



Estudo comparativo entre o método experimental e simulação computacional para a determinação da resistividade elétrica em uma amostra de cobre

K J Oliveira^{1,2} e J R Cardoso²

¹ Laboratório de Usos Finais e Gestão de Energia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 05508-901, Brasil

² Escola Politécnica Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 05508-010, Brasil

kleberjo@ipt.br

Resumo. A determinação da resistividade elétrica é uma importante característica dos materiais, visto que materiais diferentes também apresentam valores diferentes de resistividade. Esses valores podem indicar se o material é condutor, antiestático ou isolante. O principal objetivo deste artigo é realizar um estudo comparativo entre os ensaios de laboratório para a determinação da resistividade elétrica em uma amostra de cobre, material condutor, e uma simulação computacional utilizando a mesma geometria e características intrínseca do cobre. Os resultados se mostraram apropriados.

1. Introdução

A avaliação da resistividade elétrica é feita com base na técnica de quatro eletrodos (Wenner), e com aplicação em corpos de prova (CP) de diferentes concepções e de dimensões significativas. Conforme a técnica adotada e a condição do corpo de prova utilizado, erros podem ser introduzidos nas leituras, sendo os mesmos pouco discutidos e considerados nas avaliações dos materiais. Além disso, é usual que os resultados obtidos de resistividade elétrica sejam comparados com outros obtidos com a aplicação de outra técnica ou com metodologia e equipamentos distintos e, portanto, com diferenças que comprometem a avaliação deste importante parâmetro.

A medida principal que será abordada neste artigo é a resistência elétrica, com ela, e a geometria dos materiais, será determinada a resistividade elétrica.

Os materiais podem ser classificados de acordo com sua condutividade elétrica σ , expressa em siemens por metro (S/m), como condutores, ou não condutores, ou ainda, do ponto de vista técnico, como metais ou isolantes (dielétricos) [1, 2]. Um material com elevada condutividade é referido como condutivo, enquanto um material com baixa condutividade é referido como isolante. Um material cuja condutividade está entre o condutivo e o isolante é denominado semicondutor / antiestático.

Microscopicamente, a diferença mais significativa entre metal e isolantes reside na quantidade de elétrons disponíveis para a condução de corrente elétrica. Os materiais dielétricos têm poucos elétrons disponíveis para a condução de corrente elétrica, ao contrário dos metais, os quais têm elétrons livres em abundância.

Os métodos de simulação utilizando computadores permitem a análise de campos eletromagnéticos quando uma solução analítica é impossível.

Dentre os diversos métodos disponíveis para a simulação computacional, será utilizado como referência os Métodos dos Elementos Finitos MEF.

O uso do MEF para este trabalho se deve à sua capacidade de desenvolver e resolver problemas eletromagnéticos com base nas leis básicas do eletromagnetismo, equações de Maxwell. Avanços significativos ocorreram quando as estações de trabalho de alto desempenho surgiram na década de 1980. Essas estações de trabalho possuíam computação gráfica de alto desempenho e facilitavam a análise da resolução de problemas por meio de imagens. Como resultado, houve a redução no tempo de projeto, soluções mais confiáveis, redução no número de protótipos e integração com outros sistemas produtivos. Assim o uso do MEF está intimamente ligado aos recursos computacionais que possibilitarão, com velocidade impressionante, a resolução de grandes equações e sistemas lineares, o que viabilizou a análise de um maior número de alternativas de projetos em um curto espaço de tempo com precisões nunca antes alcançadas [3].

O artigo possui o desafio de adotar parâmetros na simulação que possam representar as características da amostra metálica e comparar os resultados obtidos com os valores reais obtidos nos corpos de prova.

2. Metodologia

Para uma definição da resistência elétrica, considerar a explanação abaixo.

Considere a resistência elétrica de um cilindro de seção transversal S e altura l , confeccionado com material condutor de condutividade σ . A

Figura 1 mostra um resistor cilíndrico.

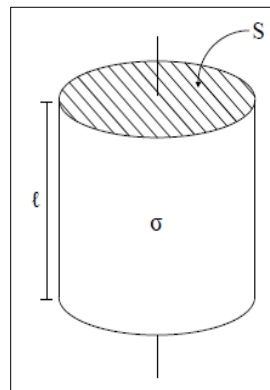


Figura 1. Resistor cilíndrico

Vamos calcular o fluxo do vetor densidade de corrente sobre uma superfície envolvendo o contato superior.

Pela equação da continuidade, temos:

$$I = \int \vec{j} \cdot \vec{dS} \quad (1)$$

Como, na face inferior da superfície, a distribuição de corrente é uniforme, isto é, o vetor densidade de corrente é o mesmo em todos os pontos dessa face, resulta:

$$I = J \cdot S \quad (2)$$

A diferença de potencial entre os contatos é dada por:

$$V_0 = V_B - V_A = - \int_A^B \vec{E} \cdot \vec{dl} \quad (3)$$

Considerando o campo elétrico no interior do condutor é uniforme em toda a sua extensão, a expressão anterior se reduz a:

$$V_0 = E \cdot l \quad (4)$$

Lembrando a relação constitutiva $J = \sigma E$, a expressão anterior pode ser escrita como segue:

$$V_0 = \frac{J}{\sigma} l \quad (5)$$

Desse modo a resistência do cilindro será dada por:

$$R = \frac{V_0}{I} = \frac{\left[\left(\frac{J}{\sigma}\right) \cdot l\right]}{J \cdot S} = \frac{l}{\sigma \cdot S} \quad (6)$$

Como a condutividade é o inverso da resistividade elétrica, a expressão pode ser reescrita conforme abaixo:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (7)$$

A resistividade elétrica é determinada pela definição da fórmula (7), isolando-se a resistividade, temos:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} \quad (8)$$

Onde:

ρ = resistividade elétrica

R = resistência elétrica

S = área da seção transversal

l = comprimento

As resistências elétricas serão expressas em ohms (Ω), as dimensões geométricas em metros (m), as áreas em metros quadrados (m^2), resistividades em ohms metro ($\Omega \cdot m$).

2.1. Método experimental

Os ensaios são realizados conforme [4, 5]. A resistividade elétrica volumétrica é uma característica do material, determinada através da resistência à passagem de corrente elétrica contínua entre dois pontos distintos da superfície do material ou entre dois pontos localizados transversalmente as duas faces do material.

Para esta análise são utilizados os seguintes equipamentos calibrados:

- Ponte de Kelvin;
- Medidor de temperatura e umidade relativa do ar;
- Escala de aço.

Foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos de uma amostra de cobre puro, com diâmetro de 0,0508 m (2 pol.) e comprimento de 1 metro, conforme Figura 2 e Figura 3.

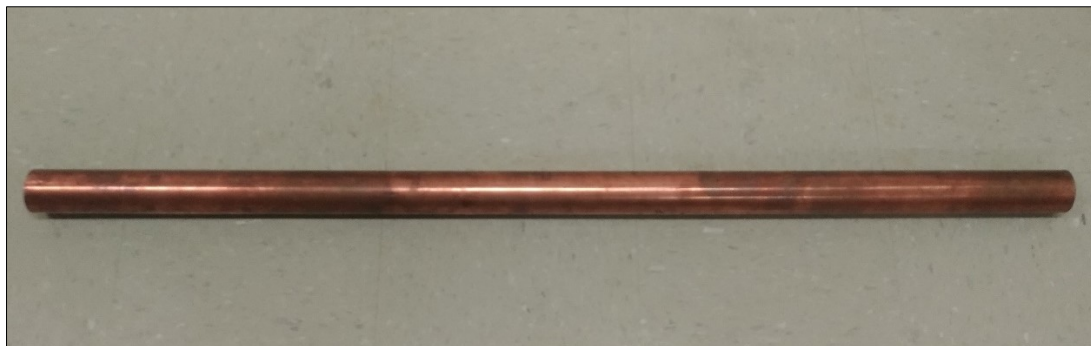


Figura 2. Amostra de cobre (comprimento)



Figura 3. Amostra de cobre (diâmetro)

Passou-se uma corrente elétrica através do corpo-de-prova (CP). Utilizando a ponte de Kelvin, mediu-se a resistência elétrica (Ω) entre dois pontos distantes sobre a superfície do material.

O valor da resistividade elétrica volumétrica foi obtido de acordo com a fórmula (8) na unidade de medida $\Omega \cdot m$.

2.2. Simulação computacional

Segue abaixo uma breve descrição das etapas para realizar uma simulação 3D utilizando o programa Flux Altair:

1. Elaborar o desenho do material.
2. Definir as condições de contorno, utilizando uma caixa externa ao material, *InfiniteBox*.
3. Cria-se a malha para cálculo “*Mesh*”.
4. Determinar o tipo de análise (magnético, eletrostático, fluxo de calor ou fluxo de corrente). Nesta avaliação foi utilizado o fluxo de corrente.
5. Definir a física envolvida, criar os materiais, nesta aplicação, o cobre e a região do *InfiniteBox*.
6. Atribuir nos volumes nos materiais definidos.
7. Atribuir a tensão elétrica nas faces das extremidades.
8. Realiza-se o processamento, depois a visualização e análise do problema.

3. Resultados

No presente item, são contemplados os resultados da resistividade elétrica experimental na amostra de cobre e simulação computacional comparativa.

3.1. Método experimental

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos nos ensaios realizados no laboratório.

Tabela 1. Resultados

Material	Resistência elétrica a 20 °C ($\mu\Omega$)	Resistividade elétrica a 20 °C ($\mu\Omega \cdot m$)	
Amostra de cobre	CP 1	8,30	0,01682
	CP 2	8,32	0,01686
	CP 3	8,28	0,01678
	Média	8,30	0,01682

Incerteza da medição da resistividade elétrica: $\pm 0,4 \%$.

3.2. Simulação computacional

Após desenho completo do material, foi criada a malha automática em todo o domínio, material e o *InfiniteBox* (cilindro externo). É possível observar em detalhes na Figura 4, todo o domínio, e na Figura 5, o detalhe na ponta do material.

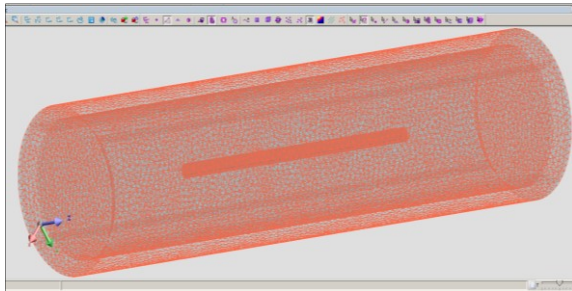


Figura 4. Malha em todo o domínio

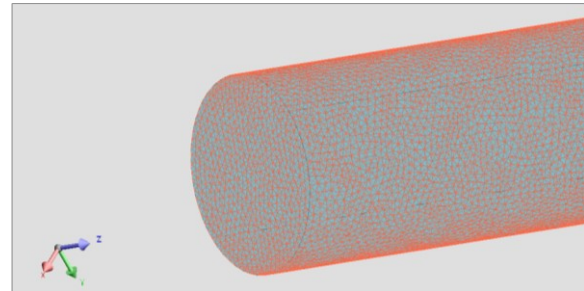


Figura 5. Detalhe da malha somente no material

O valor da resistência elétrica obtida na simulação foi de $8,39 \mu\Omega$, conforme Figura 6. Podemos observar também a distribuição homogênea da corrente elétrica por m^2 ao longo de todo o cilindro maciço de cobre.

O valor da resistividade elétrica volumétrica foi de $0,01700 \mu\Omega \cdot m$.

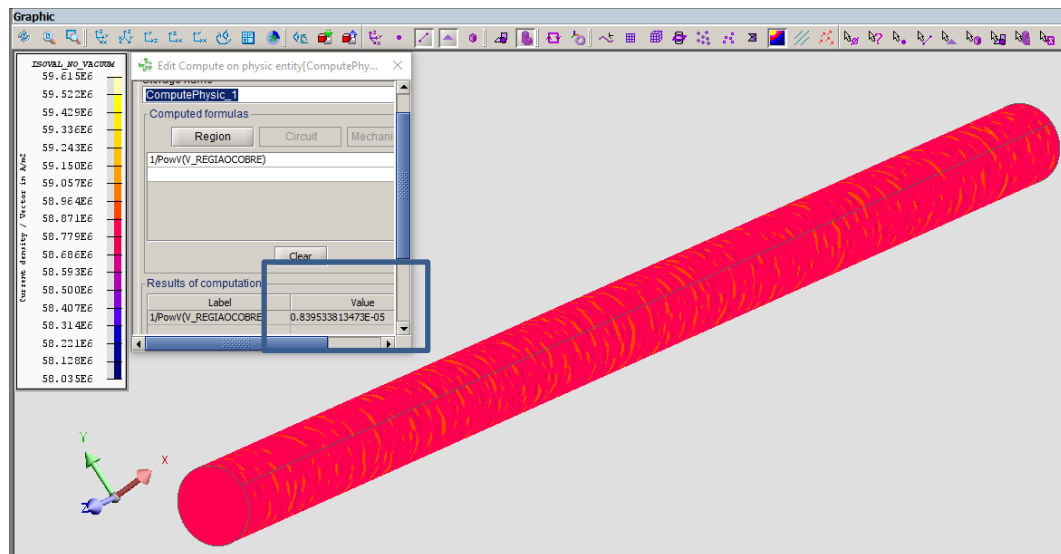


Figura 6. Resultado da simulação

4. Conclusão

Pelo método experimental, a resistência elétrica média foi de $8,30 \mu\Omega$ e a determinação da resistividade elétrica volumétrica foi de $0,01682 \mu\Omega \cdot m$.

Pelo método de simulação computacional, a resistência elétrica foi de $8,39 \mu\Omega$ e a determinação da resistividade elétrica volumétrica foi de $0,01700 \mu\Omega \cdot m$.

Como as comparações apresentaram uma pequena variação entre as medidas experimentais realizadas no laboratório e o simulado no software computacional, os resultados foram considerados satisfatórios.

Usar um software de simulação computacional permite criar modelos para analisar diferentes cenários e fazer ajustes necessários antes de produzir o material, o que reduz custos e tempo de desenvolvimento.



5. Referências

- [1] Cardoso, J. R., *Engenharia Eletromagnetica*, Elsevier, São Paulo, Brazil, 2011.
- [2] Sadiku, M. N. O., *Elementos de Eletromagnetismo*, Bookman, 2010.
- [3] Cardoso, J. R., *Electromagnetics through the finite element method: a simplified approach using Maxwell's equations*, Taylor & Francis, CRC Press, 2016.
- [4] American Society for Testing and Materials. ASTM B193: 2020: *Standard Test Method For Resistivity Of Electrical Conductor Materials*. ASTM International, 2020.
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 6815:2010: *Fios e cabos elétricos - Ensaio de determinação da resistividade em componentes metálicos*, 2010.