

INFLUÊNCIA DAS TENSÕES COMPRESSIVAS NAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS AÇOS ELÉTRICOS DE GRÃO ORIENTADOS

Mateus Botani de Souza Dias ¹

Ramon Valls Martin ²

Luiz Alberto Franco ³

Fernando José Gomes Landgraf ⁴

Resumo

Transformadores de potência são equipamentos fundamentais para reduzir as perdas nas etapas de transmissão e distribuição da energia elétrica. Durante a montagem do mesmo, tensões compressivas são geradas no núcleo magnético em decorrência da montagem, da não uniformidade da magnetização e das tensões térmicas, diminuindo a eficiência dos transformadores. O presente trabalho tem por finalidade apresentar a influência das tensões de compressão nos ciclos histeréticos, nas perdas magnéticas de potência (P) e na magnetostricção pico-a-pico (λ_{p-p}) dos aços elétricos com grãos orientados (GO). A aplicação de 10 MPa introduziu uma anisotropia externa ao material, diminuindo a permeabilidade magnética. Consequentemente, o campo remanente e o campo coercivo variaram -56% e +52%, aumentando as P em 24%. Além disso, a λ_{p-p} aumentou 86%. Em suma, a aplicação de tensões compressivas é deletéria para as propriedades magnéticas dos aços elétricos, diminuindo a eficiência e aumentando o ruído gerado pelos transformadores.

Palavra-chave: Aço elétrico; Perdas magnéticas; Magnetostricção; Tensão de compressão.

COMPRESSIVE STRESS INFLUENCE ON MAGNETIC PROPERTIES OF GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL

Abstract

Power transformers are fundamental devices to reduce power loss at electrical energy transmission and distribution steps. During the transformer assembly, compressive stresses are applied at magnetic cores due the assembly, the non-uniform magnetization and thermal stresses, reducing the transformer performance. The present work shows the compressive stress influence at the hysteretic loops, power losses and peak-to-peak magnetostriction of the grain oriented electrical steel. The apply of 10 MPa introduced an extrinsic anisotropy in the material, reducing the magnetic permeability. Consequently, the remanence and the coercive field changed -56% e +52%, increasing the power loss at 24%. Moreover, the peak-to-peak magnetostriction increases 86%. In sum, the compressive stress application is deleterious to magnetic properties of grain oriented electrical steel, reducing the performance and increasing the noise produced by power transformers.

Keywords: Electrical steel; Power loss; Magnetostriction; Compressive stress.

1 INTRODUÇÃO

Após a conversão da energia mecânica em elétrica pelas usinas geradoras de energia elétrica, a mesma percorre quilômetros até chegar aos consumidores finais. Para reduzir as perdas associadas à geração de calor produzida pelo efeito Joule, transformadores de potência são utilizados para elevar

ou reduzir a tensão elétrica da linha de energia. Entretanto, a eficiência destes transformadores também é uma fonte de perdas, pois de modo indesejado, a energia magnética é convertida em térmica. Esta perda recebe o nome de perda magnética de potência (P) e está relacionada com o

¹Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: dias-m@usp.br

²Centro de Metrologia Mecânica – CTMetro, Elétrica e de Fluidos, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

³Laboratório de Fenômenos de Superfície, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – POLI-USP, São Paulo, SP, Brasil.

⁴Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – POLI-USP, São Paulo, SP, Brasil.



núcleo magnético do transformador, que é composto por finas chapas (0,27 mm) de Fe-3%Si contendo forte textura cristalográfica do tipo Goss [1,2].

Além das perdas, o ruído gerado pelos transformadores gera irritabilidade, cansaço, dificuldade de concentração e prejudica o sono profundo [3-6]. O mesmo é gerado pela magnetostricção do núcleo magnético, i.e., deformações elásticas do material produzidas pela aplicação de um campo magnético externo [5,7,8].

1.1 Tensões Mecânicas

A prensagem utilizada na montagem dos transformadores, a não uniformidade durante a magnetização e dilatações térmicas acabam por gerar tensões compressivas nas chapas que compõem o núcleo magnético [5,7,9]. Como consequência, as P e a magnetostricção tem seus valores aumentados, prejudicando o desempenho dos transformadores e aumentando o ruído emitido pelo mesmo.

A aplicação de tensões compressivas em materiais com magnetostricção positiva aumenta a energia dos domínios alinhados paralelamente à direção da força e diminui a energia dos domínios orientados perpendicularmente à tensão [10,11]. Como estes últimos possuem paredes de domínio com 90° , um aumento da magnetostricção é observado quando estes materiais são comprimidos [12-15]. Além disso, as tensões compressivas introduzem uma anisotropia extrínseca no material e consequentemente, maiores campos magnéticos são necessários para magnetizar a amostra [12-14].

Em suma, para avaliar o desempenho dos aços elétricos nas condições mais próximas da aplicação, é necessário medir as propriedades magnéticas sob compressão. Neste artigo, será apresentada a influência das tensões de compressão (até 10 MPa) nos ciclos histeréticos, campo coercivo, campo remanente, λ_{p-p} e P .

2 METODOLOGIA

A amostra estudada neste trabalho corresponde a uma chapa (300 x 30 x 0,27 mm) de Fe-3%Si (aço elétrico) contendo forte textura Goss (110)[001]. Para eliminar os efeitos associados ao recobrimento nas propriedades magnéticas [16], o mesmo foi removido utilizando sequencialmente soluções aquecidas (80 °C) de NaOH (20%) e HCl (20%) por 4 minutos.

Os ciclos de histerese foram obtidos utilizando um *Single Sheet Tester* (SST) da marca Soken, modelo DAC-BHW-5, e os ensaios ocorreram com uma indução magnética de 1,5 T e frequência de 60 Hz. Para coletar os dados do SST, uma placa NI USB-6259 da *National Instruments* foi utilizada. A magnetostricção foi medida utilizando uma ponte de Wheatstone da marca *National Instruments*, modelo 9237. Como os valores experimentais da magnetostricção possuem um comportamento ondulatório, será apresentado a λ_{p-p} , que corresponde à amplitude desta forma de onda, i.e., diferença entre o maior e menor valor medido da magnetostricção.

A compressão da amostra foi realizada utilizando um dispositivo (334,2 x 200 x 50,8 mm) acoplado ao SST e a tensão mecânica aplicada foi medida utilizando a deformação medida pelo extensômetro e o módulo de elasticidade do ferro puro na direção [100] (132,4 GPa) [17].

As propriedades magnéticas foram medidas paralelamente à direção de laminação e determinadas por um *software* desenvolvido com linguagem *Labview* pelo nosso grupo. O mesmo tem a finalidade de interfacear os instrumentos eletrônicos (*Single Sheet Tester* e ponte de Wheatstone) com um computador, obtendo os dados experimentais em tempo real. Além disso, a amostra em questão foi ensaiada em triplicata para avaliar o desvio produzido pelo dispositivo utilizado para comprimir as chapas.

3 RESULTADOS

3.1 Ciclo de Histerese vs. Tensão de Compressão

A Figura 1 apresenta o ciclo de histerese do aço elétrico de grãos orientados (GO) submetida a diversas tensões de compressão ($|\sigma| = 0, 2, 4, 6, 8$ e 10 MPa).

A aplicação de tensões compressivas introduz uma anisotropia magnética extrínseca no material, e campos magnéticos maiores são necessários para rodar os domínios magnéticos. Consequentemente, uma diminuição gradativa da inclinação do ciclo histerético, ou permeabilidade, ocorre [10,11,18]. Esse efeito também foi observado em outras ligas com magnetostricção positiva, e.g., Fe-Al-B, Fe-Ga, Fe-Ga-B [12-14].

3.2 Propriedades Magnéticas

A partir dos ciclos histeréticos obtidos pelo SST (Figura 1), é possível determinar o campo remanente (B_r) e coercivo (H_c), já que os mesmos correspondem ao valor da indução magnética quando o campo aplicado é nulo

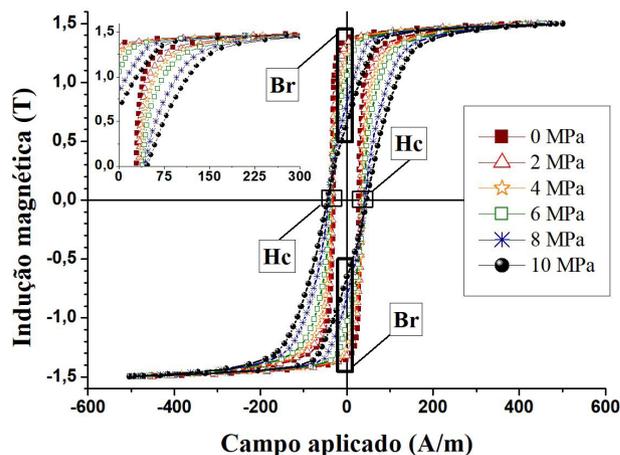


Figura 1. Ciclo de histerese do aço elétrico GO submetido à compressão.

e ao campo aplicado para obter uma indução magnética nula, respectivamente. Estas propriedades e a λ_{p-p} estão apresentadas na Figura 2.

Na condição isenta de tensão, o valor da magnetostricção pico-a-pico é $11,6 \pm 0,6$ ppm e aumenta para $21,6 \pm 0,6$ ppm com a aplicação de 10 MPa. Na condição sem tensão, seria de se esperar que os domínios magnéticos da amostra estivessem ocupando as 3 direções de fácil magnetização do material. Entretanto, devido a sua fina espessura, os domínios magnéticos orientados nas direções cristalográficas [100] e [010], i.e., orientados perpendicularmente à direção de laminação, geram uma alta energia magnetostática. Consequentemente, estes domínios têm o seu volume reduzido em detrimento do aumento dos domínios orientados na direção [001]. Em contrapartida, a textura Goss dos grãos não está perfeitamente alinhada com a direção de laminação, “jogando” parte do fluxo magnético dos domínios [001] para fora do material. Portanto, domínios de fechamento, que são os responsáveis pela geração da magnetostricção, são gerados para reduzir a energia do sistema.

O aumento de 86,4% da λ_{p-p} após a aplicação de 10 MPa indica que a compressão do material aumentou o volume dos domínios de fechamento. Este comportamento é coerente, já que a compressão de um material com magnetostricção positiva favorece energeticamente os domínios que estão alinhados perpendicularmente à aplicação da força, i.e., domínios de fechamento com paredes de 90° [10, 11]. Esse comportamento foi verificado para outros materiais com magnetostricção positiva [10, 11, 13-15].

Em relação ao B_r , o mesmo diminuiu de $1,35 \pm 0,05$ T (0 MPa) para $0,59 \pm 0,06$ T (10 MPa). Durante a magnetização, os domínios principais e de fechamento se alinham com o campo magnético aplicado para reduzir a energia magnetostática da amostra. Durante a remoção do campo magnético, conforme o mesmo tende a 0 A/m, os domínios principais permanecem majoritariamente alinhados com o sentido na qual o campo magnético foi aplicado. Já os domínios de fechamento precisam de muita energia para se

alinhar com o campo magnético externo e por essa razão, retornam para as direções de fácil magnetização localizadas em 45° da direção de laminação, criando paredes de 90° . Como na ausência das tensões de compressão o volume dos domínios de fechamento é pequeno, o material permanece praticamente magnetizado e o valor do B_r (1,35 T) é próximo do valor de indução máximo (1,5 T).

Conforme observado pelos valores de magnetostricção, a aplicação de tensões compressivas aumenta o volume dos domínios de fechamento quando comparado com a condição isenta de tensão. Consequentemente, um maior volume do material irá rotacionar quando o campo magnético externo for 0 A/m, diminuindo a magnetização da amostra. Isso explica a razão pela qual em 10 MPa, o B_r diminuiu 56,3%, atingindo $0,59 \pm 0,06$ T. Qualitativamente, aços elétricos com recobrimento também tiveram um comportamento similar [10, 11].

No caso do H_c , a aplicação de tensões compressivas aumenta linearmente o H_c , onde o coeficiente de correlação linear foi 0,994. A aplicação de 10 MPa de compressão aumentou o H_c de $30,3 \pm 0,1$ A/m para $46,2 \pm 0,7$ A/m, o que corresponde a um aumento de 52,2%. Este resultado pode ser comparado qualitativamente com o do aço elétrico com recobrimento [10, 11].

3.3 Perdas Magnéticas de Potência (P) vs. Tensão de Compressão

Como a área do ciclo de histerese corresponde à quantidade de energia dissipada na forma de calor, é possível determinar, a partir dos ciclos de histerese da Figura 1, as P do aço elétrico GO. A influência da tensão de compressão nos valores de perda pode ser encontrada na Figura 3.

A aplicação de tensões compressivas aumenta linearmente as P (coeficiente de correlação linear foi de 0,9972), atingindo 2,1 W/Kg com a aplicação de 10 MPa de compressão. É importante salientar que esta variação corresponde a 24,3%.

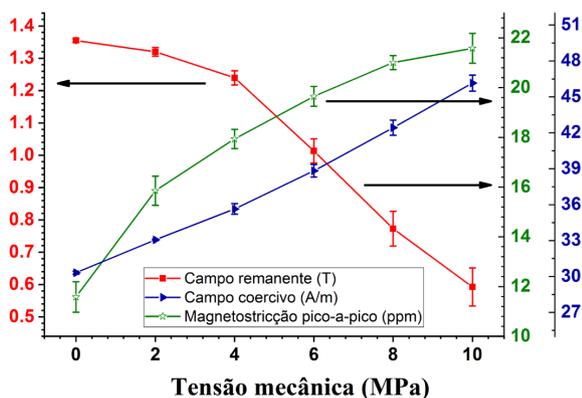


Figura 2. Campo remanente, campo coercivo e magnetostricção em função de diversas tensões de compressão.

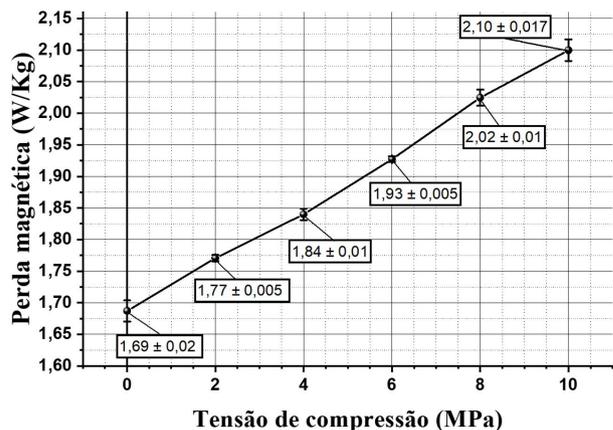


Figura 3. Perdas magnéticas de potência em função de diversas tensões de compressão.

Conforme discutido nos tópicos 3.1 e 3.2, a anisotropia magnética extrínseca gerada pela tensão de compressão dificulta a magnetização da amostra em decorrência dos domínios necessitarem de maiores campos magnéticos para rodar, aumentando as perdas magnéticas de potência. Aços elétricos com recobrimento apresentam, qualitativamente, um comportamento semelhante [9-11,18].

4 CONCLUSÃO

A aplicação de tensões de compressão nas chapas de aços elétricos com grão orientados foi deletéria para as propriedades magnéticas. Para a aplicação de 10 MPa de compressão, o B_r e H_c variaram - 56% e + 52%, respectivamente. Em relação a P e a λ_{p-p} , a mesma tensão

gerou um aumento de 24% e 86%, respectivamente. Estes resultados estão relacionados com a introdução de uma anisotropia magnética extrínseca introduzida pela tensão de compressão, onde além de dificultar a magnetização da amostra, aumenta o volume dos domínios de fechamento. Além disso, foi observado que, de modo qualitativo, os efeitos da tensão de compressão independem do recobrimento.

Agradecimentos

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo Projeto FAPESP 2017/11645-3 concedida para o Dr. Mateus Botani de Souza Dias e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) [projeto # 307631/2018-4].

REFERÊNCIAS

- 1 Cullity BD, Graham CD. Introduction to magnetic materials. Piscataway: IEEE Press Editorial Board; 2009.
- 2 Alcântara FLD, Cunha MAD. Estudo da recristalização secundária do aço silício de grão orientado. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. 2006;2:32-36.
- 3 Weiser B, Pfutzner H, Anger J. Relevance of magnetostriction and forces for the generation of audible noise of transformer cores. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2000;36(5):3759-3777.
- 4 Moses AJ, Anderson PI, Phophongviwat T, Tabrizi S. Contribution of magnetostriction to transformer noise. In: *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*; 2010 31 Aug-3 Sep; Cardiff, Wales. Cardiff: IEEE; 2010.
- 5 Shilyashki G, Pfutzner H, Hamberger P, Aigner M, Kenov A, Matkovic I. Spatial distributions of magnetostriction, displacements and noise generation of model transformer cores. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016;118:188-194.
- 6 Medeiros LB. Ruído: efeitos extra-auditivos no corpo humano. [monografia]. Porto Alegre: Centro de Especialização em Fonoaudiologia Clínica; 1999.
- 7 Weiser B, Hasenzagl A, Booth T, Pfutzner H. Mechanisms of noise generation of model transformer cores. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1996;160:207-209.
- 8 Arai S, Mizokami M, Yabumoto M. Magnetostriction of grain oriented Si-Fe and its domain model. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2011;87(9B):20-23.
- 9 Yamamoto T, Nozawa T. Effects of tensile stress on total loss of single crystals of 3 percent silicon-iron. *Journal of Applied Physics*. 1970;41(7):2981.
- 10 Swift WM, Wolfe GF. Influence of compressive stress on magnetic-properties of a (110)001 single-crystal of 3 percent Si-Fe. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1976;12(3):244-248.
- 11 Perevertov O, Schafer R. Magnetic properties and magnetic domain structure of grain-oriented Fe-3%Si steel under compression. *Materials Research Express*. 2016;3(9):12.
- 12 Dias MBS, Bormio-Nunes C, Pacheco CJ, Machado VO, Hubert O. Magnetomechanical behavior of a directly solidified Fe-Al-B alloy. *Smart Materials and Structures*. 2015;24:105004.
- 13 Wun-Fogle M, Restorff JB, Clark AE, Dreyer E, Summers E. Stress annealing of Fe-Ga transduction alloys for operation under tension and compression. *Journal of Applied Physics*. 2005; 97(10):10M301.
- 14 Bormio-Nunes C, Cardoso FM. Assessment of Fe-Ga-B alloy magnetomechanical behavior. *Journal of Materials Research*. 2018;33(15):2207-2213.
- 15 Bormio-Nunes C, Dias MBD. Piezomagnetic performance of Stress-Annealed FeAlB Alloys. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2017;53(11):4.
- 16 Anderson PI, Moses AJ, Stanbury HJ. Assessment of the stress sensitivity of magnetostriction in grain-oriented silicon steel. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007;43(8):3467-3476.
- 17 Schmid E, Boas W. *Plasticity of crystals*. London: F. A. Hughes & CO. Limited; 1950.
- 18 Anderson P. Measurement of the stress sensitivity of magnetostriction in electrical steels under distorted waveform conditions. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2008;320(20):E583-E588.

Recebido em: 18 Fev. 2019

Aceito em: 12 Abr. 2019