

Medidas de resistividade elétrica em uma liga Fe-Si

Rosângela Manegotto Costa

Doutora em Ciências pelo Instituto de Física da UFRGS em 1998. Coordenadora do projeto "Caracterização de materiais através de medidas de resistividade elétrica". Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas - Centro Universitário Feevale.

Resumo

Foram realizadas medidas de resistividade elétrica através do método de quatro pontas, em temperatura ambiente, numa liga de aço ao silício de grão não orientado com composição química de 0,0027% de carbono, 0,15% de manganês, 2,08% de silício, 0,024% de fósforo, 0,004% de enxofre e 0,1766% de alumínio. O resultado obtido a partir da média das medidas de resistividade foi $\rho=0,41\mu\Omega\text{m}\pm 0,01\mu\Omega\text{m}$. O valor encontrado demonstra que a resistividade do material estudado está dentro do esperado, de acordo com dados publicados na literatura. Estas medidas são as primeiras realizadas através da montagem experimental, que está em fase final de implantação no Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas do Centro Universitário Feevale, e serviram como teste de validação da mesma. A partir do resultado de resistividade elétrica foi feita uma estimativa da condutividade térmica do sistema estudado, na temperatura de 303 K, através da lei de Wiedemann-Franz, já que, em temperatura ambiente, a lei de Wiedemann-Franz é geralmente bem obedecida.

Palavras-chave

Resistividade elétrica; resistência elétrica; aços elétricos; liga Fe-Si; propriedades de transporte.

Abstract

We report measurements of the electrical resistivity made by the four contacts method, at room temperature, in a sample of non-oriented electrical steel with chemical composition of 0.0027% Carbon, 0.15% Manganese, 2.08% Silicon, 0.024% Phosphorus, 0.004% Sulfur and 0.1766% Aluminum. The obtained result from the resistivity data average was $\rho=0,41\mu\Omega\text{m}\pm 0,01\mu\Omega\text{m}$. This result shows that the steel sample resistivity is in agreement with published data. These measurements were the first performed with the experimental assembly, whose is in the final stage of implantation in the Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário Feevale. The obtained result validated the experimental method. From the resistivity data was possible to make a estimation about the thermal conductivity, using the Wiedemann-Franz law since the Wiedemann-Franz law is generally well obeyed at room temperature.

Key words

Electrical resistivity; electric resistance; electric steel; Fe-Si alloy; transportation properties.

Introdução

A capacidade de conduzir eletricidade é uma das mais importantes características de um metal. Esta capacidade se deve à presença de um grande número de elétrons quasi-livres que, sob a ação de um campo elétrico aplicado, são capazes de fluir através de uma rede cristalina. A rede cristalina, no entanto, não é perfeita. As imperfeições estáticas e dinâmicas da rede impedem o livre fluxo de elétrons, causando espalhamento dos mesmos e dando origem à chamada resistência elétrica. Num sistema metálico, em temperaturas próximas do zero absoluto, a resistividade se estabiliza num valor constante, independente da temperatura, chamado de resistividade residual. Esta contribuição resistiva deve-se às imperfeições estáticas da rede cristalina como impurezas, vacâncias, interstícios, deslocamentos, etc. Num metal muito puro e tratado termicamente para minimizar a quantidade de defeitos estendidos, a resistividade residual atinge valores muito baixos. Quando a temperatura se eleva, as vibrações da rede tornam-se relevantes sendo, estas também, perturbações à ordem periódica perfeita. O efeito resistivo das vibrações da rede é tratado com a teoria da interação elétron-fônon (PUREUR, 2001).

Se as dimensões de uma amostra metálica são conhecidas, uma resistividade elétrica pode ser calculada para o metal. Esta resistividade é característica de um metal específico, e é dependente da temperatura e pressão em um dado momento. O conhecimento da resistividade elétrica, especialmente como um parâmetro dependente de temperatura, pode ter muitas aplicações imediatas teóricas e práticas. Podem ser citados, como exemplo, a utilização de extensômetros resistivos na indústria e pesquisa para a determinação de estados de tensão mecânica de superfícies de grandes e pequenas estruturas. Além disso, uma vez que a resistividade elétrica de um metal é muito sensível ao seu grau de pureza, medidas de resistência simples de uma amostra são freqüentemente feitas a 4 K e a temperatura ambiente quando são relevantes informações relativas à pureza do metal. Outra aplicação de medidas de resistência elétrica está na determinação da presença ou ausência de estruturas de rede ordenadas em ligas. Ainda, a partir de dados de resistividade, é geralmente possível fazer previsões razoáveis de condutividade térmica a partir da lei de Wiedemann-Franz (ASCROFT, 1976) e outras fórmulas, em ambas baixas e altas temperaturas. Finalmente, existe a grande facilidade com a qual transições de fase estruturais e magnéticas e produção e migração de defeitos podem ser estudadas, para não falar dos usos puramente teóricos de dados de resistividade elétrica.

No caso dos aços elétricos, a resistividade é também um parâmetro de interesse. Os aços elétricos são materiais magnéticos com muitas aplicações na área de tecnologia. Os materiais magnéticos podem ser classificados em dois grandes grupos: macios ou duros. Os materiais magnéticos duros caracterizam-se por manterem uma magnetização residual alta após terem sido expostos a um campo magnético forte. Ao contrário, materiais magneticamente macios se magnetizam com campos magnéticos relativamente baixos e quando o campo aplicado é removido, eles retornam a um estado de magnetização residual relativamente baixa. O comportamento magnético macio é essencial em aplicações como solenóides, relés, transformadores, etc.

A maioria das ligas ferromagnéticas macias constituem-se, principalmente, a partir de um ou mais dos elementos ferromagnéticos comuns: ferro, níquel ou cobalto. Utilizam-se adições de elementos, como silício, nas ligas magnéticas macias de modo a promover alta permeabilidade, baixa força coercitiva e pequena perda por histerese. Certos elementos adicionais podem também aumentar a resistividade elétrica, o que ajuda a reduzir perdas em dispositivos de correntes alternadas. Por exemplo, o ferro puro pode exibir boas propriedades magnéticas macias e ter uma alta indução de saturação. No entanto, sua baixa resistividade elétrica resulta em altas perdas em aplicações de corrente alternada. A Figura 1 mostra as trocas na resistividade resultantes da adição de vários elementos ao ferro (DIETRICH, 1990).

Dados de resistividade elétrica são um parâmetro importante na avaliação do aço durante o tratamento térmico, e também da qualidade do aço resultante. A medida de resistividade elétrica em função da temperatura permite reproduzir a temperatura de operação do dispositivo, propiciando o estudo do comportamento do material em sua temperatura de funcionamento.

Neste artigo estão apresentados os primeiros resultados obtidos na medida de resistividade elétrica, através do método de quatro pontas, em temperatura ambiente, numa amostra de aço ao silício de grão não orientado com composição química de 0,0027% de carbono, 0,15% de manganês, 2,08% de silício, 0,024% de fósforo, 0,004% de enxofre e 0,1766% de alumínio. Como um resultado adicional, foi feita uma estimativa da condutividade térmica do sistema estudado, em temperatura ambiente, a partir da lei de Wiedemann-Franz (ASCROFT, 1976).

Este estudo foi desenvolvido no Laboratório de Caracterização de Materiais, em fase inicial de implantação no Centro Universitário Feevale.

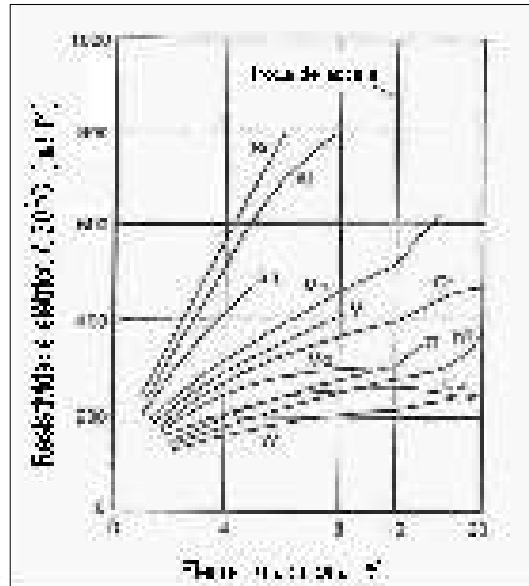


Figura 1 - Efeito de elementos adicionais na resistividade elétrica do ferro.

Procedimento experimental

MONTAGEM EXPERIMENTAL

A montagem experimental foi desenvolvida conforme esquema mostrado na Figura 2.

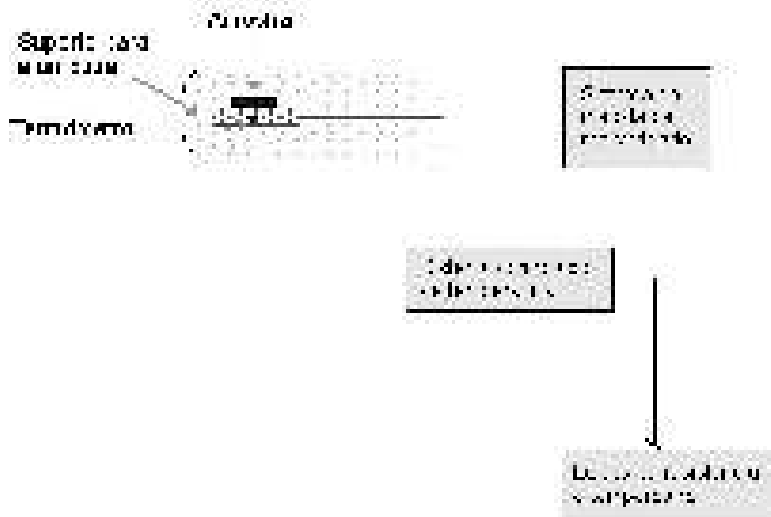


Figura 2 - Esquema experimental utilizado nas medidas de resistividade elétrica em temperatura ambiente.

O aparato experimental consta de um tubo de Vycor no qual é introduzida a amostra a ser medida. A amostra é fixada num suporte de alumina através de contatos de pressão que fazem também o contato elétrico, como mostra a Figura 3. A resistência de contato medida foi de aproximadamente 1. O isolamento dos fios de corrente e tensão é feito através de passadores cerâmicos. Cada passador permite a passagem de seis fios. Este procedimento é feito para permitir a medida em temperaturas de até 870 K.

A temperatura da amostra é medida através de um termômetro de platina ligado ao sistema controlador de temperatura N480 com uma precisão de uma casa decimal. O termômetro é fixado na amostra através de uma cola cerâmica boa condutora de calor a fim de obter um bom acoplamento térmico. A medida de resistência elétrica é realizada com o auxílio de um resistômetro diferencial. A saída de tensão da amostra é lida num multímetro HP34401A, com resolução de 6 ½ dígitos. O circuito elétrico do sistema está mostrado na Figura 4. Uma placa de aquisição de dados deverá transferir os valores de tensão elétrica na amostra e no termômetro para um microcomputador que calculará e registrará os dados de resistência elétrica e temperatura. O microcomputador e a placa para aquisição dos dados ainda não foram implementados. A aquisição de dados está sendo feita, portanto, manualmente.

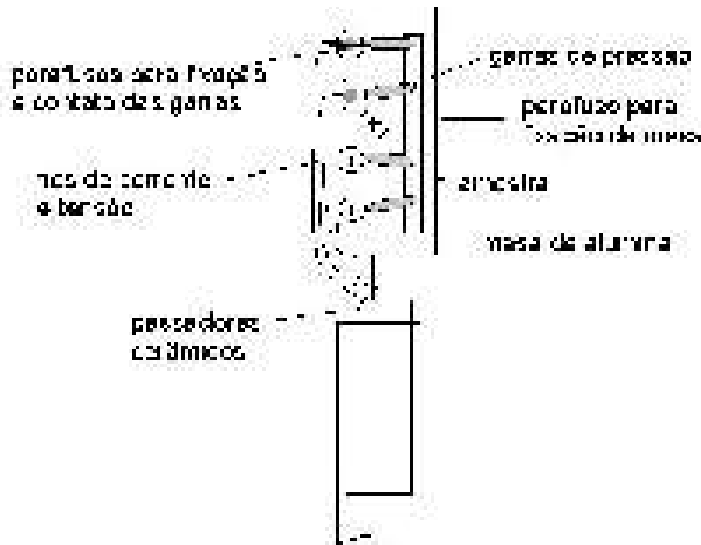


Figura 3 - Fixação da amostra no porta amostra.

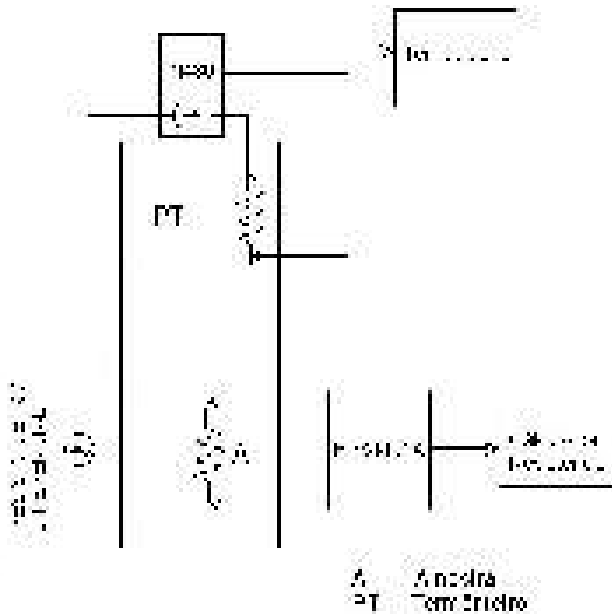


Figura 4 - Esquema elétrico utilizado nas medidas de resistividade elétrica em temperatura ambiente.

Atualmente, o aparato experimental está sendo preparado para a realização de medidas em função da temperatura até 870 K. A variação da temperatura é feita através de um forno ligado ao sistema controlador de temperatura N480. Para garantir a homogeneização da temperatura dentro do tubo de Vycor e evitar assim gradientes de temperatura, é conveniente que as experiências sejam feitas em atmosfera de um gás inerte, como o argônio. Para isso deve ser feito um vácuo prévio no sistema para a posterior injeção de gás. A retirada de ar é também conveniente para evitar a oxidação dos fios e contatos elétricos, no interior do tubo, devido ao aumento de temperatura.

PREPARAÇÃO DA AMOSTRA E PROCEDIMENTO DE MEDIDA

A amostra medida foi extraída de uma chapa de aço com 0,5 mm de espessura e cortada com as dimensões de 33 mm de comprimento e 3 mm de largura. A resistência elétrica da amostra é medida com o auxílio de um resistômetro diferencial, com uma corrente elétrica de medida de 100 mA e um ganho de 1000 V/V no pré-amplificador. A saída de tensão do resistômetro diferencial (tensão elétrica na amostra) é lida num multímetro HP34401A.

A resistência da amostra é calculada, portanto, de acordo com (1):

$$R = \frac{\text{tensão de saída do resistômetro diferencial [V]}}{1000 \text{ V/V} \times 100 \text{ mA}} \quad (1)$$

Método de análise, resultado e discussão

MÉTODO DE ANÁLISE

A lei de Ohm é a observação experimental que, a uma temperatura constante, a razão da densidade de corrente \vec{J} , dentro de um condutor metálico, pelo campo elétrico \vec{E} é uma constante. Ou seja:

$$(2) \quad \frac{\vec{J}}{\vec{E}} = \frac{1}{\rho} \quad \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{ou}$$

onde ρ e σ são conhecidos como a resistividade elétrica e condutividade elétrica, respectivamente.

No caso de um condutor de seção transversal uniforme de área A e comprimento l , o qual é percorrido por uma corrente I com uma voltagem V aplicada entre seus extremos, valem as relações:

$$E = \frac{V}{l}; \quad J = \frac{I}{A} \quad (3)$$

Substituindo as equações (3) em (2), obtém-se:

$$\frac{V}{l} = \frac{\rho I}{A} \quad (4)$$

onde $\rho l / A$ é chamada R , a resistência elétrica do condutor. Assim, pode-se escrever uma expressão alternativa, a lei de Ohm

$$V = R I \quad (5)$$

Com V em volts e I em ampères, R é medido em ohms. A resistividade elétrica,

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l} \quad (6)$$

é então dada em ohm-metro ($\Omega.m$).

RESULTADO E DISCUSSÃO

Foram feitas quatro medidas de resistência elétrica em temperatura de 303 K. A partir das medidas de resistência foi calculada a resistividade elétrica. A resistividade é encontrada através da relação (6), onde l é o caminho elétrico medido entre os contatos de tensão e A é a área da seção transversal da amostra, conforme mostra a Figura 5. A tabela 1 resume os resultados obtidos.

O valor da resistividade elétrica do ferro, em temperatura ambiente, é de $\rho \approx 0,1 \mu\Omega.m$. O aço medido apresenta, portanto, uma resistividade aproximadamente quatro vezes maior

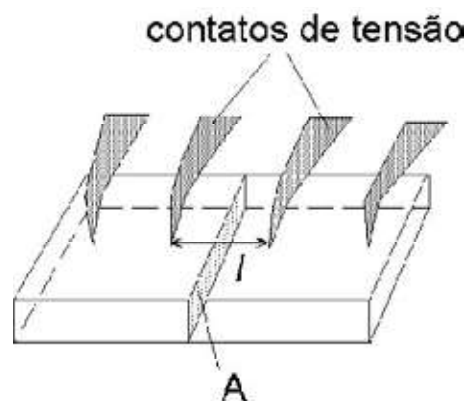


Figura 5 - Definição do caminho elétrico (l) e da área da seção transversal (A).

| | $\rho (\mu\Omega.m)$ 303 K |
|--------------|----------------------------|
| 1 | 0,4218 |
| 2 | 0,4315 |
| 3 | 0,4075 |
| 4 | 0,4015 |
| Média | 0,415 ± 0,004 |

Tabela 1- Dados medidos de resistividade elétrica e a respectiva média.

do que a do ferro puro. Os dados apresentados na Figura 1, mostram a variação da resistividade elétrica do ferro com a adição de silício, manganês e alumínio. Pode-se observar que para uma adição de 2% de silício, o valor da resistividade é próxima a $0,36 \mu\Omega.m$. Nota-se que a adição do Al e do Mn, presente no sistema estudado, também ocasiona o aumento da resistividade elétrica. Além disso, deve-se levar em conta que a resistividade é uma grandeza dependente de temperatura. Nos metais, de uma forma geral, a resistividade cresce com o aumento da temperatura. O valor de resistividade obtido é próximo, porém superior, ao resultado apresentado na Figura 1 para adição de silício ao ferro, como esperado.

A partir da resistividade elétrica é possível fazer previsões razoáveis da condutividade térmica a partir da lei de Wiedemann-Franz (ASCROFT, 1976), que de acordo com a teoria de Drude, é dada por:

$$\frac{\kappa}{\sigma} = \frac{3}{2} \left(\frac{k_B}{e} \right)^2 T, \quad (7)$$

onde κ é a condutividade térmica, $\sigma = 1/\rho$ é a condutividade elétrica, k_B é a constante de Boltzmann, e é a carga do elétron e T é a temperatura. Em temperatura ambiente, a lei de Wiedemann-Franz é geralmente bem obedecida (ASCROFT, 1976).

O cálculo da condutividade térmica, a partir de (7), para o sistema estudado resulta em $\kappa = 8,2 \pm 0,1 \text{ W/m.K}$, para $T = 303 \text{ K}$. Este resultado é uma ordem de grandeza menor do que a condutividade térmica do ferro puro (DIETRICH, 1990). No entanto, para ligas de Fe-Al, existem resultados indicando $\kappa \approx 5 \text{ W/m.K}$ (ONO et al., 1998). Observa-se, portanto, que um aumento da resistividade elétrica ocasiona uma diminuição da condutividade térmica. Este comportamento é esperado, uma vez que nos materiais melhores condutores, existe uma maior contribuição eletrônica para a condutividade térmica (MAHAN, 1997). De acordo com dados publicados na literatura (ONO et al., 1998), $\rho \approx 1 \mu\Omega.m$ para ligas de Fe-Al. Se esperaria, portanto, para o sistema estudado, um $\kappa > 5 \text{ W/m.K}$.

Conclusão

Foram realizadas medidas de resistividade elétrica, em temperatura de 303K, numa liga de aço ao silício de grão não orientado com composição química de 0,0027% de carbono, 0,15% de manganês, 2,08% de silício, 0,024% de fósforo, 0,004% de enxofre e 0,1766% de alumínio. O resultado obtido a partir da média das medidas de resistividade foi $\rho = 0,4 \mu\Omega.m \pm 0,0 \mu\Omega.m$, que está de acordo com dados publicados (DIETRICH, 1990) na literatura. Estas medidas, as primeiras realizadas com a montagem experimental, serviram como teste de validação da mesma. Como um resultado adicional, foi feita uma estimativa da condutividade térmica do sistema estudado, em 303 K, através da lei de Wiedemann-Franz, que resultou em $\kappa = 8,2 \pm 0,1 \text{ W/m.K}$.

Agradecimento

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS). Gostaríamos de agradecer à INTRAL que forneceu as amostras do aço estudado, ao Prof. Dr. Mário Baibich do Laboratório de Resistividade da Instituto de Física da UFRGS pelo empréstimo da cana de medidas, ao Sr. Leandro, técnico do mesmo laboratório, pela produção de peças e solda de alta temperatura do termômetro de platina e ao Sr. Paulo, funcionário da oficina mecânica do Instituto de Física da UFRGS, também pela solda do termômetro de platina.

Referências Bibliográficas

- ASCROFT, N. W., MERMIN, N. D. **Solid state physics**. Filadélfia: Dorothy Garbose Crane, 1976, 826p.
- DIETRICH, D. W. Magnetically soft materials. In: *Metals Handbook*. 10. Ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 1990. v. 2, p. 761-780.
- MAHAN, G., SALES, B., SHARP, J. Thermoelectric materials: new approaches to an old problem. *Physics Today*: p.42-47, mar. 1997
- MEADEN, G. T. **Electrical resistance of metals**. Londres: Heywood Books, 1966, 218p.
- ONO, K., KADO, M., SUZUKI, R. O. Thermoelectric properties of the Fe-Al and Fe-Al-Si alloys for thermoelectric generation utilising low-temperature heat sources. *Steel research*: v. 69, n. 9, p. 387-390, 1998.
- PUREUR, Paulo. **Estado sólido**. Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS, 2001. 245p.