

## EFEITO DO CISALHAMENTO CÍCLICO NA RESPOSTA MAGNÉTICA DO AÇO GO\*

Grazielle Gianini Braga Maria<sup>1</sup>  
Silvério Ferreira da Silva Júnior<sup>2</sup>  
Maria Teresa Paulino Aguiar<sup>3</sup>  
Elaine Carballo Siqueira Corrêa<sup>4</sup>  
Wellington Lopes<sup>5</sup>

### Resumo

Os aços elétricos tem sido uma alternativa para aperfeiçoar a relação eficiência/perda magnética dos equipamentos elétricos, sem a necessidade de grandes alterações de projeto. Esses aços, também conhecidos como aços ao silício, podem ser de grão orientado ou não orientado, sendo suas propriedades, de modo geral, dependentes das diferentes condições adotadas para o processamento dos mesmos. Deste modo, considerando essa relação entre as condições de solicitação mecânica e o desempenho desses materiais este trabalho apresenta o estudo da resposta magnética exibida pelo aço de grão orientado após as chapas desse material serem submetidas à rota de processamento envolvendo a aplicação dos esforços de cisalhamento direto / cisalhamento reverso (cisalhamento cíclico). Os resultados indicaram a dependência das propriedades em função da quantidade de deformação plástica, ocasionando, de modo geral, o decaimento do desempenho magnético do mesmo.

**Palavras-chave:** Aço GO; Ensaio Barkhausen; Cisalhamento cíclico,

### EFFECT OF CYCLIC SHEARING ON THE MAGNETIC PROPERTY OF GO STEEL

#### Abstract

The silicon steels have been an alternative to optimize the relative efficiency / core loss of electrical equipments without the need for major design changes. These steels also known as electrical steels and have two main types: oriented or non-oriented. The magnetic properties of these materials generally depend on the processing conditions and, considering the relationship between the mechanical efforts and the magnetic properties, this work presents the study of the magnetic response exhibited by grain-oriented steel after the sheets of this material have been submitted to the processing route involving the application of forward and reverse shearing (cyclic shearing). The results indicated the dependence of magnetic properties identified by Barkhausen noise with the amount of plastic deformation. In general, the cyclic loading resulted in a decay of the magnetic property of the GO steel.

**Keywords:** GO steel; Barkhausen test; cyclic shearing.

<sup>1</sup> Eng. de Materiais, Mestranda Eng. de Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Eng. Mecânico, Dr., Professor, CDTN, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Eng. Mecânica, Dra., Professora, Dept. Eng. Materiais e Construção, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Eng. Mecânica, Dra., Professora, Dept. Eng. Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>5</sup> Eng. Mecânico, Dr., Professor, Dept. Eng. Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços elétricos, também conhecidos como aços siliciosos são materiais com boas propriedades magnéticas aplicados na geração, transmissão e utilização da energia elétrica. A alta demanda desse material ocorre em razão de os mesmos apresentarem alta capacidade de amplificar o fluxo magnético, boa resistividade elétrica e uma composição química favorável à redução de perdas magnéticas [1]. O desempenho magnético dos aços elétricos de grão orientado, GO, está relacionado à composição química, ao tamanho de grão, à textura e ao estado de tensões presentes existentes neste aço.

Neste aspecto, os aços GO apresentam textura pronunciada sendo mais utilizados em aplicações nas quais suas propriedades magnéticas devem ser semelhantes em uma determinada direção. No entanto, a alta sensibilidade ao estado de tensões limita a sua capacidade de ser deformado de forma mais severa [2-3]. Essa condição limita a conformação desses materiais, pois tensões de pequena magnitude podem causar alterações na rede cristalina dos aços GO, modificando suas propriedades magnéticas [4].

Considerando a sensibilidade desse material ao estado de tensões desenvolvido após um ciclo de deformação plástica, o objetivo desse trabalho foi investigar o efeito do cisalhamento cíclico na resposta magnética do aço GO.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Material

Neste trabalho foi utilizado o aço de grão orientado P999E, com 3,0% de silício com 0,27mm de espessura. A composição química deste material é apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química do aço GO

GO - P999E					
C (%)	Si (%)	Mn (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)
0,0361	3,1299	0,056	0,0332	0,0205	0,0129

### 2.2 Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural foi conduzida por meio do ensaio metalográfico e difração de raios - X. Os ensaios foram realizados no material no estado como recebido.

Para realização da análise metalográfica as amostras foram preparadas seguindo o procedimento convencional, mediante corte em guilhotina, embutimento, lixamento e polimento mecânicos acompanhado por ataque químico realizado com uso de Nital 5%.

A difração de raios-x foi conduzida em um difratômetro Shimadzu XRD 7000, com ângulo de varredura de 20° a 100° e passo de 0,02 s<sup>-1</sup>.

## 2.3 Ensaio de Cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento foram realizados em uma máquina de ensaios universal Instron 5582 modelo 2630-100 com software para captação e inserção dos dados Blue Hill 2a mediante a adaptação de um dispositivo para a execução desse ensaio. Os corpos de prova foram confeccionados por meio do corte da chapa em guilhotina e um esquema com as dimensões dos mesmos é apresentado na Figura 1.

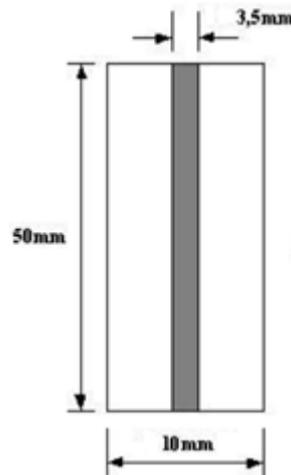


Figura 1. Esquema do corpo de prova utilizado no ensaio de cisalhamento

O aço GO foi cisalhado de modo direto até 0,015; 0,045 e 0,080 de deformação convencional e em seguida, deformado por cisalhamento reverso (semelhante à condução de um ensaio de compressão) até 0,60 de deformação convencional para também avaliar a resposta magnética apresentada por este material.

## 2.4 Ensaio Barkhausen

O equipamento utilizado no ensaio Barkhausen foi o Rollscan 300 da marca Stresstech. O software utilizado para a aquisição de dados e para o cálculo das propriedades magnéticas foi o Microscan 600, também da marca Stresstech.

O ruído Barkhausen foi medido no estado inicial, após o ensaio de cisalhamento direto e após a condução do ensaio de cisalhamento reverso. As medições foram realizadas dessa maneira para verificar a influência de cada etapa de deformação plástica nas propriedades magnéticas do aço GO.

Os corpos de prova foram posicionados com a direção de laminação paralela à direção do campo magnético aplicado pela sonda e de forma que a região central ficasse em contato com os polos do eletroímã emissor do campo magnético e o sensor de detecção do ruído.

Para a seleção dos melhores parâmetros para a realização do ensaio, inicialmente foram testados vários valores de tensão e frequência. O valor escolhido para tensão e frequência foi 0,9V e 9,0Hz em razão de provocarem maior variação entre o ruído antes e depois da deformação.

Quanto à profundidade de aquisição de dados, utilizou-se uma faixa de 70 kHz a 200 kHz, captação superficial do ruído, de 8 kHz a 200 kHz, com captação em todo o corpo de prova. Para análise dos resultados, optou-se por utilizar o valor RMS, e o valor de pico, PEAK [5-6].

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização Microestrutural

Na Figura 2 podem ser observadas as fotomicrografias do aço GO no estado inicial com a presença de apenas um constituinte, a ferrita. Já o difratograma desse aço no estado como recebido é exibido na Figura 3.

Sugere-se que os picos de difração encontrados antes de  $45^\circ$  (valor de  $2\theta$ ) estejam associados a possíveis impurezas ou mesmo a precipitados.

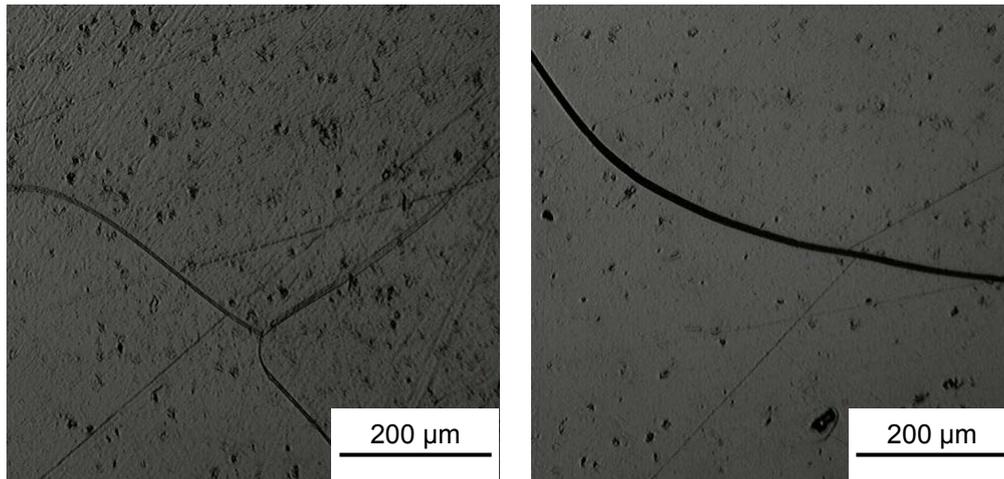


Figura 2. Microestrutura do aço GO como recebido

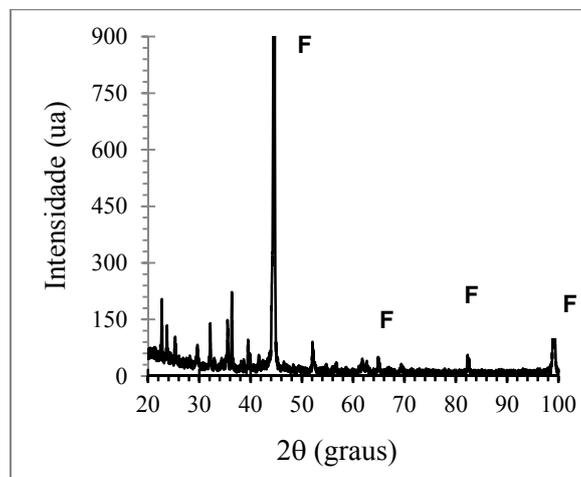


Figura 3. Difratograma do aço GO como recebido

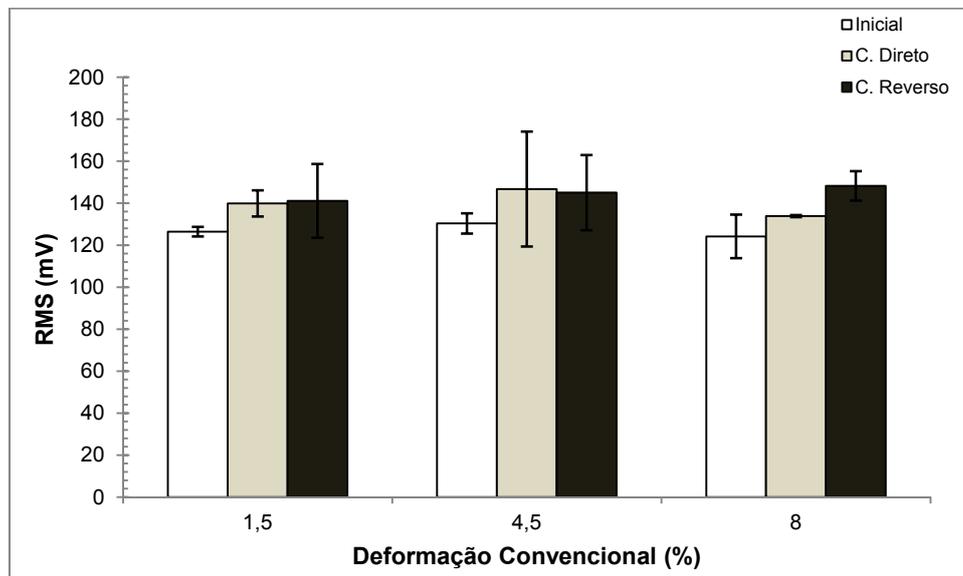
#### 3.2 Ensaio Barkhausen

O gráfico RMS em função da quantidade de deformação convencional, para o aço GO é apresentado na Figura 4. A primeira coluna corresponde ao valor RMS inicial para os corpos de prova que foram submetidos ao cisalhamento cíclico. A coluna “C. Direto” representa o valor RMS após o cisalhamento no modo direto e a última coluna “C. Reverso” refere-se ao valor do ruído após o cisalhamento no modo reverso.

O valor RMS inicial pode ser considerado o mesmo para todas as condições de ensaio, uma vez que as variações constatadas foram muito pequenas. Após o

cisalhamento direto e reverso, para todas as deformações, o valor do ruído foi maior, indicando uma piora das propriedades magnéticas do aço GO.

No aço GO o aumento da quantidade de pré - deformação em cisalhamento direto apresentou uma maior contribuição no aumento do valor RMS quando comparado com o efeito da deformação sob cisalhamento reverso. Após o cisalhamento reverso o ruído aumentou, mas em intensidade menor que a ocasionada pelo acréscimo da quantidade de pré-deformação em cisalhamento direto.



**Figura 4.** Rota Cisalhamento Cíclico aço GO

A elevação do ruído pode ser explicada pelo aumento da quantidade de discordâncias, em razão da deformação plástica imposta ao material. A criação de novos sítios de aprisionamento bem como a intensificação dos sítios já existentes dificultou a orientação dos domínios na direção do campo magnético, ocasionando deste modo, a degradação das propriedades magnéticas do aço GO [7].

No gráfico exibido na Figura 5 verifica - se que o valor de pico foi maior e medida que os corpos de prova foram submetidos a uma quantidade maior de deformação plástica. O aumento do valor de pico indica uma quantidade maior de saltos em razão da quantidade de obstáculos ter aumentado [8].

Variações no valor PEAK estão relacionadas às alterações na microestrutura do material. Na condição escolhidas no trabalho essas mudanças estão associadas à deformação plástica e ao estado de tensões presentes no material [9].

O resultado encontrado para o valor de pico, PEAK, confirma a tendência de comportamento do aço GO identificada a partir do valor do ruído representado pelo valor RMS, sendo essas alterações provocadas pelas distorções na rede cristalina causadas pelas discordâncias.

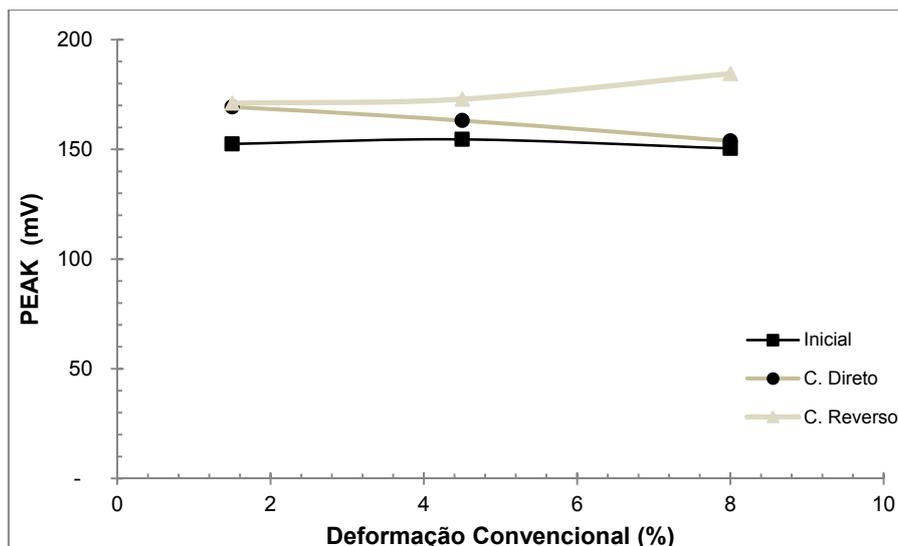


Figura 5. Valor de pico do aço GO

Na Figura 6 e 7 são apresentados os gráficos do ruído por meio do valor RMS para o aço GO nas duas faixas de frequências utilizadas neste trabalho. Conforme citado, a primeira faixa de frequência, 70 kHz a 200 kHz, permitiu uma captação do ruído na superfície do corpo de prova enquanto a outra faixa, 8 kHz a 200 kHz, em toda a extensão do corpo de prova.

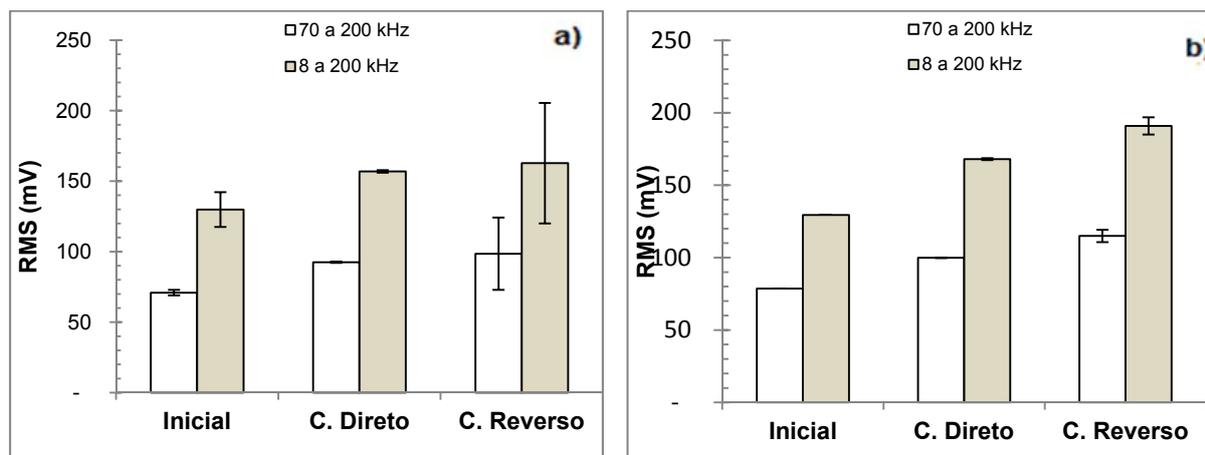
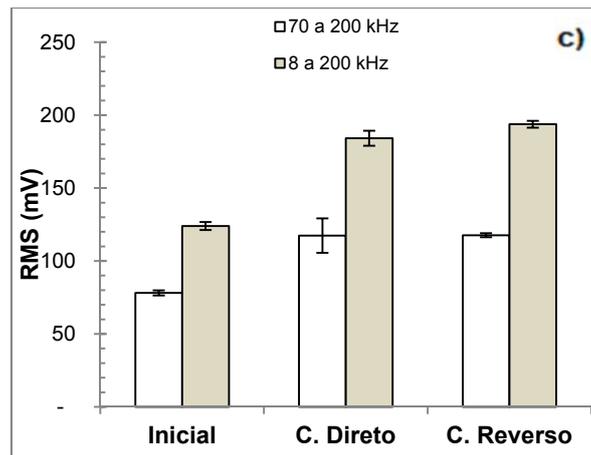


Figura 6. Valor RMS em diferentes profundidades de captação do ruído para deformações de 1,5% (a); 4,5% (b).



**Figura 7.** Valor RMS em diferentes profundidades de captação do ruído para deformação de 8,0%

Para todas as amostras ensaiadas foi observado um aumento do valor RMS na faixa de frequência testada. O aumento da quantidade de pré - deformação em cisalhamento direto ocasionou o acréscimo do valor do ruído, influenciando também os valores do ruído detectados durante o cisalhamento reverso.

#### 4 CONCLUSÃO

A aplicação da rota de processamento composta por cisalhamento direto e reverso ao aço elétrico GO para três valores de pré-deformação em cisalhamento direto resultou:

- o decaimento das propriedades magnéticas com o acréscimo da quantidade de pré-deformação em cisalhamento direto, sendo isso identificado a partir da variação do ruído Barkhausen, representado pelo valor RMS, que aumentou, assim como pelo valor de pico, PEAK;
- que para a maior frequência de aquisição do ruído Barkhausen foi registrado o aumento do valor do ruído, indicando deste modo, a queda no rendimento magnético do aço GO.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPEMIG pelo auxílio através da Bolsa de Mestrado.

#### REFERÊNCIAS

- Landgraf, F. J. G. Propriedades Magnéticas de aços para fins elétricos. Aços: perspectivas para os próximos 10 anos. Rio de Janeiro, 2002, p. 109-128.
- Santos, H. O. Estudo de orientações cristalográficas de aços ao silício utilizando técnicas de difração de raios X, difração de elétrons e método etch pit. 1999. 82p. Dissertação (Mestrado em Ciência na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1999.
- Blaow, M.; Evans, J. T.; Shaw, B. A. The effect of microstructure and applied stress on magnetic Barkhausen emission in induction hardened steel. Journal of Materials Science. v.42, p. 4364 - 4371, 2007.

- 4 Devaux, S.; Duquennoy, M.; Gualandri, J.; Ourak, M. The evaluation of surface residual stress in aeronautic bearings using the Barkhausen noise effect. *NDT&E International*, v. 37, p. 9 - 17, 2004.
- 5 Lindgren, M. ; Lepisto, T. On the stress vs. Barhausen noise relation in a duplex stainless steel. *NDT & E International*. v. 37, p. 403 - 410, 2004.
- 6 Sullivan, D.O. Cotterell, M.; Tanner, D.A.; Meszaros, I. Characterization of ferritic stainless steel by Barkhausen techniques. *NDT&International*, v 37, p.489-496, 2004.
- 7 Jagadish, C. ; Clapham, L. ; Atherton, D. L. Orientation effects of anisotropy stress, excitation, bias and residual fields on Barkhausen noise generation in pipeline steel. *Journal of Physics D: Applied Physics*. v. 23, p. 443 – 448, 1990.
- 8 Ranjan, R.; Jiles, D. C.; Rastogi, P. K. Magnetic properties of decarburized steels: An investigation of the effects of grain size and carbon content. *IEEE Transactions on magnetics*, v. 23, p.1869 – 1987, 1987.
- 9 Gür, C. H.; Çam, I. Comparison of magnetic Barkhausen noise and sound velocity measurements for characterization of steel microstructure. *Materials Characterization*, v.58, 5ed., p.447 – 454, 2006.