

ESTUDO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO AÇO DE GRÃO ORIENTADO EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO E CAMADA DE REVESTIMENTO¹

Wellington Lopes²
 Júlia Rocha de Castro³
 Maria Teresa Paulino Aguilár⁴
 Paulo Roberto Cetlin⁵
 Elaine Carballo Siqueira Corrêa²

Resumo

As propriedades eletromagnéticas dos aços elétricos dependem das condições de processamento aplicadas a esses materiais desde o ambiente siderúrgico até as possíveis etapas de preparação das chapas quando na fabricação de objetos utilizados em diferentes áreas de aplicação. Neste caso, sabe-se, por exemplo, que o controle da composição química, da granulometria, do número de passes de laminação, da espessura das chapas laminadas, do arranjo microestrutural assumido em diferentes etapas de trabalho, o método de corte das chapas e a aplicação de camadas de revestimento podem modificar as respostas dos aços de grão orientado e de grão não-orientado. Considerando essas variáveis, esse estudo apresenta os resultados advindos do carregamento em cisalhamento monotônico sob diferentes taxas de deformação para o aço de grão orientado (GO) com e sem a camada de revestimento. Os resultados indicaram a sensibilidade da resistência mecânica e da resistividade do aço GO em função da mudança na taxa de deformação para as duas condições de estado da chapa, com e sem revestimento, sendo esse último removido após imersão em banho ácido.

Palavras-chave: Aço GO; Resistividade elétrica e camada de revestimento.

STUDY OF ELECTRIC RESISTIVITY OF GRAIN ORIENTED STEEL CONSIDERING THE PROCESSING CONDITIONS AND THE LAYER COAT

Abstract

The electromagnetic properties of electric steels depend on the processing conditions applied to these materials since the steel mill until the possible steps of preparation of the sheets during the production of objects used in different applications. This manner, it has been known that the chemical composition of the rolled sheets, the microstructural arrangement developed in different steps of forming, the method used to cut the sheets and the application of layer coat can be to modify the properties of the electric steels. Considering these variables, this study presents the results detected after the shearing loading under different strain rates for the grain oriented steel (GO) with and without the layer coat. The results indicated the mechanical strength and the electric resistivity sensibility to the strain rate applied to the GO steel for the both conditions of the sheets, with and without the layer coat that was removed by immersion in chemical solution.

Key words: Grain oriented steel; Electric resistivity and layer coat.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro mecânico. Professor, Departamento de Engenharia de Materiais, CEFET-MG. Belo Horizonte, MG, Brasil. wellingtonlopes@deii.cefetmg.br

³ Aluna de graduação. Engenharia de Materiais. CEFET-MG. Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Engenheira mecânica. Professor, Departamento de Engenharia de Materiais e da Construção. UFMG. Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁵ Engenheiro mecânico. Professor, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG. Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os materiais utilizados para as diferentes aplicações elétricas, como em núcleos de transformadores de força, devem exibir, dentre outras características, resistividade elétrica elevada, perdas por correntes parasitas reduzidas, além de propriedades magnéticas satisfatórias. Nesse caso, o controle da composição química, da espessura das chapas, do tamanho de grão e da orientação cristalográfica dos aços classificados como siliciosos ou elétricos, são métodos comumente adotados para alcançar esses objetivos.⁽¹⁾

Outro aspecto que deve ser considerado para a redução das perdas por correntes parasitas consiste na aplicação de um revestimento cerâmico sobre as chapas dos aços de grão orientado (GO) como TiN, CrN e TiC aplicados por deposição física de vapor (PVD) e por deposição química de vapor (CVD).⁽²⁾

Dentre os métodos de deposição citados, destaca-se o uso do PVD pelo fato de reduzir a tendência à deformação da chapa durante a aplicação do revestimento quando comparado com o CVD, considerando a espessura reduzida dos aços de grão orientado, como por exemplo, testes em laboratório obtiveram chapas com espessura ultra fina, menor que 10 μ m.⁽³⁾

A camada de revestimento depositada sobre a superfície das chapas de aço contribui ainda para a proteção contra a corrosão do material, além de propiciar o desenvolvimento de tensões de tração que favorecem a redução das perdas por correntes parasitas. A presença de tensões de tração contribui para refinar o domínio magnético⁽⁴⁾ e assim, reduzir as perdas por correntes parasitas.

Outra variável que influencia a resposta eletromagnética dos aços elétricos é quantidade de deformação plástica imposta a esses materiais antes da utilização dos mesmos. De modo geral, verificou-se que o aumento da deformação plástica, sendo essa representada pela deformação em tração e em laminação, provocou o acréscimo das perdas magnéticas. Esse aumento das perdas magnéticas é explicado pelo acréscimo da força coerciva, sendo a mesma relacionada diretamente com a densidade de discordâncias decorrente do modo e da quantidade de deformação plástica (até um valor de 0,10 de deformação convencional) impostas aos aços elétricos.⁽⁵⁾

No entanto, a dependência das perdas magnéticas com a quantidade de deformação plástica depende de diversos fatores como a subestrutura de discordâncias desenvolvida em função das condições de deformação plástica e da intensidade das tensões residuais, por exemplo. Verificou-se que não houve mudança na força coerciva para uma quantidade de deformação plástica inferior a 0,02 para o ferro puro devido à reduzida densidade de discordâncias enquanto para os aços de grão não orientado percebeu-se uma mudança da força coerciva para apenas 0,005 de deformação plástica.⁽⁶⁾

Por fim, foi observada ainda a influência da taxa de deformação na formação da imperfeição superficial “casca de laranja” ou “estrias” devido à granulometria tipicamente grosseira dos aços de grão orientado (GO). Diante do exposto, este trabalho pretende investigar agora o efeito da mudança da taxa de deformação (0,001s⁻¹, 0,001s⁻¹ e 0,01s⁻¹) e da presença do revestimento de forsterita no comportamento mecânico, no aspecto macroscópico (mediante observação visual) e na resistividade elétrica de chapas do aço de grão orientado mediante a condução de ensaios de cisalhamento planar simples sob os três valores de taxa de deformação citados.

É necessário destacar que o simples ato de provocar a deformação plástica desse aço GO já é considerado uma condição de trabalho que prejudica a resposta eletromagnética desse material, pois o mesmo foi desenvolvido para essa finalidade, sendo necessário exibir resposta mecânica apenas o suficiente para suportar as condições utilizadas para o corte e a posterior montagem das chapas nos diferentes instrumentos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Para a condução dos experimentos fez-se uso de chapas do aço de grão orientado (GO) com espessura inicial de 0,27mm e composição química contendo (% em peso e ppm): 0,036C; 3,13Si; 0,001Al; 0,056Mn; 13 ppm de P e 5 ppm de S. A e tamanho de grão no estado como recebido igual a 2,77 mm, sendo o mesmo identificado após a preparação micrográfica convencional com uso do reativo químico Nital 5% (5 mL de ácido nítrico e 95 mL de álcool etílico).

2.2 Ensaio de Cisalhamento

O ensaio de cisalhamento foi executado na máquina de ensaios Instron 5582 a partir da montagem de dispositivo que foi adaptado a essa máquina, como demonstrado em trabalho anterior.⁽⁷⁾

Para identificar a relação entre a deformação, γ , e a tensão, τ , cisalhantes com a deformação e tensão verdadeiras e desta forma, a deformação efetiva, $\varepsilon_{\text{efet}}$, e a tensão efetiva, σ_{efet} , foi feita a comparação entre os carregamentos de tração e de cisalhamento de modo identificando-se as relações expostas nas Equações 1 e 2 para o cálculo da deformação e da tensão efetivas, respectivamente.

$$\varepsilon_{\text{efet}} = \gamma / 1,20 \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{efet}} = 1,20 \cdot \tau \quad (2)$$

Três valores de taxa de deformação foram usados para investigar a influência dessa variável na resistividade elétrica das chapas do aço GO: $0,0001\text{s}^{-1}$, $0,001\text{s}^{-1}$ e $0,01\text{s}^{-1}$.

2.3 Decapagem

Para investigar (confirmar) o efeito da camada de revestimento sobre a resposta elétrica do aço de grão orientado fez-se uso de uma solução de ácido clorídrico (HCl) com concentração de 20% durante o tempo de imersão de 2 horas para provocar a remoção do filme de forsterita (filme de vidro, Mg_2SiO_4) que auxilia nas respostas eletromagnética e anticorrosivas do aço GO.⁽⁸⁾

Deste modo, os corpos de prova usados para o ensaio de cisalhamento (comprimento x largura x espessura) com dimensão de 50mm x 15mm x 0,22mm foram expostos a essa solução e em seguida submetidos aos ensaios de cisalhamento.

2.4 Resistividade

A resistividade do aço GO após a deformação em cisalhamento para diferentes taxas de deformação com e sem a presença de revestimento das chapas foi efetuada com uso de um dispositivo para medidas elétricas, LCR-*Bridge* HM 8118 da *Hameg Instruments* ajustado para a frequência de 60Hz. Antes da medição da resistência elétrica necessário ao cálculo da resistividade das chapas, essas foram cortadas em uma cortadeira metalográfica de modo a terem a aproximadamente a mesma dimensão ($31,88 \text{ mm} \pm 0,92 \text{ mm}$ de comprimento e $12,79 \text{ mm} \pm 1,42 \text{ mm}$ de largura e espessura inicial de 0,27 mm).

A medição da resistividade elétrica das amostras do aço GO foi feita com uso de pinças e sem contato manual durante a inserção do material no dispositivo utilizado para o cálculo dessa grandeza elétrica, evitando assim, a contaminação do material e por consequência, os valores registrados para a resistência elétrica do aço ao silício.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Propriedades Mecânicas

O resumo das propriedades mecânicas do aço GO no estado como recebido é apresentado na Tabela 1 sendo o mesmo calculado para o valor de taxa de deformação inicial no ensaio de tração de 0,001/s.

Percebe-se a capacidade reduzida de encruamento desse aço a partir do valor reduzido do expoente de encruamento devido, dentre outros aspectos, à granulometria grosseira do mesmo. Condição essa necessária à obtenção das melhores propriedades eletromagnéticas favorece o desenvolvimento da imperfeição superficial “casca de laranja” que será exibida no subitem 3.2.

Tabela 1. Principais propriedades mecânicas do aço GO

Material	Tensão limite de escoamento, LE (MPa)	Tensão limite de resistência à tração, LRT (MPa)	Alongamento uniforme, AU	Expoente encruamento
Aço GO	337	382	0,090	0,084

As curvas de fluxo do carregamento monotônico em cisalhamento para os três valores de taxa de deformação são exibidas na Figura 1. Percebe-se a sensibilidade da resistência mecânica do aço GO à mudança da taxa de deformação.

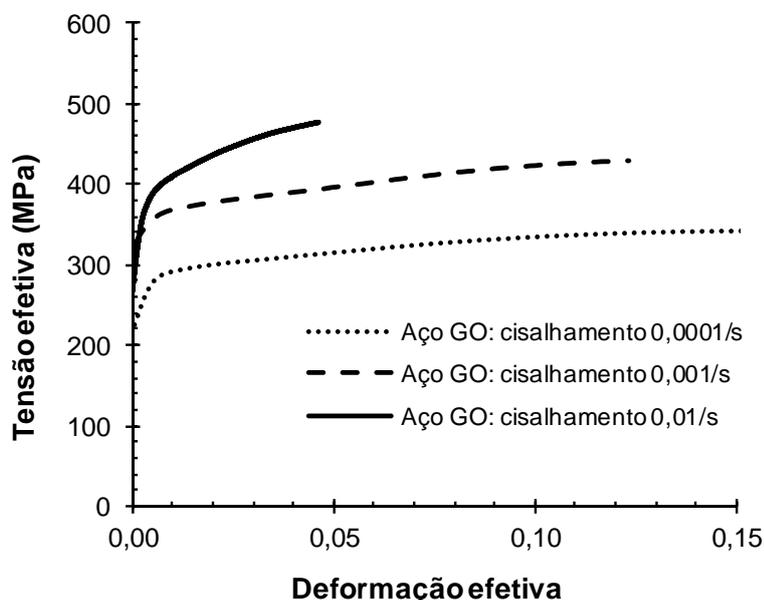


Figura 1. Curvas de fluxo para o carregamento monotônico em cisalhamento para os três valores de taxa de deformação: 0,0001/s, 0,001/s e 0,01/s.

Neste caso, fez-se o cálculo da tensão limite de escoamento do aço GO para os três valores de taxa de deformação (Tabela 2), observando assim, o acréscimo de até 49% dessa medida de resistência mecânica quando se alterou a taxa de deformação entre 0,0001/s para 0,01/s.

Tabela 2. Variação dos valores da tensão limite de escoamento do aço GO em função da taxa de deformação adotada nos ensaios de cisalhamento

Taxa de deformação (s ⁻¹)	Tensão limite de escoamento, LE (MPa)	Variação (%)
0,0001	255	0
0,001	337	+32,15
0,01	380	+ 49,02

3.2 Taxa de Deformação Versus Acabamento Superficial

O aspecto macroscópico das chapas do aço GO revestidas e decapadas após a deformação em cisalhamento para os três valores de taxa de deformação é apresentado nas Figuras 2 e 3, respectivamente. Nota-se, assim como detectado em trabalho anterior,⁽⁷⁾ a formação da imperfeição “casca de laranja” (setas Figuras 2b e 3b) com a deformação em cisalhamento sendo esse efeito acentuado com o acréscimo da taxa de deformação e comum às chapas revestidas e decapadas.

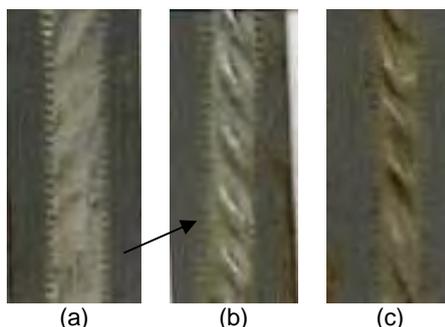


Figura 2. Corpos de prova de cisalhamento do aço GO revestido após o cisalhamento monotônico para os três valores de taxa de deformação: (a), 0,0001/s, (b) 0,001/s e (c) 0,01/s.

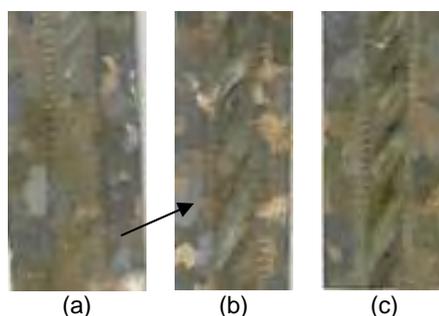


Figura 3. Corpos de prova de cisalhamento do aço GO sem revestimento após o cisalhamento monotônico para os três valores de taxa de deformação: (a), 0,0001/s, (b) 0,001/s e (c) 0,01/s.

Verifica-se que embora apenas os corpos de prova exibidos na Figura 2 não tenham sido decapados a região cisalhada assume aspecto diferenciado (fica mais clara) quando comparada com o restante do material que não foi ensaiado (extremidades) devido à fixação com uso de presilhas do corpo de prova ao dispositivo necessário à realização desse ensaio.

Essa região ao receber o torque de 32 N.m para a fixação do corpo de prova ao dispositivo utilizado para o ensaio de cisalhamento e posteriormente, o esforço mecânico responsável pelo cisalhamento do aço GO na máquina de ensaios universais, provoca o arrancamento de parte da camada utilizada para o revestimento das chapas desse aço.

3.3 Taxa de Deformação Versus Resistividade Elétrica

Os valores da resistividade elétrica exibidos pelo aço GO para os três valores de taxa de deformação investigados neste trabalho são apresentados na Figura 4.

Para as duas condições estudadas foi observada a tendência de acréscimo da resistividade elétrica com o aumento do valor da taxa de deformação adotado nos ensaios de cisalhamento. Esse comportamento pode ser relacionado com o fato de que o aumento da quantidade de deformação plástica sugere que também o aumento da quantidade de imperfeições estruturais as quais ocasionam o acréscimo da resistência elétrica e deste modo, da resistividade elétrica.

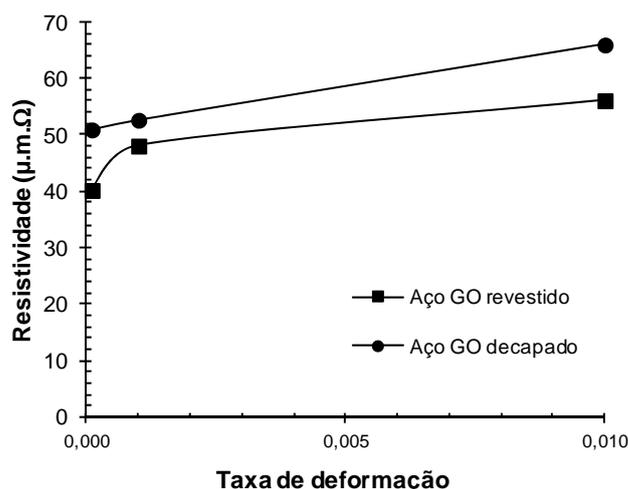


Figura 4. Variação da resistividade em função da taxa de deformação adotada nos ensaios de cisalhamento para os corpos de prova revestidos e decapados em solução ácida.

Apesar de nesse trabalho as condições de solicitação mecânica não serem condizentes nas diferentes aplicações desse material situação na qual o material é submetido apenas às operações de corte de chapa para a montagem em transformadores de força, por exemplo.

No entanto, considerando que o aumento da taxa de deformação ocasionou o aumento da resistividade pode-se afirmar que, dentre os tipos de perdas totais dos aços ao silício em aplicações eletromagnética, que a parcela da perda por correntes parasitas foi reduzida, pois esse tipo de perda varia de modo inverso com a resistividade.⁽⁹⁾

4 CONCLUSÕES

A investigação da resposta mecânica, do aspecto macroscópico e da resistividade elétrica do aço de grão orientado (GO) revestido e decapado em solução contendo HCl (concentração de 20% durante 2 horas e 15 minutos) mediante a variação do valor da taxa de deformação (0,0001/s, 0,001/s e 0,01/s) sob cisalhamento planar simples indicou:

- a sensibilidade da resistência mecânica do aço GO à mudança do valor da taxa de deformação para as chapas revestidas e decapadas;
- a formação e o aumento da intensidade da imperfeição superficial “casca de laranja” com o aumento do valor da taxa de deformação adotado nos ensaios de cisalhamento para as chapas revestidas e decapadas;
- a tendência de aumento da resistividade elétrica com o acréscimo da taxa de deformação para as chapas revestidas e decapadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG e ao CNPq pelo suporte quanto à realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 CUNHA, M.A., PAOLINELLI, S.C. *Low core loss non-oriented silicon steel*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v.320, p. 2485-2489, (2008).

- 2 INOKUTI, Y., SUZUKI, K., KOBAYASHI, Y. *Effect of difference in ion plating method on the magnetic properties of TiN-coated grain oriented silicon sheet*. Materials Transactions, v.36, n. 8, p. 1081-1087, (1995).
- 3 NAKANO, M., ISHIYAMA, K., ARAI, K.I. *Production of ultra thin grain oriented silicon steel*. IEEE Transactions of Magnetics, v.31, n. 6, p. 3886-3888, (1995).
- 4 XIA, Z., KANG, Y., WANG, Q. *Developments in the production of grain-oriented electrical steel*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v.320, p. 3229-3233, (2008).
- 5 LANDGRAF, F.J.G., EMURA, M. *Losses and permeability improvement by stress relieving fully processed by electrical steels with previous small deformations*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v.242-245, p. 152-156, (2002).
- 6 SWARTZENDRUBER, L.J., HICHO, G.E., CHOPRA, H.D., LEIGH, S.D., LEIGH, S.D., ADAM, G. *Effect of strain on magnetic and mechanical properties of ultralow carbon steel*. Journal of Applied Physics, v.81, p. 4263-4265, (1997).
- 7 CASTRO, J.R., CORRÊA, E.C.S., AGUILAR, M.T.P., CETLIN, P.R., LOPES, W. *Estudo do fenômeno casca de laranja para o aço GNO*. Anais do 66 Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração – ABM 2011, p. 3159-313168, (2011).
- 8 SILVEIRA, C.C., BUONO, V.T.L.B., CUNHA, M.A. *Influência das variação das condições de descarbonetação nas características de um aço elétrico de grão orientado*. Anais do 66 Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração – ABM 2011, p. 975-986, (2011).
- 9 BAN, G., BERTOTTI, G. *Dependence on peak induction and grain size of power losses in non oriented Si-Fe steels*. Journal of Applied. Physics, v.64, p. 5361-5363, (1988).