de temperatura.

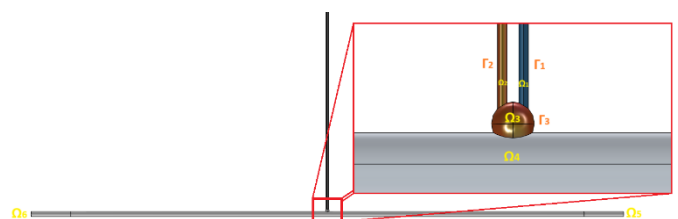


Figura 4 – Geometria do modelo no ambiente de simulação.

Essa configuração foi utilizada como base para parametrizar o modelo computacional no software *COMSOL Multiphysics*®, permitindo reproduzir numericamente as condições experimentais e avaliar a distribuição de temperatura resultante do efeito Joule.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

A simulação foi baseada na resolução da equação de condução de calor:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (2)$$

em que ρ é a densidade do material ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), c_p o calor específico ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), k a condutividade térmica ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T a temperatura (K) e $Q = J^2 \cdot \rho_e$ a geração volumétrica de calor por efeito Joule, sendo J a densidade de corrente ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$) e ρ_e a resistividade elétrica do cromel ($\Omega \cdot \text{m}$), que, por sua vez, varia com a temperatura e pôde ser modelada como uma função linear da temperatura, utilizando a seguinte equação:

$$\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (3)$$

onde $\rho(T)$ é a resistividade do material em função da temperatura T , ρ_0 é a resistividade do material a uma temperatura de referência T_0 , e α é o coeficiente de temperatura da resistividade.

Resultados e discussão

A resistividade elétrica do cromel apresentou variação crescente com a temperatura, conforme mostrado na Figura 5, que reúne os resultados experimentais obtidos em dois ciclos de aquecimento e resfriamento. Observa-se que os valores seguem uma tendência aproximadamente linear até cerca de 500 °C, a partir da qual surgem pequenas não linearidades, possivelmente associadas a efeitos microestruturais e à intensificação da difusão atômica.

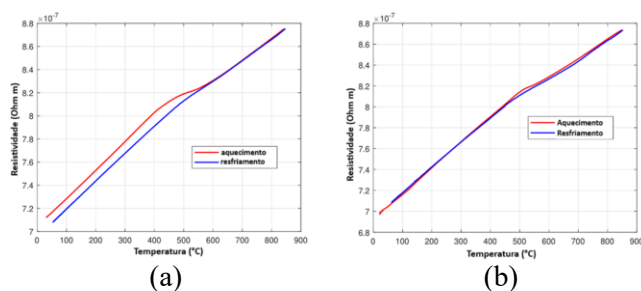


Figura 5 – Resistividade do cromel em função da temperatura durante o primeiro (a) e o segundo (b) ciclos de aquecimento e resfriamento.

Os ciclos de aquecimento (curvas em vermelho) e resfriamento (curvas em azul) revelam uma discreta histerese térmica, principalmente no primeiro ensaio,

sugerindo influência de tensões internas e da acomodação da liga sob gradiente térmico. No segundo ciclo, essa diferença é atenuada, indicando maior estabilidade do material após a primeira exposição.

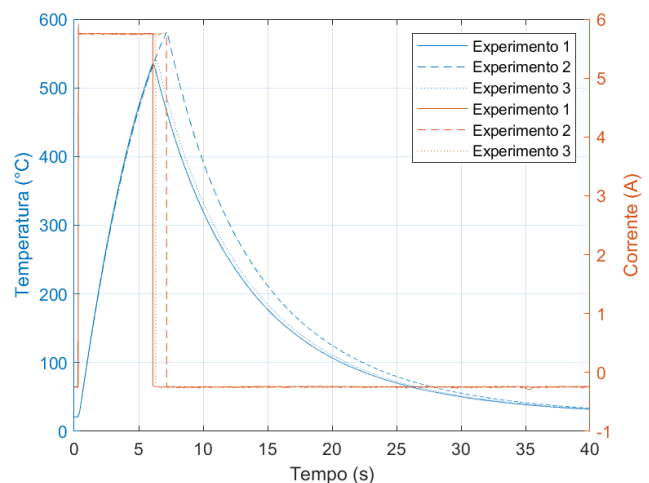
Comparando-se os valores experimentais com dados da literatura, como os reportados por Smits (1958) e Faria et al. (2025), observa-se boa concordância na ordem de grandeza da resistividade e no coeficiente de variação com a temperatura. A literatura reporta valores próximos a $7 \cdot 10^{-7}$ ($\Omega \cdot \text{m}$) à temperatura ambiente e tendências lineares até aproximadamente 800 °C, consistentes com os resultados obtidos neste trabalho.

A incerteza relativa da resistividade elétrica calculada é expressa como:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta(\Delta U)}{\Delta U} + \frac{\Delta I}{I} + 2 \cdot \frac{\Delta D_0}{D_0} + \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (4)$$

onde o comprimento L_0 pode ser estimada como 1 mm devido ao erro instrumental na medição de comprimento. Isso corresponde a uma incerteza na resistividade elétrica na ordem de 2,8% para a amostra de 35 mm. As incertezas nas medições elétricas são avaliadas com base nas características dos dispositivos de medição. Para a incerteza na diferença de potencial ΔU , considera-se a faixa de medição do dispositivo (0,1 V), onde $\Delta U = (0,003\% \cdot U) + (0,003\% \cdot 0,1)$ e $\Delta I = (0,15\% \cdot I) + 0,005$.

A Figura 6 apresenta a comparação entre os resultados experimentais (a) e a simulação numérica no *COMSOL Multiphysics*® (b). Nota-se que ambos os conjuntos de dados apresentam comportamento semelhante, com erro relativo médio de aproximadamente 5,9%, considerado satisfatório em função das simplificações adotadas no modelo.



(a)

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

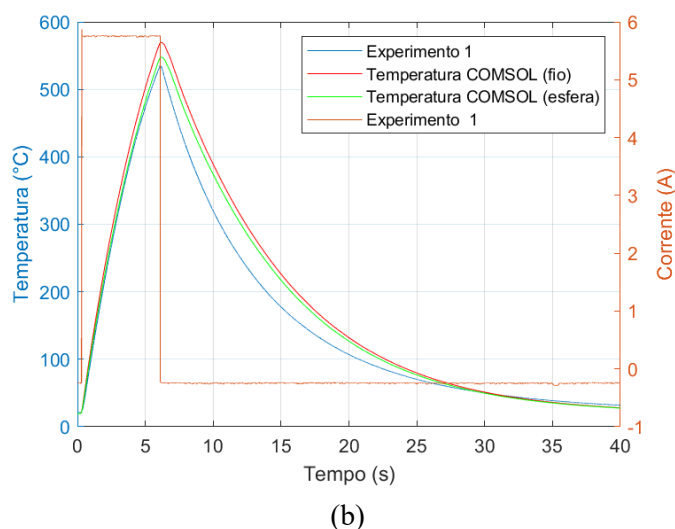


Figura 6 – Comparação entre resultados experimentais (a) e simulação numérica no COMSOL (b) para a resistividade do cromel em função da temperatura.

A discrepância observada pode ser atribuída principalmente à ausência de perdas radiativas no modelo computacional, que se tornam relevantes em altas temperaturas, e às incertezas experimentais, estimadas em $\sim 2,8\%$. Essa ordem de grandeza de erro é aceitável para validação de modelos de condução eletrotérmica em ligas metálicas (POPOV, 2004).

De forma geral, os resultados confirmam que o modelo numérico é capaz de reproduzir satisfatoriamente o comportamento eletrotérmico do cromel, validando seu uso como ferramenta de predição em condições práticas de operação. Além disso, evidenciam o potencial do cromel em aplicações industriais como termopares, sensores de temperatura de precisão e resistores de aquecimento, nos quais a previsibilidade da resistividade em função da temperatura é crucial para o desempenho confiável.

Conclusões

O presente trabalho apresentou uma abordagem integrada para a caracterização da resistividade elétrica do cromel em função da temperatura, combinando ensaios experimentais controlados com simulação numérica no *COMSOL Multiphysics*®. Os resultados obtidos demonstraram boa concordância entre as duas metodologias, com erro relativo médio de aproximadamente $5,9\%$, valor compatível com as incertezas experimentais estimadas em $\sim 2,8\%$.

A análise evidenciou o aumento da resistividade com a temperatura, bem como a ocorrência de discreta histerese entre os ciclos de aquecimento e resfriamento, fenômeno que se atenuou após a primeira exposição térmica. Esses achados corroboram dados da literatura e reforçam a validade do modelo numérico proposto, ainda que simplificações como a ausência de perdas radiativas imponham limitações à simulação em altas temperaturas. Do ponto de vista científico e tecnológico, os resultados obtidos contribuem para o avanço na compreensão do comportamento eletrotérmico do cromel, validando o uso de modelagem computacional como ferramenta complementar a medições experimentais. Além disso, oferecem subsídios para aplicações práticas em termopares, sensores de precisão e resistores de aquecimento, nos quais a previsibilidade da resistividade é essencial para garantir desempenho confiável e otimização de projetos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UNIFEI, CNPq, CAPES, e FAPEMIG pelo financiamento e viabilização do devido processo institucional em prol da Educação e da Ciência.

Referências

- ASHCROFT, N. W.; MERMIN, N. D. *Solid State Physics*. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976.
- CALLISTER, W. D. *Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- FARIA, Fábio Silva et al. Estimating thermal efficiency of a self-developed capacitor discharge welding equipment through nonlinear function specification method. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 208, p. 109422, 2025.
- POPOV, B. N. *Corrosion Engineering: Principles and Practice*. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- SMITS, F. M. Measurement of Sheet Resistivities with the Four-Point Probe. *Bell System Technical Journal*, v. 37, n. 3, p. 711-718, 1958.
- VAN DER PAUW, L. J. A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape. *Philips Research Reports*, v. 13, n. 1, p. 1-9, 1958.