

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

Carlos Alberto de Oliveira Filho, carlos1001psoliveira@gmail.com.br
Fabio Silva Faria, fabiofaria@unifei.edu.br
Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva, metrevel@unifei.edu.br

Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Laboratório de Transferência de Calor – LabTC, Campus Prof. José Rodrigues Seabra, Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá - MG, CEP 37500-90*3

Resumo. A resistividade elétrica de materiais metálicos é uma propriedade fundamental para o entendimento de processos eletrotérmicos, sendo diretamente influenciada pela temperatura. Este trabalho tem como objetivo definir a resistividade do cromel, liga composta por níquel e cromo, em função transiente da temperatura, por meio de medições experimentais controladas sob atmosfera inerte de argônio. As medições foram realizadas pelo método de quatro fios, utilizando fios de cromel e monitoramento da temperatura com termopar tipo K, de modo a minimizar erros associados à resistência de contato. Complementarmente, foi desenvolvida uma modelagem computacional do efeito Joule na plataforma COMSOL Multiphysics®, visando simular a distribuição de temperatura e os gradientes de resistividade no material durante a passagem de corrente elétrica. Os resultados experimentais foram comparados com os dados obtidos por simulação, permitindo validar o modelo proposto e fornecer subsídios para a compreensão integrada das propriedades eletrotérmicas do cromel. O estudo contribui para o aprimoramento de aplicações tecnológicas que empregam cromel, além de oferecer uma abordagem metodológica combinando experimentação e modelagem numérica.

Palavras chave: Resistividade elétrica, Efeito Joule, Cromel, Método de quatro fios, Modelagem computacional.

Abstract. The electrical resistivity of metallic materials is a fundamental property for understanding electrothermal processes, being directly influenced by temperature. This study aims to estimate the resistivity of chromel, an alloy primarily composed of nickel and chromium, as a time dependent function of temperature through controlled experimental measurements under an inert argon atmosphere. The measurements were performed using the four-point probe method, employing chromel wires and temperature monitoring with a type K thermocouple, in order to minimize errors associated with contact resistance. Additionally, a computational model of the Joule heating effect was developed using the COMSOL Multiphysics® platform to simulate the temperature distribution and resistivity gradients within the material under electrical current flow. The experimental results were compared with the simulated data, allowing the validation of the proposed model and providing insights into the integrated electrothermal behavior of chromel. This study contributes to the improvement of technological applications based on chromel and offers a methodological approach that combines experimental characterization with numerical modeling.

Keywords: Electrical resistivity, Joule heating, Chromel, Four-point probe, Computational modeling.

1. 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. 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. 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 desse comportamento 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.

2. METODOLOGIA

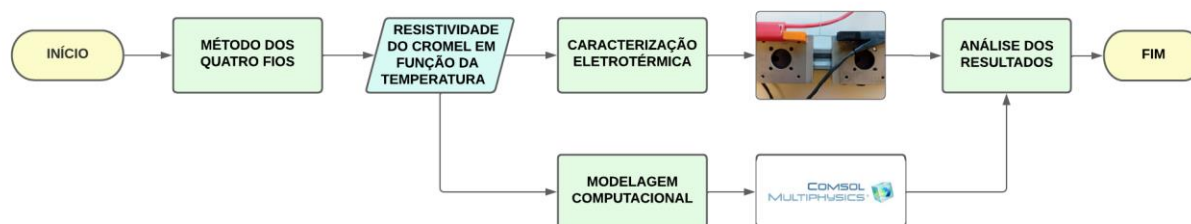


Figura 1. Fluxograma organizacional da metodologia.

A Figura 1 apresenta o fluxograma geral da metodologia adotada neste trabalho, integrando as etapas experimentais e computacionais. O procedimento envolve a medição da resistividade do cromel pelo método das quatro pontas, a caracterização eletrotérmica da amostra e o desenvolvimento de uma modelagem computacional no COMSOL Multiphysics®. Os dados obtidos são então analisados de forma integrada, conforme representado no diagrama.

2.1. Procedimentos experimentais

2.1.1 Determinação da Resistividade

Para a realização das medições da resistividade elétrica do cromel em função da temperatura, foi empregado um dispositivo experimental baseado no método de quatro fios. Esse método é amplamente reconhecido por sua capacidade de minimizar os erros relacionados à resistência de contato e à resistência dos cabos de ligação (VAN DER PAUW, 1958; SMITS, 1958). O corpo de prova, confeccionado em cromel, apresenta comprimento de 35 mm e foi posicionado em um suporte de quartzo dentro do forno tubular utilizado para o aquecimento, conforme ilustrado na Figura 2.

O forno tubular é equipado com resistências elétricas dispostas ao redor de um tubo interno de sílica, garantindo a uniformidade da temperatura na zona de medição. Esse tubo interno é conectado a um tubo de aço, o qual está acoplado a um sistema de purga com argônio, permitindo a manutenção de uma atmosfera inerte durante os experimentos. A utilização de atmosfera inerte é essencial para evitar a oxidação da amostra em temperaturas elevadas, conforme recomendado na literatura para análises de propriedades elétricas de ligas metálicas (CALLISTER, 2014).

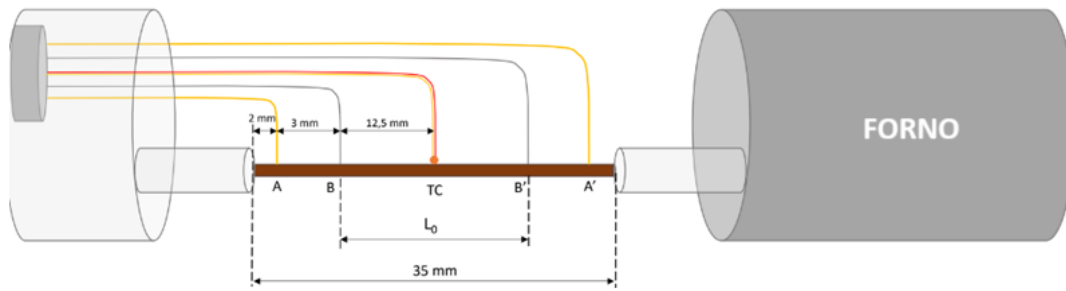


Figura 2. Esquema do método dos quatro fios.

O controle da temperatura da amostra foi realizado por meio de um termopar tipo S, posicionado próximo ao corpo de prova dentro do forno, permitindo o monitoramento preciso da variação térmica ao longo do experimento. O sistema de controle térmico foi automatizado através de um regulador de temperatura conectado a um computador, no qual foi programado o ciclo térmico desejado.

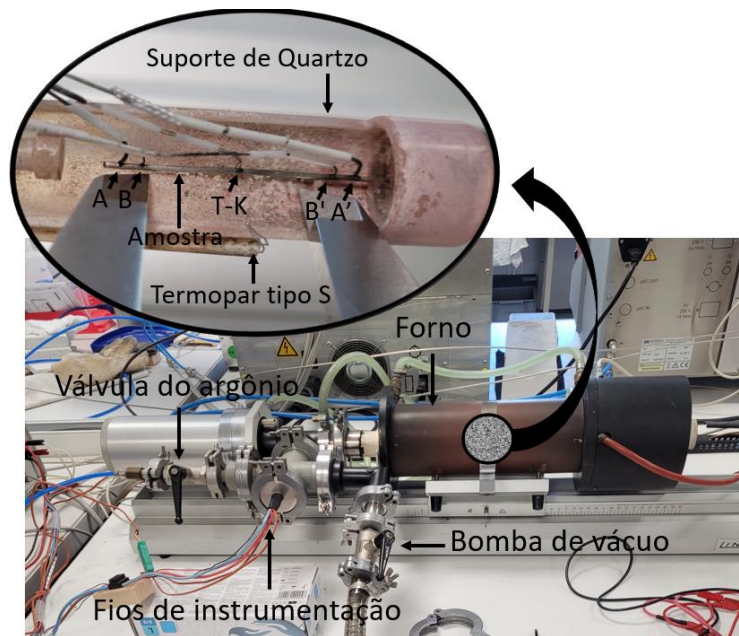


Figura 3. Estrutura do forno tubular.

A Figura 3 ilustra o aparato experimental do laboratório da *Université Bretagne Sud* (UBS), na França. A injeção de corrente elétrica no corpo de prova foi feita utilizando uma fonte de alimentação de corrente contínua Agilent E3644A (20 V, 4 A), configurada para fornecer um valor constante de 1 A. A diferença de potencial gerada entre os pontos de medição foi registrada por meio de um sistema de aquisição de dados Agilent E34970A, que também monitorou simultaneamente a leitura da temperatura. Os dados foram coletados e processados com o auxílio de um software desenvolvido em VBA para Excel, permitindo a aquisição contínua e o tratamento dos sinais elétricos e térmicos durante o experimento.

Para garantir a acurácia das medições e eliminar potenciais interferências causadas por forças termoeletrônicas espúrias, foi utilizada a técnica de inversão de corrente, na qual as medições são feitas com alternância da polaridade da corrente elétrica (Figura 4). Esse procedimento permite a anulação de tensões parasitas de origem térmica, garantindo que a diferença de potencial registrada seja exclusivamente atribuída ao efeito resistivo do material (POPOV, 2004).

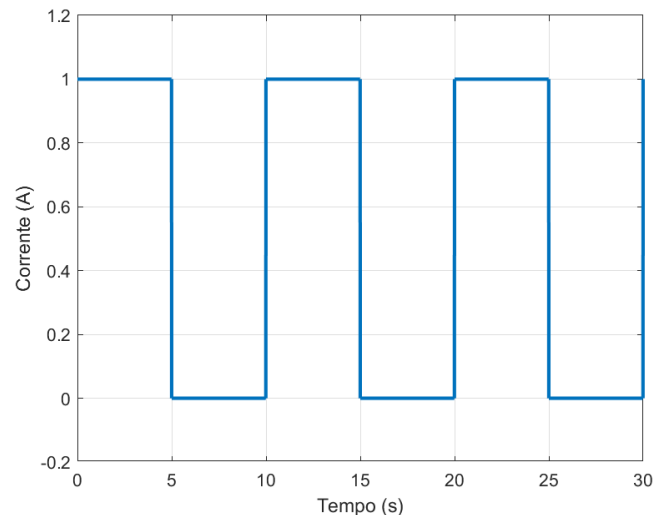


Figura 4. Sinal de corrente de onda quadrada aplicado ao fio.

A resistividade elétrica foi determinada a partir da resistência elétrica obtida experimentalmente, considerando a geometria do corpo de prova e aplicando a equação:

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

em que ρ representa a resistividade elétrica, R é a resistência medida, A corresponde à área da seção transversal da amostra e L é o comprimento da região entre os pontos de medição de tensão. Essa equação encontra respaldo na lei de Ohm generalizada para condutores homogêneos de seção uniforme (ASHCROFT; MERMIN, 1976).

Dessa forma, o presente procedimento experimental possibilitou a obtenção de valores da resistividade elétrica do cromel ao longo de um intervalo de temperaturas, constituindo a base para a posterior análise comparativa com os resultados oriundos da modelagem computacional.

2.1.2 Análise do Efeito Joule

Complementarmente ao experimento de resistividade do cromel, realizou-se um ensaio para caracterizar o Efeito Joule, que contou com o auxílio de um sistema de aquisição de dados, um termopar tipo K, uma fonte, uma amostra de cromel de 52 milímetros, suportes com presilhas de trilho ajustável, e ferramentas para soldagem.

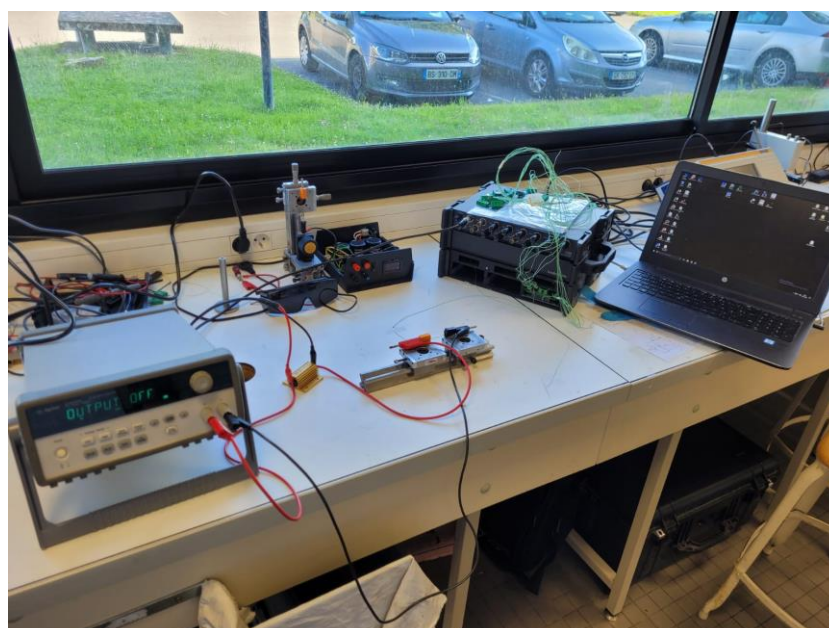


Figura 5. Montagem do aparato.

Para a fixação do termopar no fio condutor utilizou-se uma solda de descarga capacitiva com o auxílio de um microscópio (Figura 6). Por meio deste método de soldagem, foi possível obter maior versatilidade e precisão ao posicionar o termopar em uma região média ao longo do comprimento do fio.

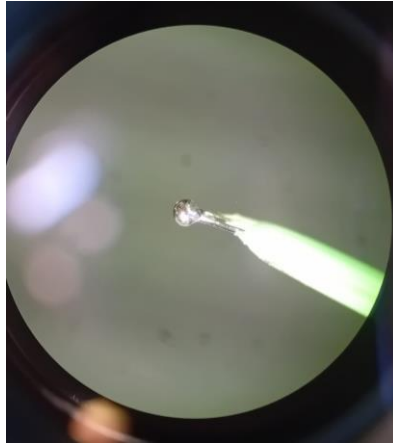


Figura 6. Esfera de fixação do termopar no condutor.

Desse modo, o termopar foi soldado em uma extremidade no fio condutor e conectado no sistema de aquisição de dados para o monitoramento do Efeito Joule após a aplicação de uma diferença de potencial V igual à 7.7 Volts. Sendo assim, foram captadas as medidas de temperatura da amostra de cromel. A fonte de calor do sistema é assumida constante e tem duração de aproximadamente 6s. Após esse intervalo, o aparato elétrico é desligado e a amostra entra em regime de resfriamento. Por conseguinte, os dados são recolhidos, filtrados, e submetidos à análise.

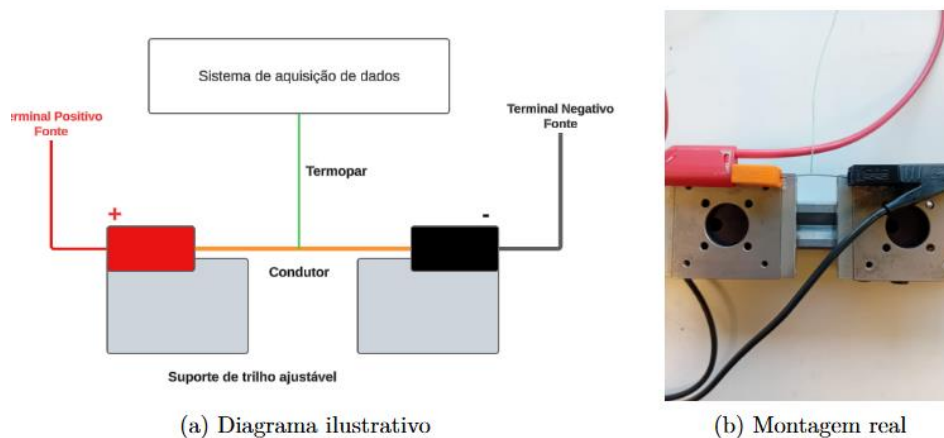


Figura 7. Arranjo experimental.

2.2. Modelagem Computacional

A modelagem computacional foi realizada utilizando o COMSOL Multiphysics® (Figura 8), com o objetivo de simular o comportamento térmico e elétrico do cromel, levando em consideração as condições experimentais e a geometria real da amostra. A intenção foi ser o mais fiel possível ao cenário real, reproduzindo com precisão as condições de contorno e as interações entre as propriedades elétricas e térmicas do material. A geometria do modelo foi construída com base nas dimensões reais da amostra. A modelagem considerou o aquecimento resistivo causado pela passagem de corrente elétrica através do cromel, bem como a condução de calor devido à variação de temperatura ao longo do material.

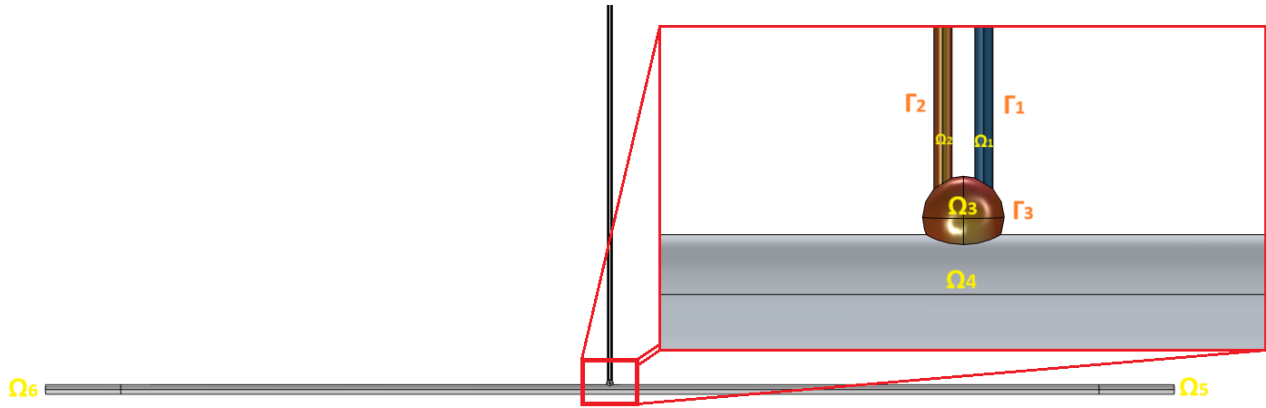


Figura 8. Geometria do modelo no ambiente de simulação.

No que diz respeito às equações analíticas, foram utilizados diferentes domínios Ω_n , e condições de contorno Γ_n para modelar o comportamento transiente de cada elemento do sistema (Figura 8).

$$\rho_d(T)c_{pm}\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_m \nabla T) + Q_J(t) \quad (5)$$

A Equação 5 representa a distribuição de temperatura T no domínio do fio condutor (Ω_4), onde estão presentes ambos termos de condução de calor e de geração por efeito joule Q_J em função do tempo t . Além disso, k denota a condutividade térmica, c_p o calor específico, T a temperatura, e ρ_d a densidade do material.

$$\rho_d(T)c_{pm}\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_m \nabla T) \quad (6)$$

De forma análoga, a Equação 6 evidencia a distribuição de temperatura nas extremidades do fio (Ω_5 e Ω_6), e esfera (Ω_3).

Uma vez definidas as equações de transferência para seus respectivos domínios, faz-se necessário igualmente definir as condições de contorno:

$$-k_m \nabla T \cdot \mathbf{n} = h(T - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4) \quad (7)$$

$$T(x, y, z, t) = T_\infty \quad (8)$$

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (9)$$

O domínio considerado encontra-se inicialmente a uma temperatura uniforme de $T_0 = 25^\circ\text{C}$, a qual também corresponde à temperatura do ambiente T_∞ . Todas as superfícies expostas dos fios condutores e da esfera de solda estão sujeitas a condições de contorno que envolvem simultaneamente convecção e radiação térmica. Nessas expressões, $\mathbf{n}$ representa o vetor normal orientado para fora da superfície, h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e ε refere-se à emissividade superficial. Neste estudo, não se consideraram os efeitos convectivos associados a fatores como soldagem por arco elétrico, presença de gases, rápida elevação de temperatura ou à espessura reduzida dos fios. Dessa forma, adotou-se um valor constante para o coeficiente convectivo, sendo $h = 20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

3. RESULTADOS

O comportamento da resistividade elétrica do cromel em função da temperatura, no intervalo de 25°C a 850°C , encontra-se representado na Figura 9. Os valores de resistividade medidos variaram entre $7,10 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ e $8,73 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$. Verifica-se uma variação não linear da resistividade em torno de 500°C durante o processo de aquecimento, característica que não se repete na fase de resfriamento. Diante dessa constatação, uma segunda coleta de dados foi realizada utilizando a mesma amostra, cujos resultados são apresentados na Figura 10. Nessa nova medição, as curvas de resistividade obtidas durante o aquecimento e o resfriamento mostraram-se semelhantes entre si, com valores equivalentes à fase de resfriamento do experimento inicial. Esse fenômeno também indica um possível desafio na utilização de termopares de cromel para medição de temperatura, uma vez que, após o primeiro aquecimento acima de 500°C , a alteração na resistividade do material pode comprometer a calibração do termopar em aplicações subsequentes em altas temperaturas.

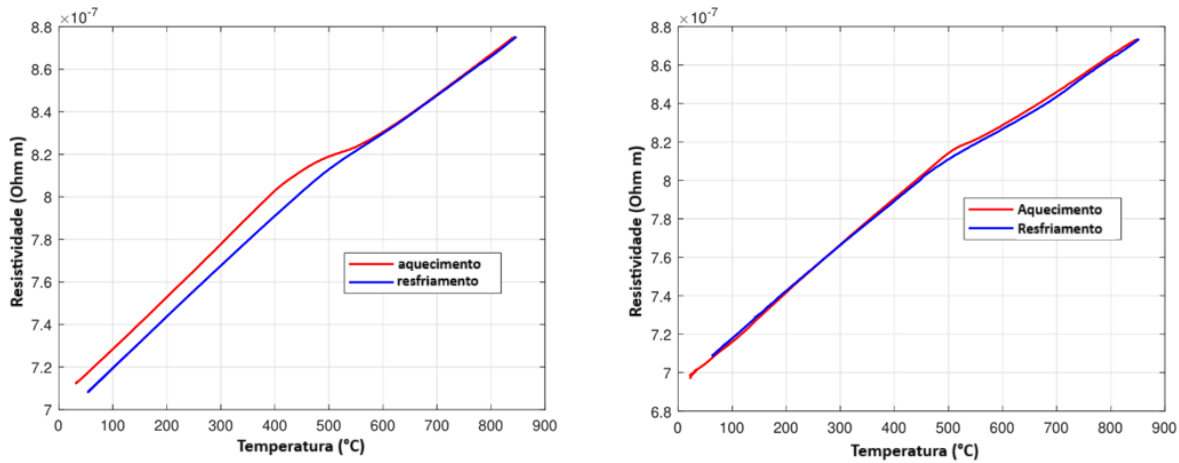


Figura 9. Resistividade do Cromel em função da temperatura no primeiro (esquerda) e segundo (direita) ciclos de aquecimento.

A incerteza relativa da resistividade elétrica calculada é expressa como:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta(\Delta U)}{\Delta U} + \frac{\Delta I}{I} + 2 \frac{\Delta D_0}{D_0} + \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (10)$$

A incerteza no 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:

$$\Delta U = (0,003\% \cdot U) + (0,003\% \cdot 0,1) \quad (11)$$

$$\Delta I = (0,15\% \cdot I) + 0,005 \quad (12)$$

Com base no sistema de aquisição de dados apresentado na Seção 2.1.2, juntamente com o auxílio da ferramenta Matlab®, foram traçadas as curvas experimentais. Além disso, a partir das equações descritas na Seção 2.2, igualmente foram obtidos os gráficos analíticos. Para fins de análise, plotou-se também a curva da corrente elétrica para identificar com precisão o instante de interrupção de fornecimento de energia, e assim, analisar o comportamento subsequente dos regimes de resfriamento.

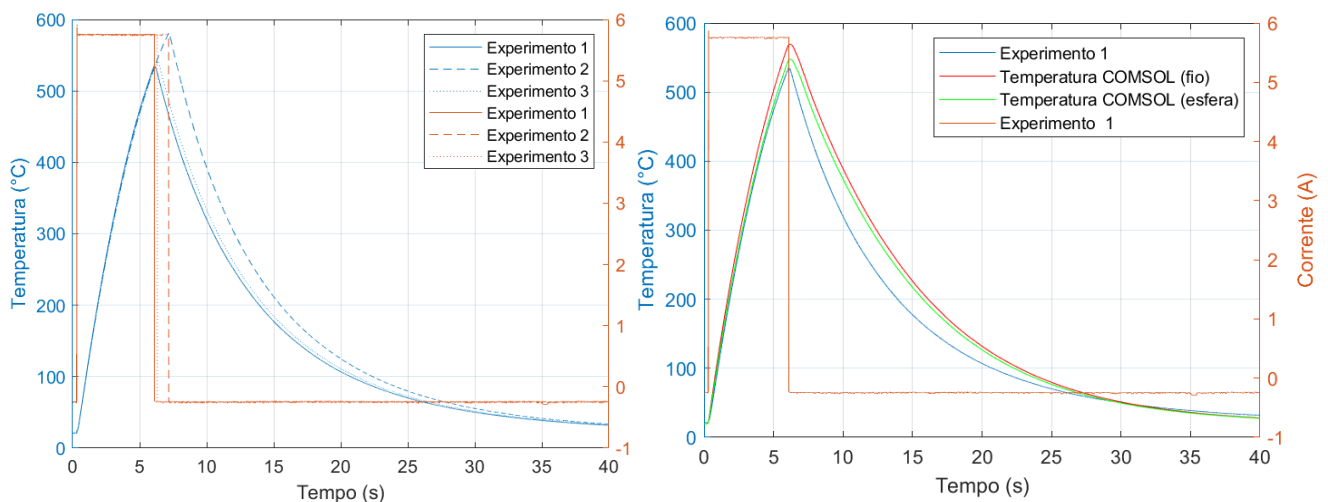


Figura 10. Gráfico da temperatura em função do tempo do cromel para diferentes ciclos de aquecimento

Na Figura 10, observa-se que, à medida que os ciclos de aquecimento e resfriamento se repetem, a temperatura do cromel aumenta significativamente para uma carga elétrica semelhante, evidenciando a variação da resistividade ao longo do tempo. Este comportamento sugere que, conforme o material aquece e resfria, a resistividade se altera, o que é consistente com o fato de que a resistividade de materiais metálicos como o cromel é dependente da temperatura. Esse efeito é particularmente relevante para a modelagem de sistemas que envolvem aquecimento resistivo, como é o caso do cromel em sensores térmicos e outros dispositivos que operam em condições de variação térmica.

Ainda na Figura 10 (a direita), é apresentado o comparativo entre a curva experimental (em azul) e os valores simulados pela modelagem computacional (curvas vermelha e verde). Nessa comparação, observa-se que a diferença entre os picos das curvas vermelha e azul resulta em um erro máximo da ordem de 5,93%, o que é considerado um valor satisfatório, indicando uma boa concordância entre os dados experimentais e os resultados da modelagem. Esse nível de precisão valida a abordagem computacional utilizada para simular o comportamento térmico e elétrico do cromel. Adicionalmente, é notável que, em uma perspectiva transiente, os elementos "fio" e "esfera" apresentam temperaturas distintas. Esse comportamento é um ponto que pode ser investigado mais profundamente em estudos futuros, especialmente no que diz respeito a como essa discrepância pode ser corrigida em termopares, a fim de aprimorar a precisão das medições de temperatura em sistemas que envolvem esse tipo de dispositivo.

4. CONCLUSÕES

Através da análise dos dados experimentais obtidos por meio do método das quatro pontas e da modelagem computacional com o COMSOL Multiphysics®, foi possível observar uma boa concordância entre as duas abordagens. A análise dos gráficos demonstrou que, à medida que os ciclos de aquecimento e resfriamento se repetem, a temperatura do cromel aumenta significativamente para uma carga elétrica semelhante, evidenciando a variação da resistividade com a temperatura. A modelagem computacional foi capaz de simular esse comportamento de maneira precisa, com um erro máximo entre os dados experimentais e simulados de aproximadamente 5,93%. Adicionalmente, foi observado que a temperatura dos elementos "fio" e "esfera" no sistema modelado apresentaram uma discrepância transiente, o que abre um campo de investigação interessante para estudos futuros, visando compreender as causas dessa diferença e propor soluções, especialmente em termopares, onde a precisão da medição de temperatura é essencial. Em termos gerais, os resultados obtidos neste trabalho contribuem para um entendimento mais profundo do comportamento eletrotérmico do cromel e sua aplicação em sistemas de aquecimento resistivo.

5. AGRADECIMENTOS

Presto meus sinceros agradecimentos ao meu orientador Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva, pela confiança e devido direcionamento durante o período vigente, bem como pelo conhecimento transmitido dentro de sala de aula.

Ao Dr. Fábio Faria pela supervisão, aconselhamento e companhia durante os trabalhos realizados no Laboratório de Transfêrência de Calor e no Laboratório do Instituto Universitário de Tecnologia de Lorient.

Ao CNPq, CAPES, e FAPEMIG pelo financiamento e viabilização do devido processo institucional em prol da Educação e da Ciência.

6. 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.
- 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.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.