



ANÁLISE DA TEXTURA CRISTALOGRÁFICA DE UM AÇO ELÉTRICO DE GRÃO ORIENTADO

CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE ANALYSIS OF A GRAIN ORIENTED ELECTRIC STEEL

Mateus Botani de Souza Dias ^{1 i}
Ana Carolina Barba Macedo ^{2 ii},
Roberto Giani Pattaro Junior ^{3 iii},
Leandro Cardoso da Silva ^{4 iv},
Daniel Luiz Rodrigues Junior ^{5 v},
Carolina Cesconetto Silveira ^{6 vi},
Fernando José Gomes Landgraf ^{7 vii},

Data de submissão: (07/06/2024) Data de aprovação: (26/06/2024)

RESUMO

O crescimento econômico de um país está vinculado ao seu consumo energético; portanto, o aumento da eficiência da produção de energia pode constituir um meio eficaz para reduzir os custos de produção e, conseqüentemente, do produto final. Uma das alternativas para atingir esse objetivo é melhorar a textura cristalográfica dos aços elétricos de grão orientados que são usados nos transformadores de potência, já que os mesmos são responsáveis por auxiliar na transmissão da energia elétrica até o consumidor final. Conseqüentemente, esse trabalho discute sobre a textura cristalográfica Goss dos aços elétricos de grão orientado, empregando o software MTEX para gerar as figuras de polo, imagem de orientação e função de distribuição de orientação (ODF) da amostra estudada. Por fim, espera-se que esse trabalho possa auxiliar as empresas que trabalham com aços elétricos de grão orientado na caracterização da textura cristalográfica dos grãos, possibilitando o aumento da eficiência dos transformadores de potência.

Palavras-chave: aço elétrico de grão orientado; textura Goss; figura de polo.

ABSTRACT

¹ Doutor em Engenharia de Materiais e Professor Assistente na Faculdade de Tecnologia "Senai Nadir Dias Figueiredo". E-mail: mateus.dias@sp.senai.br.

² Graduanda da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. E-mail: anacarolina.macedo138@usp.br.

³ Doutorando em Engenharia Mecânica e Professor Assistente da Faculdade de Tecnologia Senai "Roberto Mange". E-mail: roberto.gjunior@sp.senai.br.

⁴ Doutor em Engenharia Mecânica e professor pesquisador da Faculdade de Tecnologia Senai "Roberto Simonsen". E-mail: leandro.cardoso@sp.senai.br.

⁵ Doutor em Engenharia de Materiais e Metalurgia. E-mail: daniel.rodrigues.jr.30@gmail.com.

⁶ Mestre em Engenharia Metalúrgica e Coordenadora de Pesquisa em Aços Elétricos da APERAM. E-mail: carolina.silveira@aperam.com.

⁷ Doutor em Engenharia Metalúrgica e Professor Titular da Universidade de São Paulo. E-mail: f.landgraf@usp.br



The economic growth of a country is related to its energy consumption and for this reason, increasing the energy efficiency can reduce the production cost and, consequently, the final product cost. One of the alternatives to achieve this goal is to improve the crystallographic texture of grain-oriented electrical steels that are used in power transformers, since they are responsible for assisting in the transmission of electrical energy to the final consumer. For this reason, this work discusses the Goss texture of grain-oriented electrical steels, in which the MTEX software was used to generate the pole figure, orientation image and ODF. Finally, it is expected that this work can help the grain-oriented electrical steels manufacturing in characterizing the crystallographic texture of the grains, allowing them to increase the efficiency of power transformers.

Keywords: grain-oriented electrical steel; Goss texture; pole figure.

1 INTRODUÇÃO

Embora o Brasil já possua destaque internacional na produção de energia limpa, o mesmo comprometeu-se, durante o acordo de Paris em 2016, a reduzir suas emissões de CO₂ (International Energy Agency, 2020). Uma das alternativas para se atingir esse objetivo é aumentar a eficiência dos transformadores elétricos de potência (Saidur, 2010), já que os mesmos são utilizados para alterar a tensão elétrica da rede entre a usina geradora de energia e o consumidor final.

É amplamente reconhecido pelas empresas do setor de energia que a textura cristalográfica influencia a eficiência dos transformadores. Quando o ferro está texturizado com a família de direções $\langle 001 \rangle$ paralela à direção de laminação, o processo de magnetização do material é facilitado, reduzindo as perdas de potência magnética (Cullity; Graham, 2009). Dessa forma, esses aços são produzidos em escala industrial com uma textura Goss (100)[001], ou seja, a família de planos paralela à superfície é $\{100\}$ e a família de direções $\langle 001 \rangle$ paralela à direção de laminação (Na; Flatau, 2012), sendo então denominadas de aços elétricos de grão orientado. Entretanto, nem todos os grãos possuem uma textura cristalográfica Goss, o que acaba por aumentar as perdas magnéticas do material e, conseqüentemente, do transformador (Lee; Kim, 2022). Do ponto de vista industrial, o procedimento para obter uma média da desorientação de todos os grãos é através da medição da indução magnética do material. Contudo, para compreender como a textura Goss se desenvolve nesse material, é necessária a utilização da difração de elétrons retroespalhados (EBSD), permitindo a análise individual dos grãos desorientados (Lee; Kim, 2022). Dessa forma, esse trabalho tem como objetivo apresentar os padrões experimentais da textura Goss obtidos de uma amostra de aço elétrica de grão orientada. Assim, busca-se auxiliar as empresas que atuam no mercado de aços elétricos na caracterização da textura cristalográfica.

2 METODOLOGIA

Para a realização desse trabalho, a siderúrgica APERAM gentilmente cedeu 1 chapa de aço elétrico com classificação H110-0,27, que possuía dimensões de 310 mm x 30 mm x 0,27 mm. Tendo em vista que os grãos desse material têm por volta de 5 cm de diâmetro, um grão da chapa foi cortado com uma cortadeira Buehler, modelo ISOMET 1000, resultando em uma dimensão aproximada de 1 x 1 cm. A amostra foi então embutida em uma embutidora

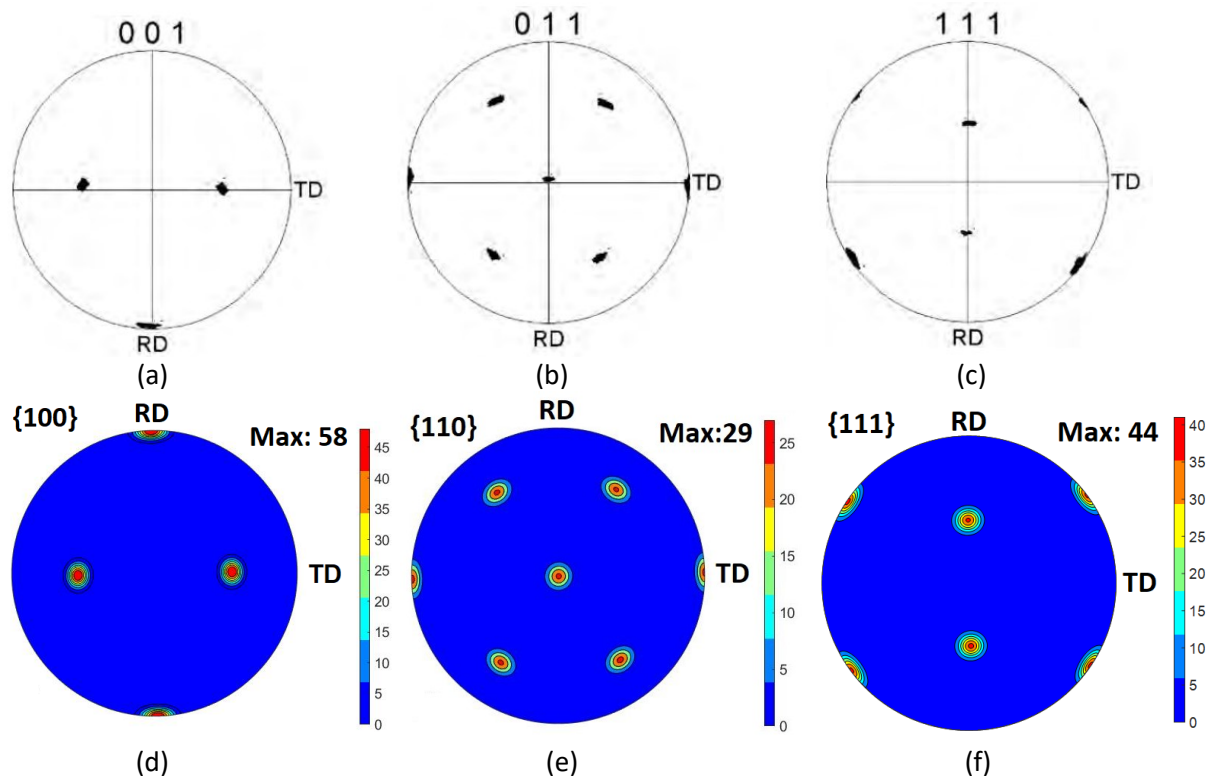
metalográfica EM30D e lixada utilizando lixas de granulação P800, P1200, P2000. Posteriormente, a etapa de polimento foi realizada utilizando uma politriz com velocidade de 8 rpm e pastas de diamante com 6 μm (40 minutos), 3 μm (20 minutos) e 1 μm (10 minutos). Por fim, as amostras foram polidas com sílica coloidal de 0,04 μm utilizando uma Minimet 1000, que aplicou uma força de 5 N a uma velocidade de 15 rpm.

Para a análise da textura cristalográfica, as amostras polidas foram examinadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV-FEG), modelo Inspect F5, utilizando um *step size* de 1 micrometro e o software TSL OIM data collection 7. Após a geração dos dados de textura cristalográfica pelo MEV, os resultados foram importados no software MTEX para gerar as figuras de polo, imagem de orientação e ODF. Para isso, o software MTEX foi baixado do site <https://mtextoolbox.github.io/index> e integrado ao ambiente do MATLAB, possibilitando a remoção dos pontos maus indexados das imagens. Posteriormente, os resultados foram alinhados com a direção de laminação (RD) apontada para o “norte”, a direção transversal (TD) para o “leste” e a direção normal (ND) perpendicularmente fora do plano.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 apresenta a figura de polo para a família de planos $\{100\}$, $\{110\}$ e $\{111\}$ com base na literatura (Dorner; Zaefferer; Raabe, 2007) ((a), (b) e (c)) e para os dados obtidos experimentalmente nesse trabalho ((d), (e), (f)).

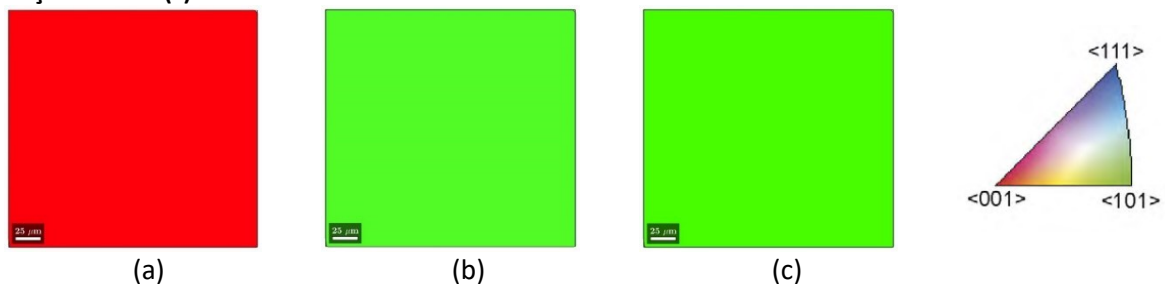
Figura 1 – Figuras de polos obtidas por análise de EBSD para os planos $\{001\}$ (a/d), $\{011\}$ (b/e) e $\{111\}$ (c/f). Os dados em (a), (b) e (c) foram obtidos em (Dorner; Zaefferer; Raabe, 2007) e os dados em (d), (e) e (f) foram obtidos experimentalmente. “RD” e “TD” são as direções de laminação e transversal, respectivamente.



Fonte: Dorner; Zaefferer; Raabe, (2007).

Para identificar a textura do material, as posições dos polos devem estar organizadas em posições específicas no plano de projeção, no qual a textura Goss pode ser identificada pelos pontos pretos nas Figura 1 (a), (b) e (c). Independente do plano cristalográfico apresentado nas figuras de polo, as posições dos polos obtidos experimentalmente nesse trabalho são exatamente iguais às do artigo, indicando que a amostra possui a textura Goss. Além disso, a intensidade da textura é alta para todos os planos cristalográficos, o que indica que a amostra possui uma textura Goss forte. Dessa forma, para confirmar a existência da textura Goss, as imagens de orientação foram geradas (cf. Figura 2), no qual é apresentado a direção de laminação (a), direção transversal (b) e direção normal (c).

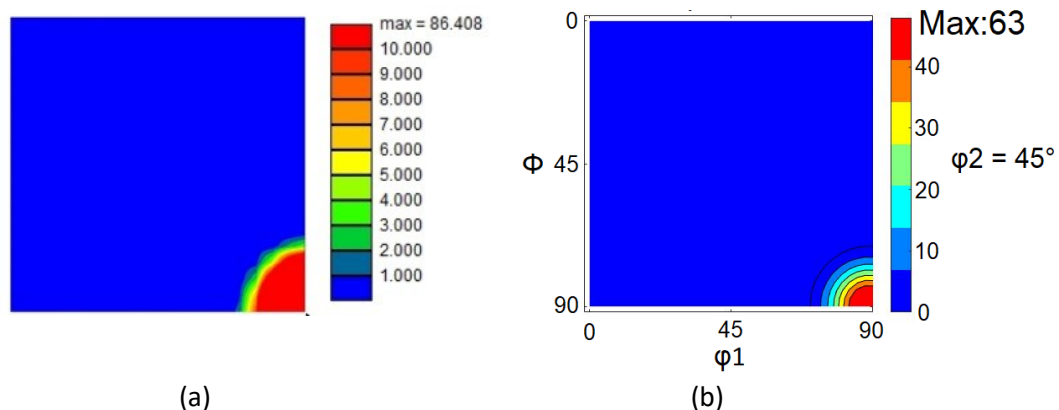
Figura 2 – Figura orientação obtida por EBSD na direção de laminação (a), direção transversal (b) e direção normal (c).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tendo em vista que a textura Goss se caracteriza pela direção [001] paralela à direção de laminação e o plano (011) paralelo a superfície da chapa, a coloração das imagens de orientação está coerente, já que o vermelho e o verde indicam as direções [001] e [011], respectivamente. Por fim, a última confirmação da presença da textura Goss é apresentada na Figura 3, que corresponde a uma ODF na seção de $\phi_2 = 45^\circ$, no qual as figuras (a) correspondem a um resultado da literatura (NA et al., 2023) e (b) é o resultado obtido experimentalmente nesse trabalho.

Figura 3 - ODF da seção $\phi_2 = 45^\circ$ para um resultado da literatura (NA et al., 2023) (a) e obtido experimentalmente nesse trabalho (b).



Fonte: Na et al., (2023).

Tanto na amostra de referência quanto no resultado experimental, o ponto de maior intensidade de textura para uma seção constante de $\phi_2 = 45^\circ$ ocorreu quando $\phi_1 = 90^\circ$ e



$\theta = 90^\circ$, o que corresponde exatamente à textura Goss, conforme pode se observar na Figura 3 (a).

4 CONCLUSÃO

O trabalho analisou, com bases em artigos da literatura, a textura cristalográfica de uma amostra de aço elétrico de grão orientado obtido por difração de elétrons retroespalhados. Para isso, os dados experimentais foram beneficiados e o software MTEX foi utilizado para gerar as figuras de polo, imagem de orientação e ODF, confirmando que a amostra possui uma textura Goss intensa, i.e., [001] alinhada com a direção de laminação e o plano (011) paralela à superfície. Além disso, o software MTEX demonstrou ser eficiente para o beneficiamento e manipulação dos dados de EBSD, permitindo seu uso simultâneo em vários computadores e dispensando a necessidade de uma chave física para funcionamento.

Dessa forma, espera-se que esse artigo possa auxiliar as empresas que comercializam aços elétricos de grão orientado na caracterização microestrutural dos grãos que possuem uma textura Goss desalinhada com a direção de laminação. Isso possibilitará que tais empresas compreendam melhor o mecanismo de formação dessa textura nos aços elétricos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a APERAM pelo fornecimento das amostras do estudo e as bolsas fornecidas pela FAPESP [#2021/04412-8] e CNPQ (# 164705/2022-8).

REFERÊNCIAS

CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to magnetic materials**. 2. ed. Hoboken, N.J.: IEEE/Wiley, 2009.

DORNER, D.; ZAEFFERER, S.; RAABE, D. Retention of the Goss orientation between microbands during cold rolling of an Fe3%Si single crystal. **Acta Materialia**, v. 55, n. 7, p. 2519–2530, abr. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.11.048>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Energy Review 2019: The latest trends in energy and emissions in 2019**. [s.l.] OECD, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019>. Acesso em: 25 maio 2024.

SEIL, Lee; SE-JONG, Kim. Statistical analysis of misorientation to goss orientation of highly grain-oriented silicon steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 560, p. 169563, out. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169563>.

JUNGKYUN, Na *et al.* Novel process for the formation of Goss grains by concentrated shear strain on surface in inhibitor-free silicon steel. **Metals and Materials International**, v. 29, n. 3, p. 821–832, mar. 2023. DOI: [10.1007/s12540-022-01266-w](https://doi.org/10.1007/s12540-022-01266-w)

SUOK-MIN, Na; FLATAU, A. B. Surface-energy-induced selective growth of (001) grains in magnetostrictive ternary Fe–Ga-based alloys. **Smart Materials and Structures**, v. 21, n. 5, p. 055024, 1 maio 2012. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/230902254_Surface-energy-induced_selective_growth_of_001_grains_in_magnetostrictive_ternary_Fe-Ga-based_alloys. Acesso em: 25 maio 2024.

SAIDUR, R. A review on electrical motors energy use and energy savings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 3, p. 877–898, abr. 2010. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.018>

Sobre os(as) Autores(as)

ⁱ Mateus Botani de Souza Dias



Doutor, mestre e engenheiro em Engenharia de Materiais pela Universidade de São Paulo. Atualmente, estou como docente do Curso Superior de Tecnologia de Processos Metalúrgicos na Faculdade Senai de Tecnologia (Nadir Dias de Figueiredo). Meus temas de pesquisa são os materiais magnéticos aplicados nas tecnologias de transição energética, como aços elétricos e ímãs de NdFeB. <https://orcid.org/0000-0001-6231-8880>

ⁱⁱ Ana Carolina Barba Macedo



Atualmente, sou graduanda em Engenharia de Materiais na Escola Politécnica da USP e atualmente está alocada como Analista de Finanças no setor de Planejamento financeiro do Itaú Unibanco.

ⁱⁱⁱ Roberto Giani Pattaro Junior



Doutorando em Engenharia Mecânica pela Unicamp. Mestre em Engenharia Mecânica pela Unicamp. Graduação em Engenharia de Produção - Anhanguera Educacional. Atualmente é Professor Assistente de Educação Superior no SENAI - Departamento Regional de São Paulo. Grande experiência na área de Engenharia Mecânica e de Produção, com ênfase em Engenharia Mecânica no ramo de usinagem de materiais. <https://orcid.org/0000-0003-4992-1006>.

iv Leandro Cardoso da Silva



Com 20 anos de experiência, sou Engenheiro de Produção Mecânica, Mestre em Engenharia de Materiais e Doutor em Engenharia Mecânica. Atuo na interseção entre indústria e pesquisa, focando em inovação, otimização de processos e segurança. Sou professor e pesquisador na Faculdade Senai São Paulo. <https://orcid.org/0000-0003-1636-3685>.

v Daniel Luiz Rodrigues Junior



Possui graduação em Materiais Processos e Componentes Eletrônicos pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo (2006), mestrado (2009) e doutorado (2014) em Engenharia Metalúrgica pela Universidade de São Paulo. Atualmente é pesquisador no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP. <https://orcid.org/0000-0003-1380-4844>.

vi Carolina Cesconetto Silveira



Possui graduação em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Santa Catarina (2007) e mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela Universidade Federal de Minas Gerais (2011). Atualmente é pesquisadora - Aperam South America. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Metalurgia Física.

vii Fernando José Gomes Landgraf



Professor Titular da Escola Politécnica da USP. Possui graduação em Engenharia Metalúrgica pelo Centro Universitário da FEI (1976), mestrado (1987), doutorado (1992) e Livre Docência (2007) em Engenharia Metalúrgica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; atuou por 29 anos como pesquisador, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, até 2005. Assumiu a Diretoria de Inovação do instituto (julho 2009 a agosto 2012), e foi Diretor Presidente do IPT entre 2012 e 2018. Como pesquisador e professor, atua na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase na relação entre a microestrutura e o comportamento magnético dos materiais de engenharia. <https://orcid.org/0000-0001-5390-0879>.