



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA
E DE MATERIAIS



Fernando Augusto Rodrigues Machado

Estudo descritivo da microtextura de um aço elétrico de
grão não orientado

Ouro Preto

2025

Fernando Augusto Rodrigues Machado

Estudo descritivo da microtextura de um aço elétrico de grão não orientado

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Dr. Gilberto Henrique Tavares Álvares da Silva.

Coorientador: Dr. Leonardo Martins Graça

Ouro Preto

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M149e Machado, Fernando Augusto Rodrigues.

Estudo descritivo da microtextura de um aço elétrico de grão não orientado. [manuscrito] / Fernando Augusto Rodrigues Machado. - 2025. 55 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Henrique Tavares Álvares da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Martins Graça.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Aço-Eletrometalurgia. 2. Metalurgia. 3. Aço-Tratamentos térmicos.

I. Silva, Gilberto Henrique Tavares Álvares da. II. Graça, Leonardo Martins. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 669

Bibliotecário(a) Responsável: Angela Maria Raimundo - SIAPE: 1.644.803



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE
MATERIAIS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Fernando Augusto Rodrigues Machado

Estudo descritivo da microtextura de um aço elétrico de grão não orientado

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Aprovada em 10 de dezembro de 2025

Membros da banca

Prof. Dr. Gilberto Henrique Tavares Alvares da Silva - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Leonardo Martins Graça - Universidade Federal de Ouro Preto
MSc. Tarcísio Ferreira Dias - ArcelorMittal Tubarão

Prof. Gilberto Henrique Tavares Alvares da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/12/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Gilberto Henrique Tavares Alvares da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/12/2025, às 08:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1031855** e o código CRC **5C527BEB**.

AGRADECIMENTOS

Sou grato a Deus e a Nossa Senhora Aparecida.

Aos meus pais Claudio e Shirlei, e meu irmão Felipe, pelo incentivo aos estudos.

Quero agradecer ao ensino público brasileiro, Escola Municipal LivreMente, Instituto Federal Minas Gerais - Campus Ouro Branco, a Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas e a Fundação Gorceix.

Aos doutores da República Aquarius, por me moldarem e capacitarem para vida adulta e profissional.

A equipe da Fusão II da Siderúrgica Itabirito, a equipe do P&D do LTQ da ArcelorMittal - Tubarão, e a equipe da Unidade Técnica da Laminação a Frio da Usiminas – Ipatinga.

Quero agradecer também aos professores e amigos de sala que fiz na Escola de Minas durante a minha trajetória aos departamentos DEMET, NanoLab, DEGEO, SICEM.

Para finalizar, agradeço ao Professor Gilberto, Professor Leonardo e Especialista Tarcísio.

*"O presente é deles; o futuro,
pelo qual realmente trabalhei,
é meu. "*

(Nikola Tesla)

RESUMO

No atual cenário energético mundial, há uma crescente demanda por otimização dos processos de geração e transmissão de energia, com foco na minimização de perdas e durabilidade dos motores rotativos. Esse contexto, tem impulsionado o desenvolvimento de ligas metálicas de menor custo, mas que tenham propriedades em desempenho, como a magnetizabilidade e permeabilidade, comparáveis àquelas como os aços, por exemplo. Dentre as alternativas viáveis para núcleo de estatores e rotores, destaca-se o aço elétrico de grão não-orientado (GNO), uma opção promissora para atender a fabricação de eletrodomésticos. O uso contínuo desse tipo de equipamento no cotidiano, contribui para o envelhecimento magnético do rotor, diminuindo sua performance até ficar obsoleto, ou gastar mais energia que o necessário. O aço estudado nesta monografia é um aço elétrico de baixo teor de silício (~1), com adição de antimônio e manganês como estabilizantes de grãos. Para compreender melhor as orientações cristalográficas preferenciais desse aço, foi realizada uma pesquisa laboratorial utilizando a técnica de Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD – Difração de Elétrons Retroespalhados). Como resultado foram obtidas representações das microtexturas usuais, por exemplo, figuras de pólo inversas, figuras de pólo e funções de distribuição de orientação (ODF – *Orientation Distribution Function*), as quais são a base do estudo das orientações cristalográficas preferenciais desenvolvidas pelo processamento, bem como aquelas desejadas para as propriedades que se esperam destes materiais. A textura dos grãos está diretamente relacionada à composição química da liga, sendo essencial o controle rigoroso dos elementos para garantir alta eficiência nos motores. Além disso, o tratamento térmico adequado contribui significativamente para o aumento da eficiência, promovendo alívio de tensões e crescimento dos grãos, embora esse aspecto não seja abordado neste estudo. Se trata de uma liga já comercializada, uma liga baixa silício “-padrão”, amplamente utilizada na fabricação de núcleos de estatores. A aplicação desse material em núcleos de motores elétricos proporciona vantagens adicionais, as quais são atribuídas à adição de elementos como silício, manganês e antimônio. Esses elementos contribuem significativamente para a melhoria da magnetizabilidade dos aços, bem como para a redução das perdas magnéticas associadas às microcorrentes de Foucault. Tais melhorias resultam na mitigação do envelhecimento magnético do núcleo, promovendo, assim, um aumento da vida útil e da eficiência do dispositivo, que pode ser atribuída à permeabilidade magnética. A textura dos grãos está diretamente relacionada à composição química da liga, sendo essencial o controle rigoroso dos elementos para garantir alta eficiência nos motores. Além disso, o tratamento térmico adequado contribui significativamente para o aumento da eficiência, promovendo alívio de tensões e crescimento dos grãos, embora esse aspecto não seja abordado neste estudo.

Palavras-chave: Aços para fins eletromagnéticos; aços de grão não orientado; EBSD; fibras cristalográficas, representações microtexturais;

ABSTRACT

In the current global energy scenario, there is a growing demand for the optimization of energy generation and transmission processes, with a focus on minimizing losses and on the durability of rotating motors. This context has driven the development of lower-cost metallic alloys that nevertheless have performance properties, such as magnetizability and permeability, comparable to those of steels, for example. Among the viable alternatives for stator and rotor cores, non-oriented electrical steel (NOES) stands out as a promising option to meet the manufacturing of household appliances. The continuous use of this type of equipment in daily life contributes to the magnetic aging of the rotor, reducing its performance until it becomes obsolete, or consumes more energy than necessary. The steel studied in this monograph is a low-silicon electrical steel (~ 1), with the addition of antimony and manganese as grain stabilizers. To better understand the preferred crystallographic orientations of this steel, a laboratory investigation was carried out using the Electron Backscatter Diffraction technique (EBSD – Electron Backscattered Diffraction). As a result, representations of the usual microtextures were obtained, for example, inverse pole figures, pole figures, and orientation distribution functions (ODF – “Orientation Distribution Function”), which are the basis for the study of the preferred crystallographic orientations developed by processing, as well as those desired for the properties expected from these materials. The grain texture is directly related to the chemical composition of the alloy, making strict control of the elements essential to ensure high efficiency in motors. In addition, appropriate heat treatment contributes significantly to the increase in efficiency, promoting stress relief and grain growth, although this aspect is not addressed in this study. This is a commercially available alloy, a standard low-silicon alloy widely used in the manufacturing of stator cores. The application of this material in electric motor cores provides additional advantages, which are attributed to the addition of elements such as silicon, manganese, and antimony. These elements contribute significantly to improving the magnetizability of steels, as well as to reducing magnetic losses associated with Foucault microcurrents (eddy currents). Such improvements result in the mitigation of the magnetic aging of the core, thus promoting an increase in the service life and efficiency of the device, which can be attributed to magnetic permeability. The grain texture is directly related to the chemical composition of the alloy, making strict control of the elements essential to ensure high efficiency in motors. Furthermore, appropriate heat treatment contributes significantly to the increase in efficiency, promoting stress relief and grain growth, although this aspect is not addressed in this study.

Keywords: Steels for electromagnetic purposes; steels non-oriented grain gno; EBDS; microtextural representations; crystallography fibers.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Texturas Importantes das fibras e para materiais CCC (JAMAATI, 2015)	38
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Roller Table (rolo de mesa), catálogo da WEG (CÁTALOGO DE PRODUTOS WEG).	17
Figura 1.2 Motor WEG 0,25 cv (CÁTALOGO DE PRODUTOS WEG)	18
Figura 3.3. Diagrama Binário Ferro-Silício (GONZÁLES, HOUBAERT, 2013)	23
Figura 3.4. Campo magnético de diferentes materiais quando exposto a um escudo elétrico (CULLITY, 2009).	24
Figura 3.5. Indução Magnética em um cristal de ferro em função do campo aplicado (CULLITY, 2009).	25
Figura 3.6. Material com cristais (a) material sem textura cristalográfica e (b) com textura cristalográfica (GONÇALVES, 2015).	27
Figura 3.7. Equipamento do recozimento em caixa – BAF (Autorial).	31
Figura 3.8. Interação do feixe de elétrons com a amostra cristalina e da interseção dos cones de difração na tela de fósforo, formando as raias de Kikuchi (MAITLAND & SITZMAN, 2006).....	33
Figura 3.9. Amostra posicionada em relação à esfera de referência (PADILHA e SICILIANO Jr, 2005).	34
Figura 3.10. Figura de polo (100) para uma chapa com 10 grãos (a) chapa sem orientação preferencial; (b) chapa com orientação preferencial (PADILHA e SICILIANO, 2005).	35
Figura 3.11. Triângulos estereográficos para cristais de simetria cúbica ((ENGLER & RANDLE, 2010).	36
Figura 3.12. Representação esquemática das rotações em torno dos ângulos de Euler ϕ_1 , Φ e ϕ_2 , aplicadas sequencialmente nas ordens 1, 2 e 3, que definem a transformação entre os sistemas de referência da amostra e do cristal (ENGLER & RANDLE; 2010).....	36
Figura 3.13. Representação tridimensional das orientações, onde cada ponto corresponde a uma combinação dos ângulos ϕ_1 , Φ e ϕ_2 , seguindo a convenção de Bunge para descrever a posição do cristal (ENGLER & RANDLE; 2010).....	37
Figura 3.14. (100), (110) e (111) planos CCC da estrutura de um cristal (HAWAZY, 2017).....	37
Figura 3.15. Representação das texturas para (a) $\phi_1 = 0^\circ$ e (b) $\phi_2 = 45^\circ$ (JAMAATI, 2015)....	38
Figura 4.16. Representação esquemática da amostragem do aço estudado. Localização na bobina, porção selecionada após etapas de corte e processo de embutimento (AUTORAL).....	40
Figura 4.17. Amostra polida antes de ser analisada no MEV (AUTORAL)	42

Figura 4.18. Foto do Microscópio de Varredura Eletrônica (MEV), NanoLAB, Escola de Minas, UFOP, MG. (AUTORAL).	43
Figura 5.19. Mapa de Banda de Contraste. Representação da microestrutura do aço GNO gerada a partir dos dados de difração indexados (IMAGEM OBTIDA EM LABORATÓRIO).	46
Figura 5.20. Mapa da microestrutura do aço GNO destacando o tamanho de grão ferrítico do material (IMAGEM OBTIDA EM LABORATÓRIO).	46
Figura 5.21. Direção Espacial da amostra analisada (AUTORAL)	47
Figura 5.22. a) Mapa de IPF para o aço GNO. b) Triângulo estereográfico padrão para o sistema cristalino cúbico de face centrada (IMAGEM OBTIDA EM LABORATÓRIO).	48
Figura 5.23. Figuras de Polo Inversa para as direções a) X (ou DL), b) Y (ou DT) e c) Z (ou DN) da amostra de aço GNO (IMAGEM OBTIDA EM LABORATÓRIO)	48
Figura 5.24. Figuras de Polo para os planos a) (111), b) (100), c) (110) e d) (112), planos de interesse para o sistema cúbico de face centrada da fase constituinte Ferrita (IMAGEM OBTIDA EM LABORATÓRIO).	50
Figura 5.25. ODFs para o aço GNO; a) $\varphi_2 = 0^\circ$ e b) $\varphi_2 = 45^\circ$ (IMAGEM OBTIDA EM LABORATÓRIO).	51
Figura 5.26. ODFs para o aço GNO em $\varphi_2 = 45^\circ$ destacando a Fibra γ e seus componentes indexados (AUTORAL).	52

LISTA DE SÍMBOLOS

Ferro α – Ferrita – Cúbica de Corpo Centrado (CCC).

Fibra γ – Orientação cristalográfica na direção (111)//DN, com os vetores ortogonais a direção de laminação.

Fibra α – Orientação cristalográfica definida pela orientação do eixo $\langle 110 \rangle$ ortogonal (DL).

Componente Textural F – No plano (111), com a direção vetorial em $\langle -1-1\ 2 \rangle$

Componente Textural E – No plano (111), com a direção vetorial em $(\langle 1-3\ 2 \rangle\ \phi_1, \Phi, \phi_2$ – Ângulos de Euler.

LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS

CCC – Cúbico de Corpo Centrado (Estrutura cristalina)

CI – *Coeficient Index*

CSL – *Coincidence Site Lattice*

DEGEO – Departamento de Geologia

DEMET – Departamento de Engenharia Metalúrgica

DL – Direção de Laminação

DN – Direção Normal

DT – Direção Transversal

EBSD – *Electron Backscattered Diffraction* (Difração de Elétrons Retroespalhados)

EDS – Espectroscopia por Energia Dispersiva

FG – Fundação Gorceix

GO – Grão Orientado

GNO – Grão Não Orientado

IF – *Interstitial-Free* (Aço livre de intersticiais)

LTQ – Laminador de Tiras Quente

MAD – Ângulo Máximo de Desvio MEV – Microscópio Eletrônica de Varredura ppm – Partes por milhão

REDEMAT – Rede Temática em Engenharia de Materiais

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	20
2.1. Objetivo Geral.....	20
2.2. Objetivos específicos	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1. Aços Elétricos	21
3.2. Permeabilidade magnética	23
3.3. A histerese magnética e sua relevância na eficiência dos componentes magnéticos	24
3.4. Microestrutura e Anisotropia	25
3.5. Texturas de recristalização	25
3.5.1. Aços elétricos de grão orientado (GO).....	26
3.5.2. Propriedades Particulares	27
3.5.3. Aplicações	27
3.6. Aços elétricos de grão não orientado (GNO).....	27
3.6.1. Propriedades particulares.....	27
3.6.2. Aplicações	28
3.6.3. Processo de fabricação dos GNO	28
3.7. Difração de Elétrons Retroespalhados (Electron Back Scattered Diffraction – EBSD).....	30
3.7.1. Princípio de funcionamento	31
3.7.2. Obtenção e análise de dados	32
3.8. Projeções estereográficas.....	32
3.9. Figura de polo (direta).....	32
3.10. Figura de pólo inversa	34
3.11. Função da distribuição de orientações (ODF).....	34
3.12. Avanços recentes e pesquisas atuais	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS	39
5. RESULTADOS	43
5.1. Microestrutura	45
5.2. Figura de pólo inversa	46
5.3. Figura de pólo direta.....	48
5.4. Função de distribuição de orientação.....	49
6. CONCLUSÃO.....	51

1. INTRODUÇÃO

Os “Aços elétricos” hoje em dia fazem parte catálogo das siderúrgicas no segmento de planos, devido as suas particularidades físicas e valor agregado, interessam dois segmentos econômicos onde no Brasil tem engenharia forte, a siderurgia e a indústria de eletricidade. A história dos aços elétricos no mundo se confunde com a história da indústria da eletricidade que nasceu em 1880, com esse cenário a importância dos aços ao silício foi rapidamente reconhecida (LANDGRAF, 2002).

Empresas como Weg, Embraco e Tecumseh são grandes exportadoras de motores, e só essas 3 consomem mais da metade do aço de grão não orientado produzido no País. Como o mercado e a legislação de alguns países vêm exigindo motores cada vez mais eficientes, tem havido um fluxo contínuo de inovações. Mesmo dispondo de um número restrito de variáveis de produto a controlar (composição química, tamanho de grão, textura e inclusões) (LANDGRAF, 2002).

Quando se pensa em transformação de energia elétrica em energia mecânica ou magnética, os aços elétricos proporcionam a melhor eficiência de conversão, por meio do controle e da otimização das perdas magnéticas (CARDOSO, 2017).

A evolução da sociedade moderna atual está atrelada a eficiência dos processos de conversão e uso da energia elétrica. Segundo Santos (2017), os aços elétricos, especialmente os de grão não-orientado (GNO), são fundamentais nesse contexto devido às propriedades magnéticas superiores, com alta permeabilidade e baixas perdas por histerese. Essas características tornam os aços GNO essenciais em núcleos de motores elétricos, geradores, compressores para geladeiras, transformadores, otimizando o desempenho em equipamentos industriais, inclusive sob condições de extrema operação.

Um exemplo significativo para o uso de ligas de aço com até ~3% de silício são os motores industriais acoplados a mesas de rolos, comuns em linhas de laminação a quente na indústria siderúrgica como o “*Roller Table*” da WEG Figura 1.1.

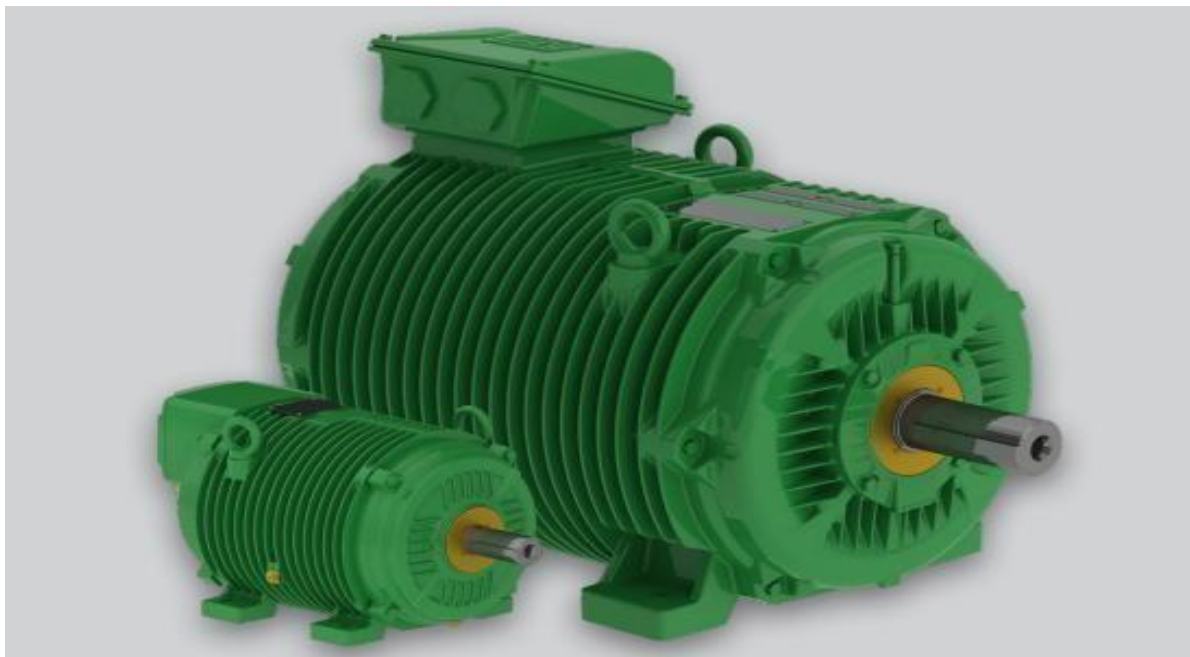


Figura 1. 1. Roller Table (rolo de mesa), catálogo da WEG (CÁTALOGO DE PRODUTOS WEG).

Esses motores operam por longos períodos de tempo, com altos níveis de torque e com variações de carga saindo de zero ao limite em instantes, exigindo materiais com excelente resposta magnética, estabilidade térmica e elevada resistência ao envelhecimento magnético. A necessidade de magnetização rápida e eficiência energética é fundamental nesses sistemas, especialmente em ambientes com acúmulo de resíduos e contaminação, o que dificulta ainda mais a operação confiável dos equipamentos (WEG, 2025).

O aço de grão orientado é utilizado na fabricação de motores mais robustos como o “*Roller Table*” citado acima é amplamente utilizado nas siderúrgicas brasileiras nos mais diversos tipos de aplicações, como por exemplo, nas cadeiras de laminação a quente e laminação a frio. Esse motor tem a capacidade de rotação controlada, além de ser robusto, compacto e versátil, aguentando longos períodos de funcionamento na máxima intensidade que uma indústria siderúrgica exige para ser competitiva.

Na linha de produção de produtos planos, existe uma sequência de etapas para fazer uma placa lingotada se transformar em uma bobina a frio de aço “elétrico” semi-processado. Uma funcionalidade para o uso dessas tiras é para fabricação de núcleos de motores elétricos, como o núcleo e armadura. A quantidade de silício na liga intensifica exponencialmente a capacidade do núcleo induzir um campo magnético, além disso, o controle rigoroso químico, se faz determinante para produção de motores com núcleos permeáveis, compactos, duráveis e que entreguem uma força de acordo com a engenharia do produto final, segundo Beckley (2002).

As ligas de aço até ~1% em peso de silício na liga, esses aços são utilizados motores de baixa potência, eles são amplamente utilizados em ventiladores, sopradores, compressores, picadores, bombas, entre outros. Estes motores precisam ser ágeis, confiáveis, eficientes e ter

qualidade garantida para os mais diversos clientes do mercado de máquinas elétricas. Um exemplo para aplicação desses aços no Brasil são os motores IP21 da WEG Figura 1.2, que tem potência de 0,25 cavalos e pode ser utilizado nos mais diversos exemplos citados acima



Figura 1.2 Motor WEG 0,25 cv (CATÁLOGO DE PRODUTOS WEG).

Atualmente, a indústria de aços elétricos encontra-se em ampla expansão e consolidação no mercado global. Diversas siderúrgicas oferecem em seus portfólios aços com teores de silício rigorosamente controlados, capazes de atender às especificações técnicas exigidas por fabricantes como a WEG. Esse panorama evidencia um desafio significativo no desenvolvimento e na fabricação de núcleos para motores elétricos, uma vez que esses equipamentos operam, em geral, de forma contínua e sob condições severas.

De acordo com Landgraf (2002), os alguns elementos químicos podem melhorar a resistividade elétrica do aço, como o silício e o alumínio. Vale ressaltar que adições desses elementos acima de 1% pode aumentar os custos e gerar instabilidades operacional. Além deles, o fósforo influencia ainda mais a resistividade elétrica, porém com uma limitação de até 0,2% na liga. O controle rigoroso do teor de carbono também é importante, seu efeito na forma de carboneto é pior do que em solução sólida, como indica a preocupação dos fabricantes com o “Envelhecimento magnético”

A adição controlada do antimônio tem como objetivo regular a precipitação de nitretos de alumínio nos contornos do grão, fator que influencia diretamente o crescimento dos grãos e, consequentemente, as propriedades magnéticas do aço. Por esse motivo, o uso de antimônio tem sido cada vez mais explorado na indústria, visando a otimização do desempenho magnético desses materiais (BAPAPOUR, et al, 2025).

Para obtenção de dados da caracterização microestrutural e a microtextura dos aços ao silício, a técnica mais indicada é da Difração de Elétrons Retroespalhados (*Electron Backscattered Diffraction - EBSD*). Essa técnica é fundamental para o estudo de materiais, pois permite não apenas a análise da microestrutura, como o tamanho e a forma dos grãos, mas também a obtenção de dados precisos sobre a orientação cristalográfica e a distribuição das texturas presentes na amostra. Por meio do EBSD, é possível mapear a orientação dos cristais, identificar densidade de vetores e planos cristalográficos por meio da função de distribuição das orientações (ODF, do inglês *Orientation Distribution Function*).

Dessa forma, o uso do EBSD se justifica pela importância crítica das texturas dos aços ao silício, uma vez que essas texturas influenciam diretamente as propriedades magnéticas do material, especialmente a capacidade de reduzir perdas energéticas. Assim, conhecer detalhadamente a textura é imprescindível para o desenvolvimento e a otimização desses aços, e o EBSD se apresenta como a ferramenta mais sofisticada para essa finalidade.

O aperfeiçoamento das análises das texturas cristalográficas tem sido possível graças às técnicas avançadas, como o EBSD. A combinação dessa técnica com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) permite a caracterização da textura cristalográfica por meio de representações bidimensionais a partir de dados tridimensionais, destacando-se projeções estereográficas como uma das formas mais usuais de interpretação (REZENDE, 2003).

Este trabalho buscou caracterizar as principais representações microtexturais do aço GNO por meio da técnica de EBSD, identificando orientações preferenciais e fibras presentes na amostra ENC, com foco em contribuir para avanços científicos e melhorias industriais. Os resultados mostraram que a microestrutura ferrítica policristalina, com ampla variação de tamanhos de grão, confirma a condição de aço semi-processado; as análises cristalográficas revelaram maior densidade de grãos no plano (111), indicando tendências iniciais de orientação preferencial; e a avaliação da textura, via figuras de polo e ODF, destacou a fibra γ ($\langle 111 \rangle // DL$) como principal componente, com picos associados aos componentes E ($111 \langle -1-1 \ 2 \rangle$) e F ($111 \langle -1-3 \ 2 \rangle$). Assim, mesmo em estado semi-processado, o material já apresenta elementos texturais de interesse industrial, reforçando a importância do controle microtextural para otimizar suas propriedades eletromagnéticas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Descrever orientação cristalográfica de um aço de grão não-orientado (GNO) utilizando as principais ferramentas para representações microtexturais de dados gerados usando a técnica de Difração de Elétron Retroespalhados (EBSD).

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

i) Realizar a preparação metalográfica do aço elétrico GNO especificamente para análises microtexturais; ii) Aplicar a técnica EBSD para gerar dados de orientação cristalográfica preferencial; iii) Apresentar as orientações cristalográficas preferenciais indexadas na forma de representações texturais como as figuras de pólo inversa, as figuras de pólo direta e as funções de distribuição de orientação (ODF); iv) Caracterizar a textura cristalográfica do aço elétrico baseado na fibra de textura definida pela ODFs.

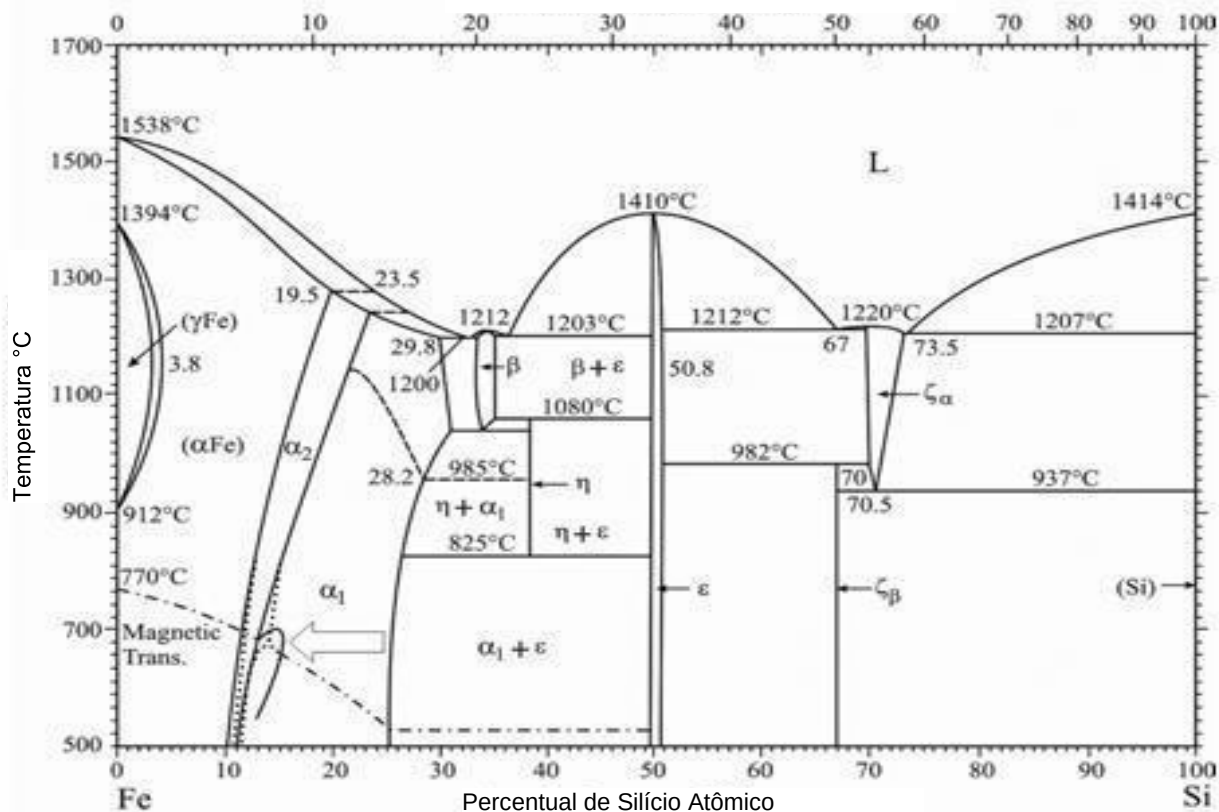
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aços Elétricos

De acordo com Yonamine, et al (2002), a fabricação de aços elétricos semi-processados tem sido capaz de melhorar continuamente as propriedades magnéticas de seus produtos, aproveitando a introdução de novos equipamentos como o processo RH, que permite reduzir o extremamente o nível de carbono e gases dissolvidos. O teor de carbono final desses aços deve ser minimizado para se otimizar as propriedades magnéticas ($>30\text{ppm}$) (YONAMINE, et al 2002).

A composição química do material tem um grande impacto em suas propriedades. Isso inclui como ele conduz a eletricidade, o que é conhecido como a resistividade do aço. Além disso, diferentes elementos na liga afetam a forma como o aço reage ao magnetismo. Por exemplo, adicionar silício no aço pode aumentar sua condução de eletricidade e reduzir as perdas de energia. A quantidade de resistência elétrica varia de um tipo de aço para outro, e os elementos que mais afetam são o silício e o alumínio. Essa adição reduz a amplitude de correntes elétricas parasitas no aço, além disso, o silício melhora a textura superficial do aço e aumenta sua indução magnética. Outros elementos como o fósforo, também impactam o desempenho do aço, mas só pode ser usado em pequenas quantidades sendo a solubilidade máxima é 0,2% (LANDGRAF, 2002).

A quantidade de silício é fundamental para o desempenho do aço elétrico podendo ser grão orientado, ou grão não-orientado tendo papel distinto em importante como a redução de perdas magnéticas, aumento da resistividade elétrica, formação de estruturas cristalinas específicas (controlando o tamanho do grão durante a recristalização). São ligas de ferro e silício que normalmente contém entre 1,0% e 3,5% de silício como indicado na Figura 3.3, junto com traços de impurezas é possível obter fase alfa do ferro (Ferrita), o silício por ser um átomo substitucional se dissolve dentro da matriz ferrítica. Estes materiais apresentam uma quantidade muito baixa de carbono, geralmente inferior a 40 partes por milhão (ppm), equivalente a 0,004%. A adição de silício ao ferro tem como objetivo aumentar a resistividade elétrica e minimizar as perdas devido à corrente de Foucault, que são aquelas induzidas por mudanças de campo magnético (HAWAZY, 2017).



A composição química da amostra é um Aço Elétrico da ArcelorMittal - Brasil, que tem um controle rigoroso sobre os elementos de liga, como: Carbono ultrabaixo, Silício (~ 1), Fósforo, Alumínio, Manganês com traços de Antimônio. Com base no diagrama de equilíbrio Fe-Si apresentado na Figura 3.3, pode-se notar que aços contendo aproximadamente 1% de Silício encontra-se totalmente no campo da fase α (ferrita) em temperatura ambiente, uma vez que essa composição química está situada à esquerda do limite de solubilidade da ferrita e distante das demais fases intermetálicas (η , ϵ , ζ , etc.).

Essas ligas no ambiente industrial são difíceis de serem produzidas e caras devido aos processos que são submetidas, devido a pureza química rigorosa que deve ser respeitada para que tenha um produto de primeira linha. Além disto, depois de produzido na aciaria e lingotado, esse aço ter características peculiares após serem laminados a frio, como são ultrabaixo C e ~1% Si a reatividade de oxidação da superfície é extremamente rápida ao contato com a água, que foi inclusive uma das dificuldades durante a preparação da amostra.

De acordo com Langraf (2002), os aços elétricos são utilizados por terem uma característica única, que é sua capacidade de amplificar milhares de vezes um campo magnético externamente aplicado. Graças a essa propriedade é o que viabiliza a existência da maioria das máquinas elétricas. Essa propriedade especial, a capacidade de amplificação do campo

magnético, é conhecida como permeabilidade magnética, que por sua vez é uma medida da facilidade com que o fluxo magnético atravessa o material.

3.2. Permeabilidade magnética

Sobre os materiais magnéticos, segundo Cullity (2009, p. 10), “de acordo com a definição, os materiais magnéticos são aqueles que possuem a capacidade de serem magnetizados mediante a aplicação de um campo magnético. Esse fenômeno é observado principalmente em materiais ferromagnéticos, como os aços elétricos. Na Figura 3.4 temos a exemplificação de materiais, que quando expostos a um escudo elétrico representada por H [Ampère/metro], respondem gerando uma indução magnética que é representada em B (Tesla). Pode-se notar que os Aços IF possuem uma boa permeabilidade, mas o Aço IF com adição de Silício se sobrepõe a ele apresentando uma indução magnética melhor.

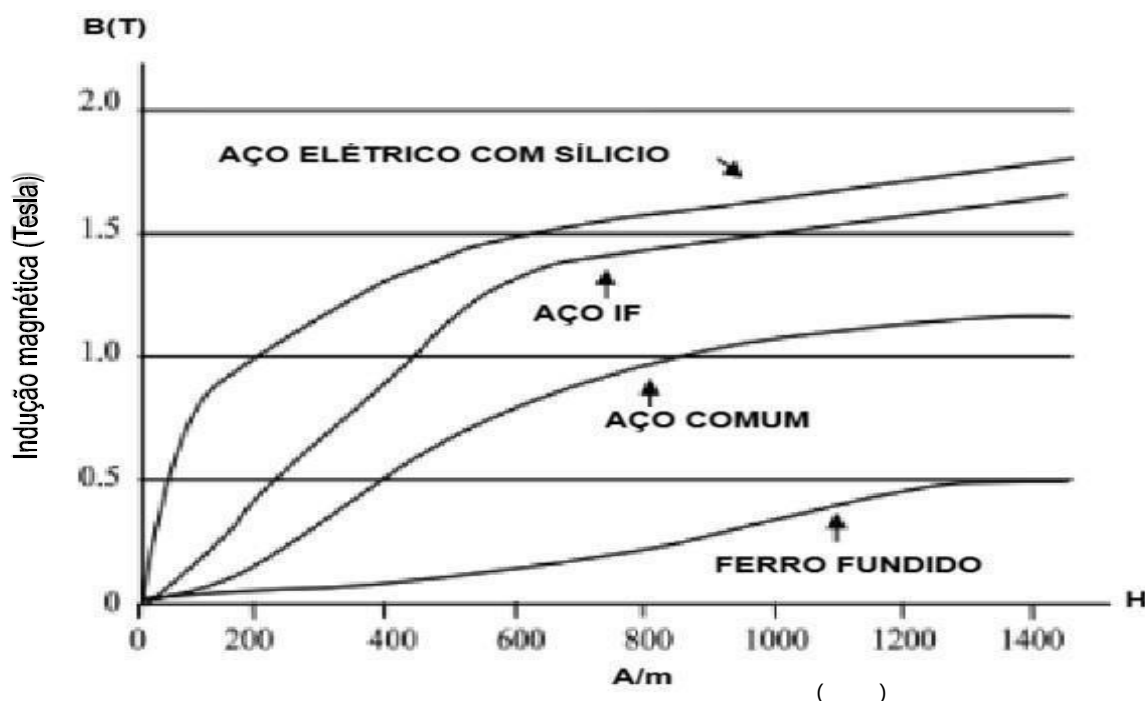


Figura 3.4. Campo magnético de diferentes materiais quando exposto a um escudo elétrico (CULLITY, 2009).

As magnetizações dos cristais de ferro variam conforme as direções nos campos aplicados. No caso do ferro, o conjunto de vetores nas direções cristalinas $\langle 100 \rangle$ é facilmente magnetizada, enquanto o conjunto de vetores nas direções cristalinas $\langle 110 \rangle$ é mediano e $\langle 111 \rangle$ apresenta maior dificuldade de magnetização como mostra a Figura 3.5 (CULLITY, 2009). Com isso, podemos deduzir que um motor feito com aço elétrico com a maioria dos conjuntos de vetores direções preferenciais $\langle 110 \rangle$ e $\langle 111 \rangle$, tendem a ser menos eficientes que um motor que tenha os conjuntos de vetores preferenciais na direção $\langle 100 \rangle$.

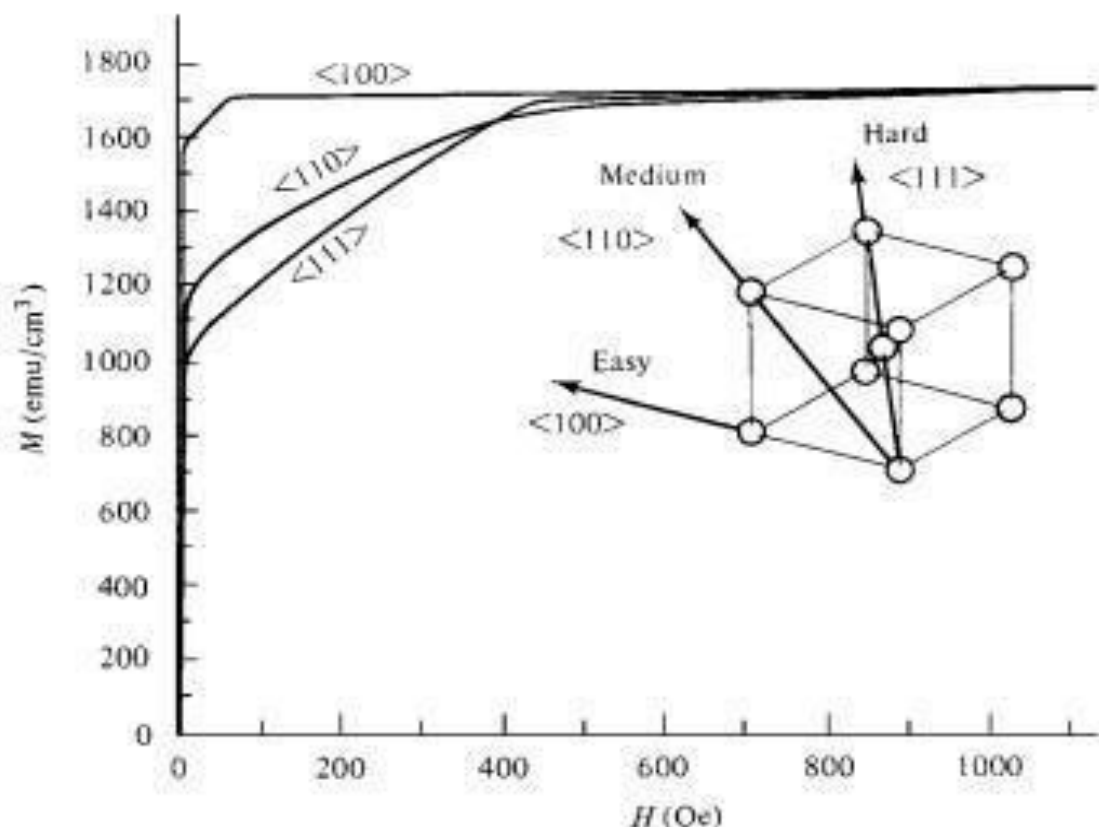


Figura 3.5. Indução Magnética em um cristal de ferro em função do campo aplicado (CULLITY, 2009).

A magneto-permeabilidade é de relevância para aqueles que buscam alcançar elevados campos magnéticos no vão de ar (em geradores) ou para os produtores de máquinas de alta eficiência energética (como transformadores industriais e motores para equipamentos industriais). A magneto-permeabilidade tem correlação com as “perdas de cobre” nas máquinas, isto é, a dissipação de energia devido ao efeito Joule associado à corrente elétrica requerida para magnetizar o material (ou seja, a corrente aplicada no fio de cobre para gerar um campo magnético no núcleo de aço elétrico) (LANDGRAF, 2002).

3.3. A histerese magnética e sua relevância na eficiência dos componentes magnéticos

As perdas magnéticas são divididas em três tipos: perdas histeréticas, perdas por correntes parasitas e perdas de excesso (anômala). As perdas histeréticas dependem de como o material se comporta sob magnetização repetitiva. A perda por correntes parasitas acontece quando a mudança de campo magnético gera correntes elétricas no material, essas correntes são chamadas de correntes de Foucault. (LANDGRAF, 2002).

De acordo com Landgraf (2002), os principais parâmetros para avaliar a qualidade de um aço elétrico é o valor das perdas histeréticas, que normalmente compõem uma fração substancial das perdas totais no motor. Este atributo é praticamente independente da espessura da lâmina e demonstra uma baixa sensibilidade à composição química (com algumas ressalvas).

Embora as perdas totais sejam de interesse para o usuário final, ao considerar a avaliação do processo de fabricação do material, os engenheiros metalúrgicos direcionam sua análise principalmente às perdas histeréticas e as perdas por correntes parasitas. A fim de estabelecer uma base comparativa uniforme, as perdas a 1,5T são frequentemente utilizadas como parâmetro na literatura, devido à variação das perdas histeréticas em relação à máxima indução magnética aplicada.

3.4. Microestrutura e Anisotropia

A anisotropia magnética ocorre em materiais ferromagnéticos devido à interação entre os orbitais eletrônicos, momentos de spin e a rede cristalina. Isso resulta no alinhamento preferencial dos momentos magnéticos em direções cristalográficas específicas (CARDOSO, 2017).

O tamanho dos grãos da estrutura cristalina exerce uma influência substancial nas perdas magnéticas do material. Diversas evidências sustentam a relação inversamente proporcional entre o campo coercitivo, que representa a intensidade do campo magnético necessário para inverter a magnetização, e o tamanho dos grãos. As interfaces dos grãos funcionam como centros de ancoragem, pois a estrutura dos domínios magnéticos de um grão está acoplada à dos grãos adjacentes. Assim, uma parede de domínio em um grão não se movimenta de maneira independente, ela se desloca em conjunto com a parede do grão vizinho (BERTOTTI, 2008).

A relação entre o tamanho dos grãos e as perdas magnéticas é complexa. Grãos maiores resultam em uma diminuição da parcela histerética das perdas, enquanto a parcela "anômala" tende a aumentar, o que leva a um tamanho de grão otimizado para minimizar as perdas gerais. Em processos de fabricação de aço, os parâmetros são ajustados para alcançar um tamanho de grão alvo, geralmente em torno de 150µm, visando otimizar o desempenho magnético do material em suas aplicações finais (BERTOTTI, 2008).

A textura de um aço pode ser atribuída a porcentagem de deformação da chapa em conjunto com ciclos de tratamento térmicos, isso gera uma distribuição de orientações dos grãos de um material policristalino.

3.5. Texturas de recristalização

Ao se deformar plasticamente um material policristalino, pode se notar uma orientação preferencial de seus grãos, devido a direção específica do processo de deformação, costumeiramente designada como direção de deformação. Esse processo ocorre devido à necessidade dos grãos de se acomodarem na presença de elevado estado de tensão, de modo que prevaleça a conectividade dos contornos, segundo Sardinha (2012).

Para Gonçalves (2015), a orientação cristalográfica é dada em relação aos eixos correspondentes à direção de laminação (DL), direção transversal (DT) e direção normal à chapa (DN) no caso da laminação. Assim, Gonçalves (2015, p.35) diz que “para uma chapa laminada, o componente textural é representado pelo plano cristalino $\{hkl\}$ que é paralelo ao plano da chapa e pela direção do vetor $\langle uvw \rangle$, que pertence ao plano $\{hkl\}$, que por sua vez é paralela à direção de laminação (DL) como mostra a Figura 3.6.

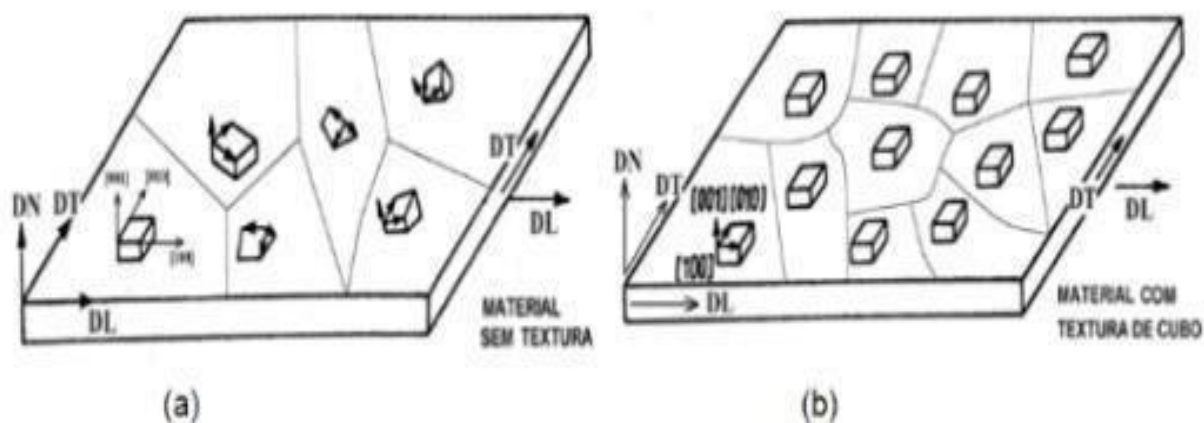


Figura 3.6. Material com cristais (a) material sem textura cristalográfica e (b) com textura cristalográfica (GONÇALVES, 2015).

De acordo com Sardinha (2012) os materiais CCC, como o caso dos aços IF onde se tem a de matriz predominantemente ferrítica, as fibras são predominantemente α e γ , sendo que a textura formada após a recristalização é, em sua maioria a fibra γ . Isso se dá, pois, a fibra γ cresce a partir do consumo da fibra α , que são formadas durante a laminação da bobina. A fibra α tem a direção $[110]$ paralela à direção de laminação e a fibra γ é formada pelas orientações que contém o plano $\{111\}$ paralelo ao plano da chapa (SARDINHA, 2012).

Quando há um defeito no material como inclusões ou discordâncias as paredes de domínios ficam presas e não se movem, até atingir um certo valor crítico necessário para vencer a barreira, gerando uma perda elétrica devido esse gap para vencer a barreira. Após ganhar energia do campo H temos um movimento rápido e irreversível dando origem aos “Eventos de Barkhausen”. A microestrutura é responsável pelas perdas histeréticas e nas anômalas, enquanto a espessura e resistividade influenciam as perdas por correntes parasitas (LANDGRAF, 2002).

3.5.1. Aços elétricos de grão orientado (GO).

Esses aços são amplamente utilizados em motores de laminadores industriais, como na própria laminação a frio, e a laminação a quente como destacado anteriormente pelo *Roller*

Table da WEG (Figura 1.1). Além disto, esses aços são utilizados em transformadores industriais de alta performance.

3.5.2. Propriedades Particulares

De acordo com Chiaverini (2005), esses aços apresentam baixa perda elétrica e elevada permeabilidade magnética durante o funcionamento eletromagnético, garantindo assim uma boa eficiência energética e baixas perdas.

3.5.3. Aplicações

Já os aços GO podem ser utilizados na fabricação de núcleos de transformadores de força e de distribuição de energia, reatores de potência, hidrogeradores e turbogeradores (APERAM, 2022).

Os aços elétricos de grão orientado são projetados para otimizar as propriedades magnéticas em uma direção específica. Isso é controlando o crescimento dos grãos durante o processo de laminação a quente, e um resfriamento unidirecional de tal forma a ter uma estrutura cristalina altamente orientada (CARDOSO, 2017), como por exemplo a Figura 3.6 (b).

Essa orientação cristalina minimiza as perdas magnéticas e melhora a eficiência em transformadores de alta potência, onde a direção preferencial das propriedades magnéticas é crítica (LANDGRAF, 2002).

3.6. Aços elétricos de grão não orientado (GNO)

São aços ferríticos ultrabaixo carbono >50ppm, com adições de silício de tal forma a melhorar as propriedades eletromagnéticas, são utilizados em motores de pequeno para máquinas rotativas, como motores para furadeiras, motores para ventiladores, motores de coifas, transformadores de baixa performance, motores para geladeira, etc.

3.6.1. Propriedades particulares

Com a demanda crescente de miniaturização dos motores, os aços GNO se demonstraram eficientes devido a menor perda de núcleo em altas frequências ou altas resistências, isso pois motores de alta velocidade tendem a ter uma alta eficiência, mas para que isso aconteça depende da espessura fina de uma lâmina de grãos não orientados de aço (HAWAZY, 2017).

O silício aumenta consideravelmente a resistividade elétrica do aço como mostrado na Figura 3.4, além disto os aços GNO apresentam excelente permeabilidade em altas induções, baixo valor médio de perdas magnéticas e pode-se aplicar um revestimento isolante para aumentar a vida útil do motor. (CHIAVERINI, 2005).

No mercado atual, empresas do ramo siderúrgico costumam vender o aço elétrico semiprocessado, com isso, o cliente então realiza os últimos ajustes do produto final, seja

aumentando o tamanho de grão, ou realizando o tratamento de azulamento do aço, criando uma camada passiva sobre a superfície do aço.

3.6.2. Aplicações

Segundo o catálogo da Aperam (2022),

“os aços elétricos GNO são encontrados em núcleos de geradores e motores elétricos, reatores de iluminação, medidores de energia, motores para compressores herméticos de geladeiras, freezers e arescondicionados [...]”. “

Esses aços podem ser empregados em amplificadores magnéticos, transformadores de potência e distribuição, geradores para usinas hidroelétricas, pequenos motores de corrente contínua e motores de corrente alternada de tamanho médio, medidores de energia, transformadores reguladores de tensão, transformadores para aparelhos de rádio e televisão, etc. (CHIAVERINI, 2005).

Segundo Chiaverini (2005), aços elétricos de grão não-orientado e de grão orientado podem ser produzidos por laminação a frio e recozidos, após isso eles apresentam um aumento na permeabilidade magnética em altas induções, com baixo valor médio de perdas magnéticas. Esses aços podem ser utilizados em motores fracionários, ou como o caso do aço do objeto de estudo em núcleos e armaduras de estatores.

3.6.3. Processo de fabricação dos GNO

O processo de fabricação de aços elétricos é um método mais cauteloso, pois necessita de controle cauteloso de carbono, enxofre, fósforo, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio, para que não haja perdas na eficiência do produto final. O silício é acrescido na metalurgia de panela caso necessário, para obter as qualidades magnéticas desejadas do produto final, além de outros elementos de ligas, como Mn e Sb. Após isso, o Aço elétrico é lingotado no formato de placas (HAWEZY, 2017).

Após a purificação do aço na aciaria, começa o processo de transformação termomecânica. Ele se inicia no lingotamento contínuo, onde a placa de aço é formada com rigoroso controle químico e técnico. Essa placa é então aquecida em um forno até a temperatura de encharque, que aumenta sua ductilidade — deixando o material mais maleável e fácil de laminar.

Em seguida, a placa segue para o Laminador de Tiras a Quente (LTQ), responsável por transformá-la em uma bobina a quente (BQ). Na planta da ArcelorMittal em Serra/ES, o processo começa com o reaquecimento da placa a cerca de 1200 °C. Antes da laminação, ocorre a descarepação, onde jatos de água de alta pressão removem as carepas (óxidos) da superfície. A placa então entra no laminador de desbaste reversível (RM), que reduz sua espessura de cerca

de 200 mm para 100 mm em 5 a 7 passes. Entre cada passe, novas carepas são removidas com água em alta pressão. Depois, ela segue para o trem acabador, onde são feitos os ajustes finais de espessura. Por fim, a tira passa por um resfriamento controlado, atingindo a temperatura ideal de bobinamento. Essa etapa final é essencial, pois determina a microestrutura e as propriedades da bobina a quente.

A etapa final ocorre na Laminação a Frio, no caso da amostra ocorreu na planta ArcelorMittal Vega, em SC, onde o material passou pelo processo PLCTM (Pickling Line Cold Tandem Mills). Nesse processo a BQ passa inicialmente pelo processo de decapagem, onde as camadas de óxidos da BQ são removidas quimicamente por ácidos, e mecanicamente por rolos escovadores durante o processo, conhecida como primeira a primeira parte do processo. Após a primeira etapa de limpeza, o aço passa pelo processo de laminação a frio de forma contínua no mesmo equipamento, nele ocorre a redução de espessura, e aumento significativo de comprimento do produto gerado, além disto, a planicidade é um fator crucial durante o processo. Por fim, a Tira a frio é bobinada em uma das bobinadeiras, e é gerado o o produto conhecido industrialmente como BFH (Bobina Full Hard). A BFH tem que passar pelo processo de recozimento em caixa, pois após ser laminada a frio o aço está extremamente encruado, devido à redução de 6mm até 0,5mm (97,5% de deformação).

Esses aços semi-processados são laminados na faixa de 0,5mm, com um alto controle de planicidade, espessura, crescimento de grãos e alongamento. Geralmente as siderúrgicas utilizam após a laminação a frio o recozimento em fornos de recozimento em caixa, conhecidos industrialmente como fornos em caixa, ou BAF (Batch Annealing Furnance) exemplificados na Figura 3.7. Nele o material fica por horas no tratamento de recozimento (até 48horas), com o objetivo de aumentar o tamanho de grão do material, aliviar as tensões residuais, e eliminar óxidos formados na superfície. Nesse processo costuma-se utilizar H₂ e N₂ para deixar a atmosfera inerte durante o recozimento, de forma a expulsar o Oxigênio de dentro do forno e não formar carepa.

.



Figura 3.7. Equipamento do recozimento em caixa – BAF (SARAE, MOHAMAD, 2011).

Além disto, o recozimento contribui para diminuição das perdas histeréticas, de tal forma a eliminar as discordâncias e aumentar o tamanho de grão, em compensação não há mudança nas correntes parasitas pois não há alteração da espessura do material nem mudança da resistividade elétrica que depende da composição química do material.

Diversas pesquisas investigam os impactos do tamanho dos grãos iniciais, da composição química, bem como das condições de temperatura e atmosfera durante o recozimento final em caixa, nas propriedades, tamanho dos grãos e orientação da estrutura secundária. A temperatura de recristalização secundária emerge como o parâmetro de maior influência no crescimento seletivo dos grãos (CARDOSO, 2017).

Após o BAF, o material passa pelo laminador de encruamento, etapa essencial para eliminar o patamar de escoamento do aço. Esse laminador também é decisivo para garantir as propriedades mecânicas e eletromagnéticas do produto. Nessa etapa, aplica-se um leve encruamento e um alongamento controlado na bobina laminada a frio. Além disso, é impressa uma textura superficial por meio de cilindros de trabalho com rugosidade controlada em escala micrométrica. A combinação desses processos, leve encruamento, alongamento e texturização superficial elimina o patamar de escoamento e evita o defeito conhecido como “superfície quebrada”. Dessa forma, o produto final deve atender às especificações técnicas exigidas para o aço elétrico semiprocessado para o cliente.

3.7. Difração de Elétrons Retroespalhados (Electron Back Scattered Diffraction – EBSD)

Hoje em dia existem vários métodos para se determinar a textura cristalográfica de um determinado material, mas para isso é necessário que as orientações cristalográficas sejam definidas. (REZENDE, 2003). Nessa dissertação será utilizado o EBSD combinado com a microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Essa combinação de EBSD e MEV possibilita a determinação de tamanho, orientação de grãos individuais, energia dos contornos, a textura local, correlação ponto-a-ponto e identificação das fases presentes no material e suas distribuições, além de permitir uma análise rápida e com ótimas representações por meio dos mapas de orientação (SCHWARTZ *et al.*, 2000).

3.7.1. Princípio de funcionamento

Segundo Schwartz *et al.* (2000), os padrões de difração conhecidos como Raias, ou Bandas de Kikuchi mostrado na Figura 3.8, são gerados em uma tela de fósforo após a difração dos elétrons de um feixe estacionário de alta energia, que incidem sobre o retículo cristalino da amostra. São usados ângulos característicos para gerar esses padrões, no qual no eixo X do microscópio normalmente usa-se 70° , ou 20° com o feixe de elétrons. O Objetivo dessa técnica é realizar a análise dos padrões de difração pelo número de bandas de Kikuchi observados na amostram determinando todas possíveis orientações, comparando-os com padrões teóricos e verificando qual o melhor se ajusta aos padrões obtidos da amostra. Ao final, se tem um padrão de difração indexado quando a sua posição, fase correspondente e dados sobre a qualidade das bandas de Kikuchi foram armazenados (ÁLVARES, 2011).

Na Figura 3.8, pode-se observar como o feixe estacionário de elétrons incide sob a amostra, interagindo com os planos atômicos e formando os cones de difração. Esses cones resultam na formação de padrões gráficos que são as bandas de Kikuchi, sob uma tela de fósforo posicionada estrategicamente no MEV.

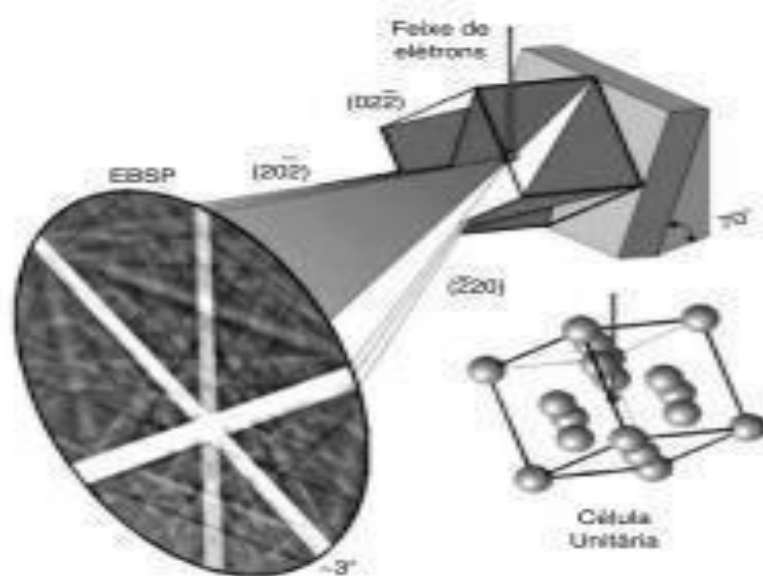


Figura 3.8. Interação do feixe de elétrons com a amostra cristalina e da interseção dos cones de difração na tela de fósforo, formando as raias de Kikuchi (MAITLAND & SITZMAN, 2006).

Essa técnica possibilita determinar todas orientações cristalográficas possíveis na amostra, comparando-as com os padrões teóricos de difração. A análise tem como objetivo encontrar a melhor correspondência entre os dados experimentais e os padrões simulados. Ao final, obtém-se um padrão de difração indexado, cujos dados são armazenados para futuras análises, conforme ressaltado por Álvares (2011).

3.7.2. Obtenção e análise de dados

A aquisição e análise dos dados de difração são realizadas com o auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e softwares especializados em processamento, que permitem avaliar o tamanho de grão, textura (orientação cristalográfica preferencial) e outras representações microestruturais por meio da técnica EBSD (MAITLAND & SITZMAN, 2006).

Conforme os autores, a determinação do tamanho do grão se baseia na mudança na orientação cristalográfica entre pontos vizinhos, que são definidos por um valor mínimo de desordem na orientação, garantindo assim a identificação dos contornos do grão. Assim, as variáveis “fase” e “orientação” são definidas previamente, enquanto a localização e o caráter dos contornos são determinados pelo usuário.

O EBSD fornece mapas que mostram a textura e a composição microestrutural, integrando informações 2D sobre a amostra em uma visualização gráfica intuitiva. Além disso, o software associado oferece dados relacionados à distribuição de fases, estado de deformação, deformação residual, distribuição de orientações e energia dos contornos de grão (MAITLAND & SITZMAN, 2006).

3.8. Projeções estereográficas

Existem três tipos principais de projeções: a estereográfica, a equivalente e a convencional em cristalografia. A estereográfica, tradicional na metalurgia, projeta as normais dos planos ou direções específicas do cristal sobre um plano, facilitando a interpretação das orientações locais e texturas cristalográficas (ABBASCHIAN *et al.*, 2010).

3.9. Figura de polo (direta)

A figura de polo é uma representação bidimensional da distribuição dos pólos de um plano específico nos eixos da amostra (PADILHA e SICILIANO, 2005). Essa representação fornece uma estatística visual da relação cristalográfica, normalmente exibida com auxílio de uma esfera de referência e um plano de projeção, conforme Löw (2006) exemplificado na Figura 3.9.

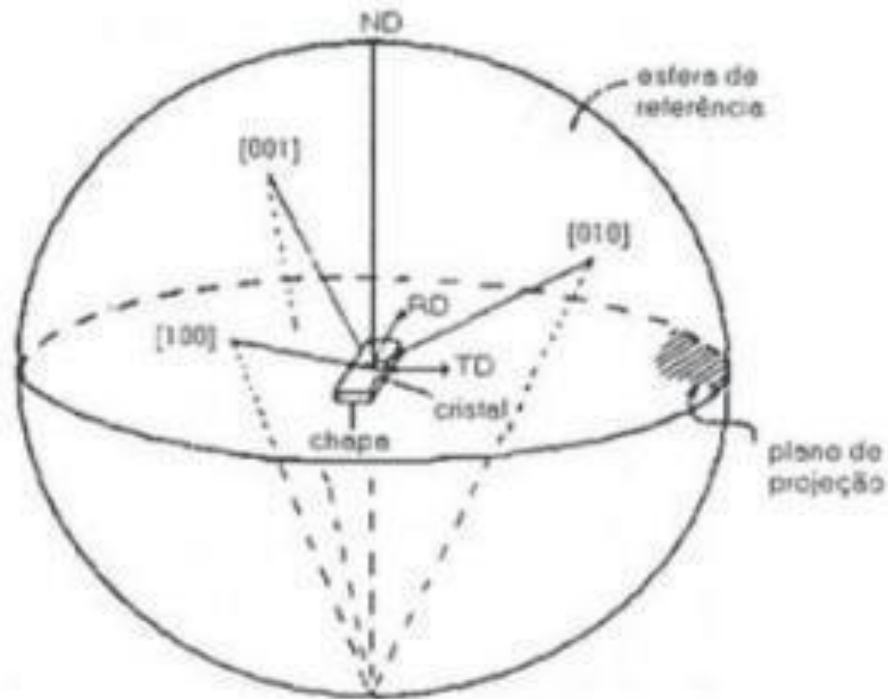


Figura 3.9. Amostra posicionada em relação à esfera de referência (PADILHA e SICILIANO Jr, 2005).

A projeção central em uma esfera arbitrária, em que o plano de projeção resulta no polo. Para um cristal cúbico, por exemplo, a projeção dos polos do plano $\{100\}$ é realizada de modo que o plano de projeção e o plano cristalográfico sejam paralelos, como ilustrado na Figura 3.10 (PADILHA e SICILIANO, 2005).

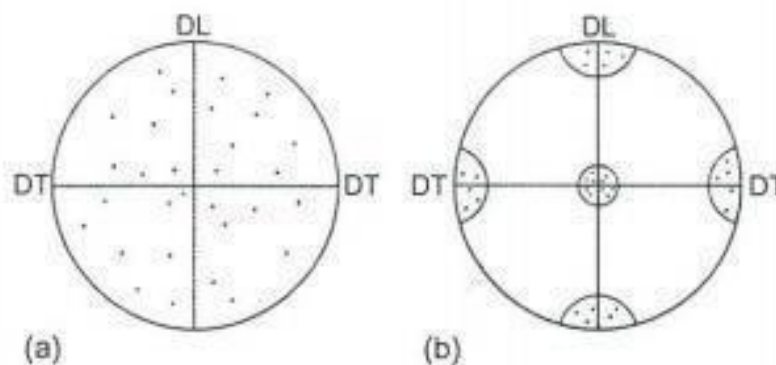


Figura 3.10. Figura de polo (100) para uma chapa com 10 grãos (a) chapa sem orientação preferencial; (b) chapa com orientação preferencial (PADILHA e SICILIANO, 2005).

Quando os grãos apresentam uma orientação aleatória, a projeção será dispersa como mostrado na Figura 3.10 (a); e caso houver textura preferencial, os polos tenderão a se agrupar em regiões específicas da projeção como exemplificado na Figura 3.10 (b).

3.10. Figura de pólo inversa

A figura de pólo inversa visa determinar a textura cristalográfica do material considerando uma direção específica da amostra, por exemplo Direção de Laminação (DL), associando-a aos planos do cristal (LIMA, 2005).

O Triângulo Estereográfico, ilustrado na Figura 3.11, é a base da representação, com vértices que indicam direções específicas conforme a simetria do cristal: Conjunto de planos $\{100\}$, $\{110\}$ e $\{111\}$ para os sistemas cúbicos, por exemplo. É possível expressar todas as orientações em uma única unidade de triângulo graças à simetria do cristal, sendo que ele é repetido dentro de uma figura de pólo direta (ARDILA, 2013).

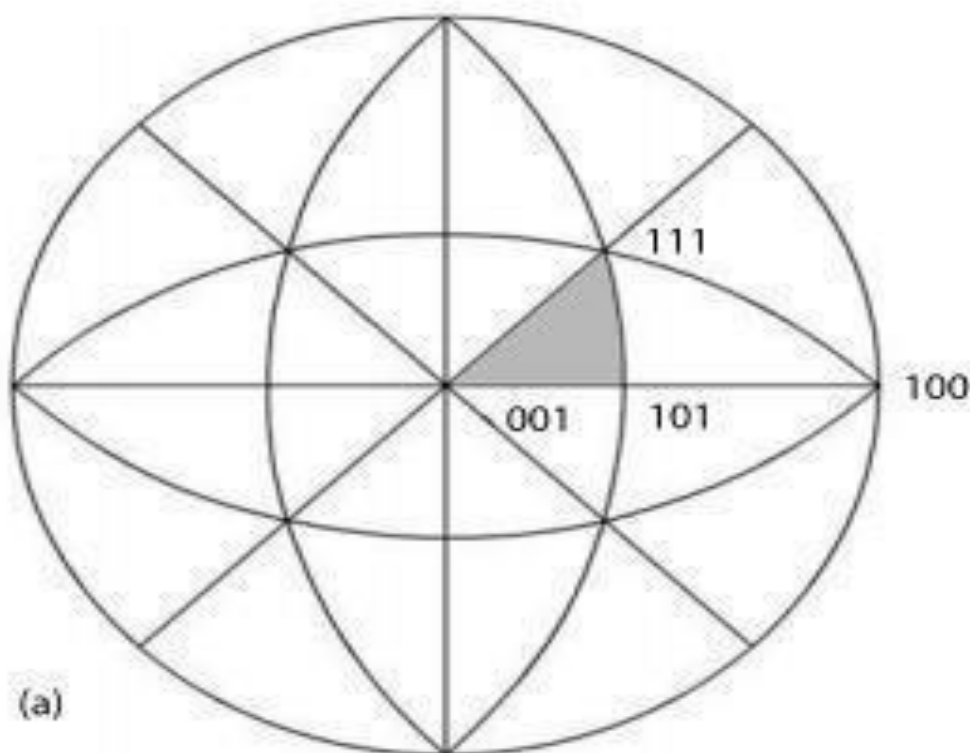


Figura 3.11. Triângulos estereográficos para cristais de simetria cúbica ((ENGLER & RANDLE, 2010).

Na figura de pólo inversa, os pontos do mapa são coloridos de acordo com a orientação cristalina paralela à uma direção específica da amostra, se baseando no triângulo unitário de referência (ROCHA, 2017).

3.11. Função da distribuição de orientações (ODF)

A Função de Distribuição de Orientações (ODF – *Orientation Distribution Function*) proporciona para materiais policristalinos uma descrição mais quantitativa e mais completa da textura cristalográfica quando comparado com as figuras de pólo.

Embora a matemática por trás das ODF seja complexa, seu entendimento básico é fundamental para aplicações metalúrgicas, uma vez que elas podem ser entendidas como ábacos

que mostram a frequência com que determinadas orientações cristalográficas ocorrem em um espaço tridimensional, tudo isso é baseado no sistema de rotações dos ângulos de Euler (ROCHA, 2017), como mostra a Figura 3.12.

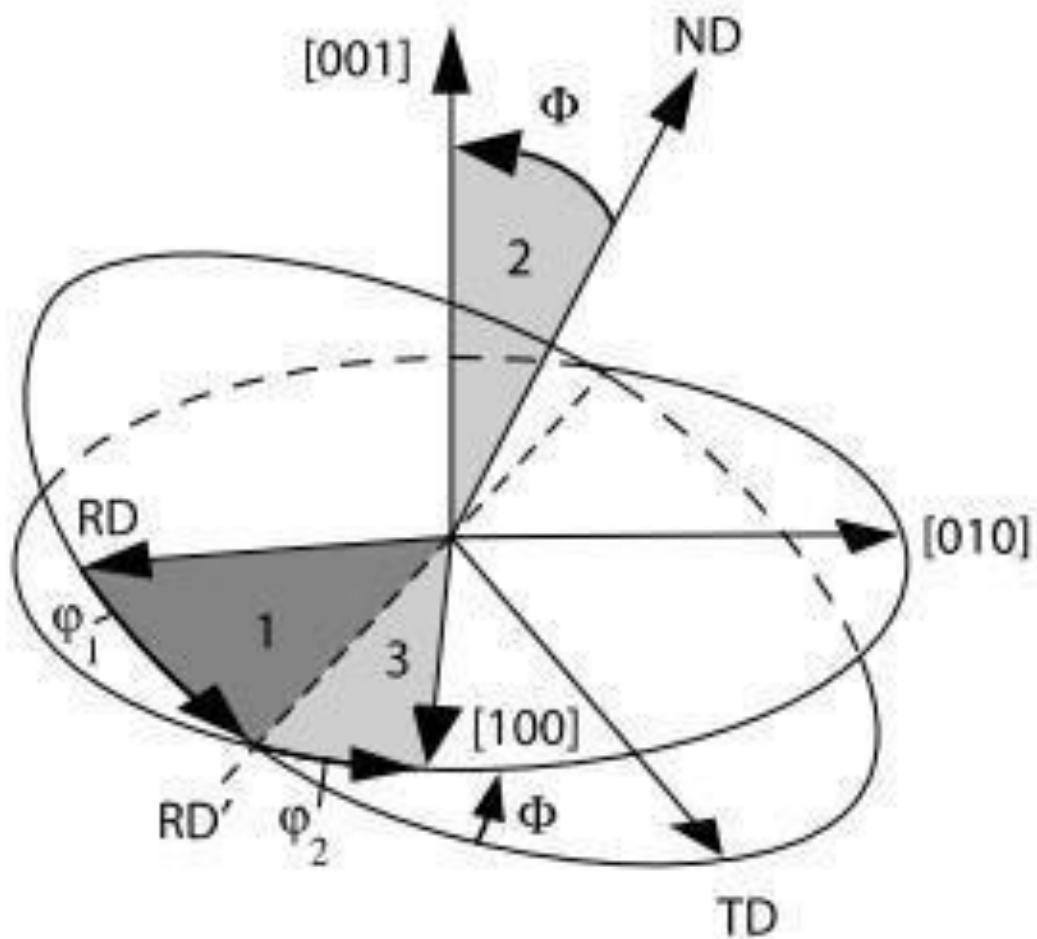


Figura 3.12. Representação esquemática das rotações em torno dos ângulos de Euler ϕ_1 , Φ e ϕ_2 , aplicadas sequencialmente nas ordens 1, 2 e 3, que definem a transformação entre os sistemas de referência da amostra e do cristal (ENGLER & RANDLE; 2010).

Os ângulos de Euler representam um conjunto de três rotações consecutivas, que precisam ser aplicadas aos eixos [100], [010] e [001] de cada célula unitária de um cristal, de tal forma que se torna coincidentes com os eixos DL (direção de laminação), DT (direção transversal à laminação) e DN (direção normal à lâmina) (LÖW, 2006); isto é, os ângulos de Euler acabam se tornando as coordenadas da amostra (DL, DT, DN) no sistema de coordenadas do cristal ([100], [010], [001]), na Figura 3.13 ilustra como essas orientações são representadas tridimensionalmente.

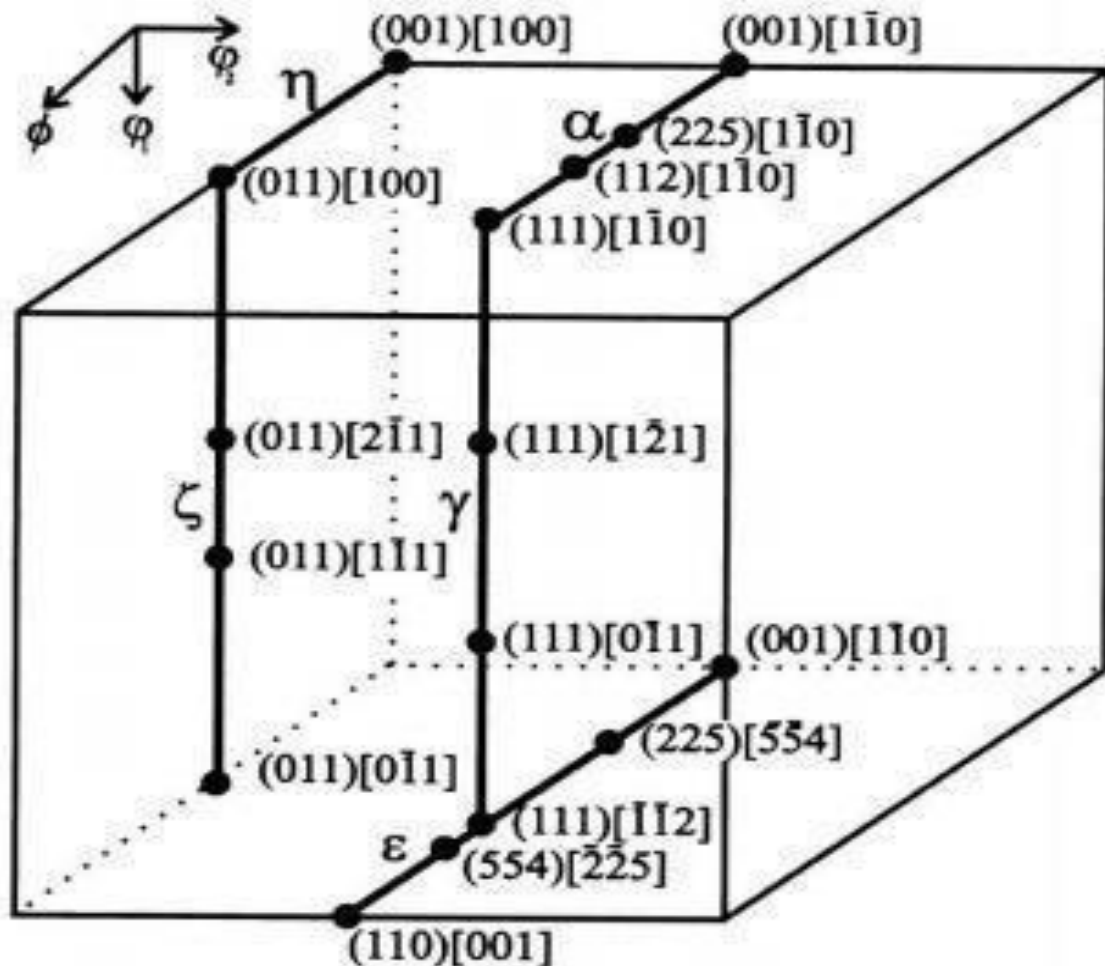


Figura 3.13. Representação tridimensional das orientações, onde cada ponto corresponde a uma combinação dos ângulos ϕ_1 , Φ e ϕ_2 , seguindo a convenção de Bunge para descrever a posição do cristal (ENGLER & RANDLE; 2010).

Segundo Rocha (2017), em uma amostra sem textura, a densidade de orientações é uniforme. Quando surgem orientações cristalográficas preferenciais, determinadas pela estrutura cristalina e pelo processamento termomecânico, essa densidade aumenta para algumas orientações específicas. Assim, a função de distribuição de orientações (ODF) expressa, de forma probabilística, os componentes texturais presentes, descritos pelo plano (hkl) paralelo à direção normal (DN) e pela direção [uvw] paralela à direção de laminação (DL) da amostra, na Figura 3.14 temos planos de deslizamento de uma estrutura Cúbica de Corpo Centrado (CCC).

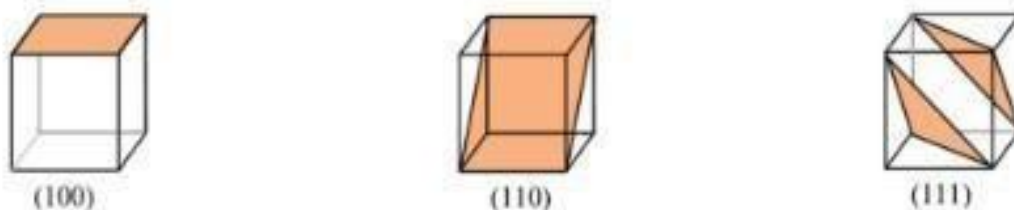


Figura 3.14. (100), (110) e (111) planos CCC da estrutura de um cristal (HAWAZY, 2017).

Os valores da ODF geralmente são representados por seções, ou cortes, com ϕ_2 fixo. Para isso, são traçadas isolinhas de intensidade variada, em função dos outros ângulos de Euler,

em intervalos típicos de 5° , cobrindo de 0° a 90° . Em metais com estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), as seções mais utilizadas são aquelas com φ_2 igual a 0° e 45° , pois nesses cortes as fibras texturais, agrupamentos de orientações alinhadas às direções de laminação (DL) e normal (DN), aparecem de forma mais evidente (OLIVEIRA, 2009).

A Tabela 3.1 apresenta os principais componentes texturais associados a cada fibra, típicos de metais e ligas com estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), assim como suas orientações características. A Figura 3.15 ilustra a distribuição desses componentes nas representações da ODF. Por exemplo, observando a Figura 3.15 (b) é possível identificar que a fibra α definida pela orientação do eixo $\langle 110 \rangle$ paralelo à direção de laminação (DL), ocupa uma faixa específica no espaço de Euler: $\varphi_1 = 0^\circ$ e Φ variando entre 0° e 56° , e a fibra γ é identificada em $\varphi_1 = 0^\circ$ até 90° e $\Phi = 56^\circ$ (JAMAATI, 2015). Essa variação no ângulo Φ reflete a multiplicidade de planos cristalográficos que podem se alinhar com a direção normal (DN), conforme indicado na Tabela 3.1, cada um exigindo uma rotação distinta para esse alinhamento.

Tabela 3.1 - Texturas Importantes das fibras e para materiais CCC (JAMAATI, 2015).

Nome da fibra	Eixo da fibra	Componentes importantes
α	$\langle 110 \rangle // DL$	$\{011\}\langle 110 \rangle$, $\{112\}\langle 110 \rangle$, $\{111\}\langle 110 \rangle$
ε	$\langle 011 \rangle // DT$	$\{001\}\langle 110 \rangle$, $\{112\}\langle 111 \rangle$, $\{111\}\langle 112 \rangle$, $\{011\}\langle 100 \rangle$
γ	$\langle 111 \rangle // DN$	$\{111\}\langle 110 \rangle$, $\{111\}\langle 112 \rangle$
η	$\langle 100 \rangle // DL$	$\{001\}\langle 100 \rangle$, $\{011\}\langle 100 \rangle$
θ	$\langle 001 \rangle // DN$	$\{001\}\langle 100 \rangle$, $\{001\}\langle 110 \rangle$
ζ	$\langle 011 \rangle // DN$	$\{011\}\langle 100 \rangle$, $\{011\}\langle 211 \rangle$, $\{011\}\langle 111 \rangle$, $\{011\}\langle 011 \rangle$

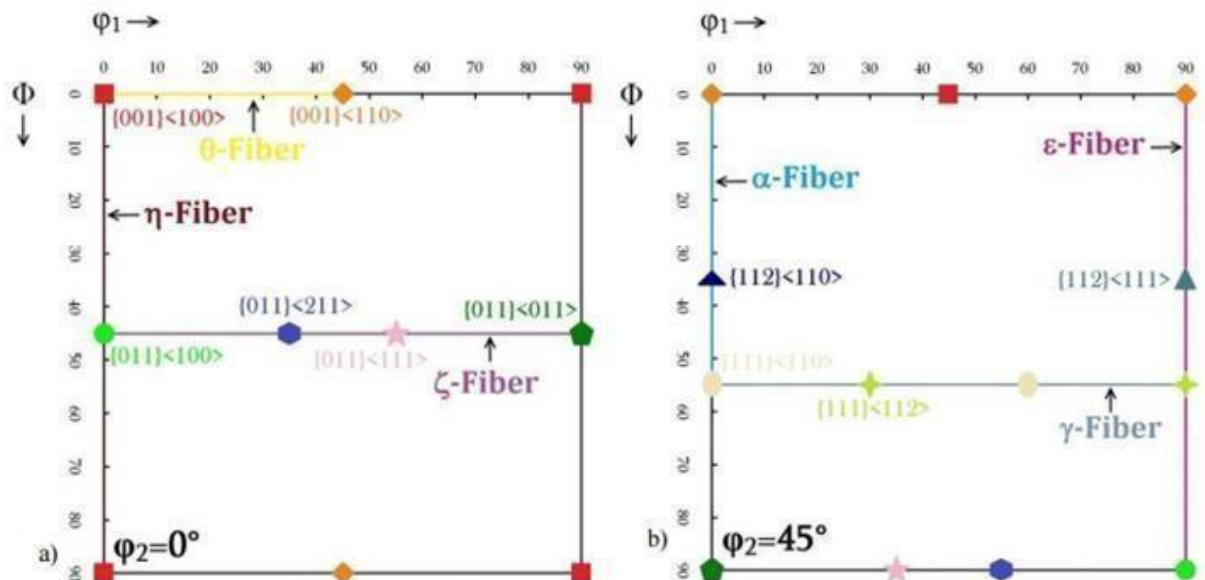


Figura 3.15. Representação das texturas para (a) $\phi_1 = 0^\circ$ e (b) $\phi_2 = 45^\circ$ (JAMAATI, 2015).

3.12. Avanços recentes e pesquisas atuais

Aços ultra baixo carbono combinados com Ferro-Liga de Silício, Ferro Ligas de Manganês e Alumínio melhoraram as propriedades magnéticas dos aços, deixando eles mais susceptíveis a ampliação de domínios eletromagnéticos. Essas combinações aumentam a potência do motor devido ao aumento da capacidade de o motor induzir um escudo magnético. As técnicas de refino do aço são fundamentais para produzir um aço elétrico de Alta Eficiência GNO, dessulfuração, descarbonetação, desfosforação, desgaseificação a vácuo para retirada de gases como Hidrogênio, Nitrogênio e Oxigênio, de tal forma a garantir uma melhor textura cristalográfica da chapa (HAWAZY, 2017).

O manganês nesses aços tem se mostrado uma via de mão dupla, caso o aço não esteja límpido ele pode formar MnS que é um precipitado indesejável, mas quando usado adequadamente o Mn pode ter efeito benéfico nas propriedades magnéticas pois melhora textura cristalina (HAWAZY, 2017).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste trabalho, foi analisada uma amostra de um aço elétrico semiprocessado da empresa ArcelorMittal - Brasil. O material estudado consiste em um aço com aproximadamente 1% de Si, além de traços de Sb e Mn em sua composição. Este aço é produzido pela ArcelorMittal - Tubarão e foi gentilmente cedido pela Empresa, via doação à Universidade Federal de Ouro Preto, para a realização deste estudo. Por razões técnicas relativas à propriedade do material omite-se sua composição química, explicitando que tais informações não comprometem o estudo descritivo aqui realizado.

A amostra foi coletada do processo industrial sendo cortada no Topo de uma Bobina de Aço Elétrico Semi-Processado da linha de Acabamento da Laminação de Tiras a Frio da unidade ArcelorMittal – Vega – SC, após descartes necessários para atenda as normas industriais, como mostra a Figura 4.16, houve o seccionamento na ponta e depois foi realizado três cortes gerando três amostras, foi escolhida a do meio para realização do trabalho. A dimensão da escolhida para confecção da amostra foi de aproximadamente 5mm x 7 mm x 0,5 mm como mostra a Figura 4.16 e Figura 4.17.

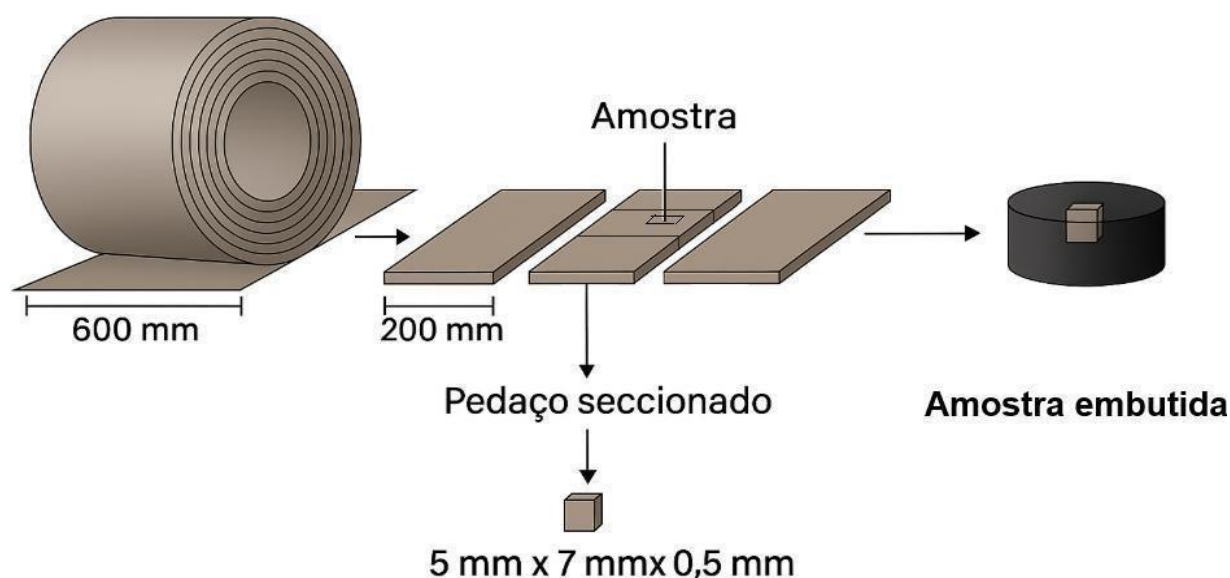


Figura 4.16. Representação esquemática da amostragem do aço estudado. Localização na bobina, porção selecionada após etapas de corte e processo de embutimento (AUTORAL).

Após definir o local de retirada da amostra, ela cortada utilizando uma máquina de corte Arotec Arocor 80 com resfriamento utilizando água no Laboratório de Gemologia do DEGEO. Teve-se o cuidado de realizar o embutimento na face transversal à direção de laminação e este foi feito à frio, com resina rígida G4 e endurecedor, em uma medida de 10g de resina por 4,5g de endurecedor. Tal processo de embutimento se deve à necessidade de avaliar o plano

composto pelas direções DLxDN, sendo a direção de laminação (DL) paralela à direção X do MEV (microscópio de varredura eletrônica) que será representado na Figura 5.21; referência importante para aquisição de dados e posterior representação textural, podendo relacionar assim micro e macro orientações foi realizado um corte na amostra para sinalizar a direção de laminação como mostra a Figura 4.17.

Como se trata de um aço extremamente macio e altamente reativo com o oxigênio devido suas características físico-químicas, houve diversas dificuldades durante o processo de preparação metalográfica dada devido à alta taxa de oxidação da amostra. A preparação metalográfica teve início com a etapa de lixamento manualmente na seguinte sequência: 30 segundos na lixa 320#, 60 segundos na lixa 400#, 180 segundos na lixa 600#, 240 segundos na lixa 1200# e 300 segundos na lixa 3000# para deixar a superfície plana, mas com arranhões.

Para o polimento foi utilizado pasta de diamante de 1,0 micron, com a qual se poliu a amostra até obter brilho espelhado, mas ainda com arranhões de 1,0 micron, essa etapa durou cerca de 6 horas de polimento manual. Após esse processo foi utilizado a solução líquida de diamante de 0,25 micron, no qual durou 13 horas para chegar ao polimento livre de arranhões e tensões como ilustra a Figura 4.17. Para gerar as raias que Kikuchi é necessário que a superfície esteja livre de arranhões e livre de tensões, para que seja indexado as informações cristalográficas do cristal que está sendo analisado. Destaca-se que não foi necessário o uso de sílica coloidal na última etapa do processo.



Figura 4.17. Amostra polida antes de ser analisada no MEV (AUTORAL).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada como técnica experimental deste estudo para avaliar a superfície das amostras, servindo como base para as análises microestruturas e microtexturais, incluindo a técnica de EBSD. Para essas análises, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura Tescan Vega3 LMH, com resolução de 3,0 nm, equipado com detectores de elétrons retroespalhados e secundários, além de detectores acessórios para espectroscopia de dispersão de energia de Raios X (EDS) e para a técnica de Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD).

O detector de elétrons retroespalhados NordlyMax2 - Oxford Instruments, utilizado para aquisição de dados de difração de elétrons, é equipado com uma câmera digital CCD integrada a um chip com 12-bit (velocidade do clock de 20MHz, resolução 1344 x 1024 pixels, binning de 8x8 com alta velocidade de leitura acima de 106 padrões de difração de elétrons por segundo, mínima distorção de imageamento). O equipamento de coleta digital bem como a câmera CCD acoplada são controlados pelo programa Aztec - Oxford Instruments. As condições de contorno importantes para a realização das análises de EBSD e que foram controladas são: ângulo entre feixe e superfície da amostra de 20°, spot size do feixe de 280 nm, voltagem de aceleração do

MEV 20 kV e distância de trabalho de 21 mm entre a peça polar do microscópio e a superfície de interação do feixe amostra.

Para o processamento dos dados foram utilizados programas do pacote Channel 5 (Oxford Instruments): Tango, para plotagem dos mapas microtexturais, os quais são apresentados de acordo com as cores definidas para o triângulo estereográfico padrão para o sistema cristalino cúbico, tomado a direção X da superfície de aquisição (ou direção de laminação, DL) como referência; Mambo para a plotagem das figuras de pólo, as quais apresentam projeções estereográficas das normais aos planos (100), (110) e (111) formadas a partir da projeção no hemisfério superior da esfera de referência; e Salsa para a confecção das seções de ODF's, as quais serão plotadas a partir do método pela expansão da série de Gauss e são apresentadas para ângulos $\varphi_2=45^\circ$ e $\varphi_2=0^\circ$, com os demais ângulos de Euler variando nos intervalos $0^\circ \leq \Phi \leq 90^\circ$ e $0^\circ \leq \varphi_1 \leq 180^\circ$.

O corte, embutimento e a preparação metalográfica do aço GNO foi realizado no laboratório de Gemologia/DEGEO, enquanto as análises de difração de elétrons foram realizadas no MEV do Nanolab/DEMET/REDEMAT Figura 4.18. Todos estes laboratórios são infraestrutura da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto – Campus Morro do Cruzeiro.



Figura 4.18. Foto do Microscópio de Varredura Eletrônica (MEV), NanoLAB, Escola de Minas, UFOP, MG. (AUTORAL).

5. RESULTADOS

Este estudo descritivo da textura do aço elétrico GNO aborda as orientações cristalográficas preferenciais obtidas a partir da técnica de EBSD, e sua apresentação utilizando as três principais ferramentas de observação textural. Estudos de textura utilizando o EBSD são entendidos como estudos microtexturais – para diferenciá-los daqueles realizados por difração de Raios X, pois se baseiam em microscopia eletrônica de varredura e tem resolução micrométrica, isto é cada informação é coletada a nível micrométrico, sendo assim possível determinar a textura de grãos e subgrãos de diversas fases constituinte do material em estudo. Como vantagem frente à técnica de difração de Raios X para análises de texturas, as análises microtexturais são capazes de correlacionar a microestrutura do material – fases, morfologia e tamanho dos grãos de cada constituinte com a orientação cristalográfica preferencial em mesma

ordem de grandeza da microestrutura observada. Logo, se trata de uma análise mais completa, porém traz certa complexidade no entendimento e as ferramentas de representação microtextural tem a função de apresentar de forma didática e prática a correlação entre microestrutura e textura, de uma amostra de Aço elétrico semi-processado. Figura 4.17.

Esta monografia apresenta as três formas de representação microtextural mais utilizadas nos estudos texturais atualmente. Aquelas de maior emprego na literatura e na prática, as quais se aplicam a qualquer tipo de material cristalino. Dentre elas a figura de pólo inversa é a ferramenta de mais rápido entendimento, porém a mais simplificada logo limitada em quantidades de informação. Ela é facilmente obtida a partir de dados microtexturais e apresenta a orientação cristalográfica dos constituintes da microestrutura em relação a apenas uma direção de referência do processamento do material. Para o estudo de materiais metálicos conformados, geralmente se utilizam as direções de laminação, de forjamento, ou de trefilação e se define, por uma escala de cores, quais planos ou direções cristalográficas da fase constituinte da microestrutura se alinham com aquela direção de referência. A figura de pólo direta inclui uma outra direção de referência do processamento, sendo assim mais precisa, logo de visualização mais complexa. Neste caso, para materiais laminados, por exemplo, pode se utilizar como direções de referência a direção de laminação e a direção normal ou a direção transversal, compondo assim um plano, sob o qual serão descritas as orientações cristalográficas das fases constituintes do material. Como resposta direta tem-se a identificação do alinhamento preferencial de determinados planos ou direções dessas fases em relação ao plano de referência gerado.

Por fim, a função de distribuição de orientação (ODF) é forma de representação mais completa dentre as ferramentas para o estudo das texturas do ponto de vista metalúrgico, já que é possível definir o sistema de deslizamento direção/plano (de deslizamento) ativos na obtenção da textura observada. Para esta representação utilizam-se todas as direções do sistema de referência, a direção de laminação, a direção normal e a direção transversal, tomando como exemplo um material processado por laminação. A este sistema tridimensional correlaciona-se um sistema de rotação denominado Ângulos de Euler, o qual é composto por três ângulos, os quais permitem sempre fazer coincidir a orientação da fase constituinte do material em estudo com as direções de referência. Ao espaço tridimensional definidos pelas direções de referência e pelos Ângulos de Euler, se denomina “Espaco de Euler”. Eles definem ângulos pelos quais se devem rotacionar a orientação original de dado constituinte da microestrutura de modo que esta coincida com a orientação do sistema de coordenada, pode-se então ser definida a orientação deste constituinte em relação a cada uma daquelas direções de referência. Como são três, tem-se, então, a melhor determinação possível, logo a mais precisa. Toda complexidade da geração e

interpretação dessa ferramenta é simplificada utilizando-se seções específicas do Espaço de Euler, as quais apresentam, em função do sistema cristalino da fase em estudo, a direção e o plano de deslizamento atuante para obtenção da microtextura observada via EBSD (ROCHA, 2017).

5.1. Microestrutura

O aço GNO em estudo é um aço ferrítico, logo apenas a fase Ferrita foi utilizada para indexação das orientações cristalográficas via EBSD. Na Figura 5.19 pode ser observada a microestrutura deste aço a partir de um mapa de bandas de contraste, gerado por meio de dados de difração de elétrons. Este mapa é uma representação fiel da microestrutura do aço GNO pois retrata características visuais observadas em microscopia óptica, ou eletrônica de varredura, as quais são manifestações da ordenação dos átomos componentes das fases ferrítica; a mesma ordenação que deu origem à difração de elétrons indexada, logo utilizada na construção do mapa.

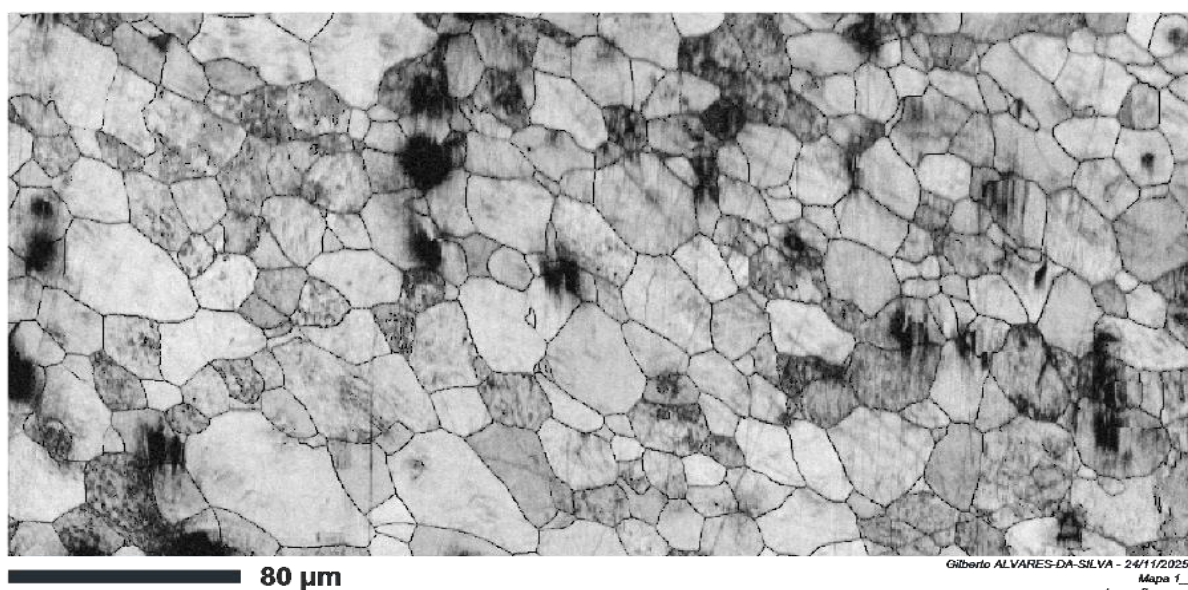


Figura 5.19. Mapa de Banda de Contraste. Representação da microestrutura do aço GNO gerada a partir dos dados de difração indexados (IMAGEM OBTIDA EM LABORATÓRIO).

Observam-se, portanto, contornos de grão, e fases não indexadas, as quais também seriam observadas em técnicas de imageamento direto como a microscopia óptica. Outra característica microestrutural importante observada é o tamanho de grão, o qual é determinado aqui de forma direta e mais precisa que os procedimentos normatizados pela ASTM, ABNT, entre outras normas. A Figura 5.20, mostra utilizando uma escala de cores, o tamanho de cada grão formador da fase constituinte Ferrita do aço GNO estudado. Como pode-se notar os grãos tem tamanhos variados, as cores indicam os seus tamanhos aproximados como mostra a legenda variando de 10 µm até 65,6 µm, satisfazendo as expectativas para parâmetros industriais. Como se trata de um aço elétrico semi-processado, o cliente faz um último tratamento térmico em sua

planta, para chegar nos parâmetros finais de tamanho de grão e atender suas propriedades magnéticas específicas, podendo chegar até a 150 μm para aplicação de motores elétricos conforme Bertotti (2008).

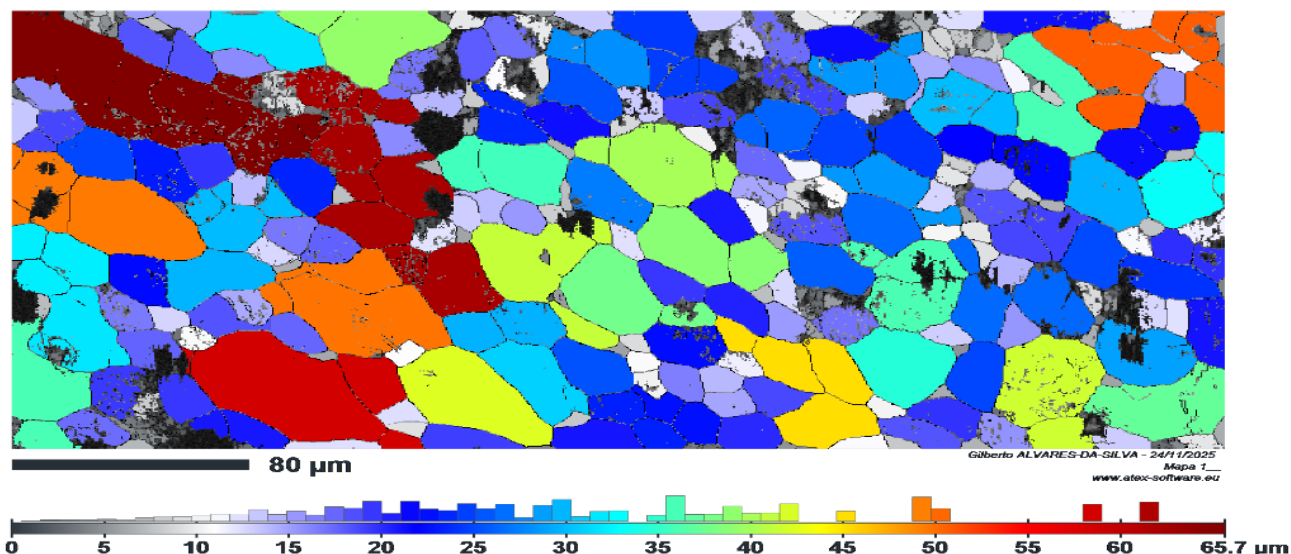


Figura 5.20. Mapa da microestrutura do aço GNO destacando o tamanho de grão ferrítico do material (IMAGEM OBTIDA EM LABORATÓRIO).

5.2. Figura de pólo inversa

Como apresentado anteriormente, a figura de polo inversa é a ferramenta mais simplificada, logo aquela de mais rápido entendimento. Para fins de uso desta ferramenta neste estudo, definiu-se que a direção X do microscópio estaria alinhada com a Direção de Laminação (DL), a direção Y do microscópio alinhada na Direção Transversal (DT) e o eixo Z do microscópio na Direção Normal (DN), como mostra a Figura 5.21. Esta definição permite que seja correlacionado o sistema referencial de processamento do material via laminação, com a geometria de geração, e indexação de dados no microscópio eletrônico de varredura. Na prática, esse procedimento garante que os dados gerados estão relacionados às direções de referência da laminação do aço GNO.



Figura 5.21. Direção Espacial da amostra analisada (AUTORAL).

A Figura 5.22 apresenta a representação textural mais comum obtida a partir do uso da figura de polo inversa. Nesta pode ser observado o mapa da microestrutura do aço GNO contendo, grão a grão, uma gradação de cores relacionadas às cores do triângulo estereográfico padrão, representado no canto direito inferior da imagem.

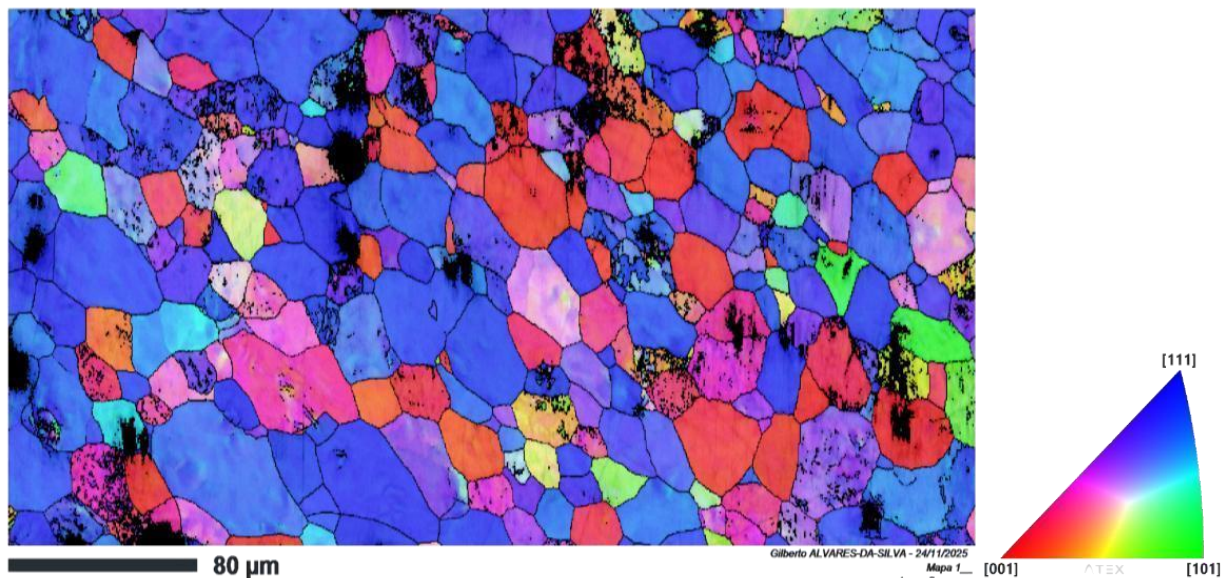


Figura 5.22. a) Mapa de IPF para o aço GNO. b) Triângulo estereográfico padrão para o sistema cristalino cúbico de face centrada (IMAGEM OBTIDA EM LABORATÓRIO).

Como a amostra é de um aço GNO, logo policristalino, pode-se notar mais de uma orientação cristalográfica dos grãos da Ferrita se alinhando à direção Z de aquisição dos dados, logo à direção normal (DN) de laminação, conforme definido anteriormente. Além disto, é observável uma maior densidade de grãos cujo conjunto de orientação da direção cristalográfica do plano [111], indicada pela cor azul, se aproxima à DN, seguida de grãos no conjunto de direções [001], indicada pela cor vermelha, próxima à DN, e grãos no conjunto de direções [101], indicados pela cor verde, próxima à DN.

A imagem acima representa a vista de cima da amostra, que é a direção Z//DN. Em um motor elétrico, o campo eletromagnético flui na direção paralela à DN da chapa de aço, sendo a principal direção de interesse para este estudo.

Uma outra forma de apresentar a figura de polo inversa é a mostrada na Figura 5.23. Nesta omite-se o mapa microestrutural, porém tem-se os a densidade de planos da fase Ferrita que se aplica a cada uma das direções de referência.

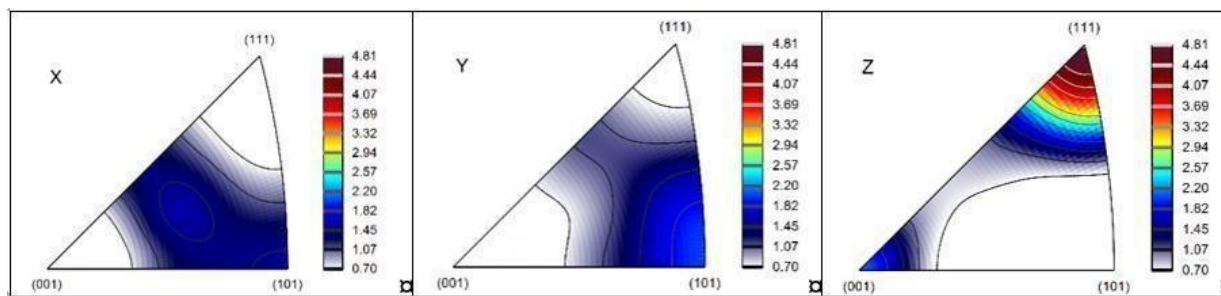


Figura 5.23. Figuras de Polo Inversa para as direções a) X (ou DL), b) Y (ou DT) e c) Z (ou DN) da amostra de aço GNO (IMAGEM OBTIDA EM LABORATÓRIO).

Assim, sendo, tem-se na Figura 3.23 a densidade de planos (111), (001) e (101) que se alinha à direção X//DL, Y//DT e Z//DN da amostra. Algo que coincide com a representação apresentada na Figura 5.22. Mais especificamente, podemos perceber uma maior densidade de grãos com orientação (111)//DN com o limite máximo chegando em 4,81, seguido de grãos direção (001)//DN com aproximadamente 2,57.

Na aplicação de núcleos estatores, a energia elétrica flui através do plano Z da chapa de aço com os fios de cobre criando um campo elétrico, esse campo induz um campo magnético no núcleo fazendo o motor rotacionar continuamente enquanto tiver ligado na energia elétrica.

Já na Figura 5.23 (a) tem-se a a densidade de planos (111), (001) e (101) que se alinha à direção DL da amostra, enquanto na Figura 5.23 (c), a densidade de planos (111), (001) e (101) que se alinha à direção DN da amostra.

Das representações apresentadas na Figura 5.23, percebe-se que para uma visão geral da textura do aço GNO deve-se ser capaz de visualizar os planos (111), (001) e (101) em cada uma das tres representações, paralelos a DN, DL e DT, simultaneamente. Algo que, dificulta e até impede a representação perfeita da textura do aço utilizando essa ferramenta.

5.3. Figura de pólo direta

A figura de pólo direta, aqui referida apenas como figura de polo, inclui uma outra direção de referência do processamento. Neste trabalho, definiu-se que a textura do aço GNO seria observado segundo o plano constituído pelas direções DL e DT (X e Y do microscópio, logo X e Y, nas figuras de polo contidas nas figuras que seguem). Essa observação pelo plano DL x DT institui uma visão do plano normal, ou ainda, ao longo da direção normal da chapa de aço GNO.

Na Figura 5.24 temos as figuras de pólo geradas pelo EBSD. Na figura de polo referente ao plano (111), pode-se notar uma densidade máxima na orientação deste plano, de 6,18 no centro da figura; de 3,69 no lado direito da figura; e 3,19 no lado esquerdo da figura. Embora esses três máximos de densidade de orientação do plano (111) possam ser encontrados na figura

de polo, e mesmo sendo o aço GNO um material policristalino de grão não orientado, é visível o desenvolvimento de uma orientação preferencial desses planos aços na direção (111)//DN.

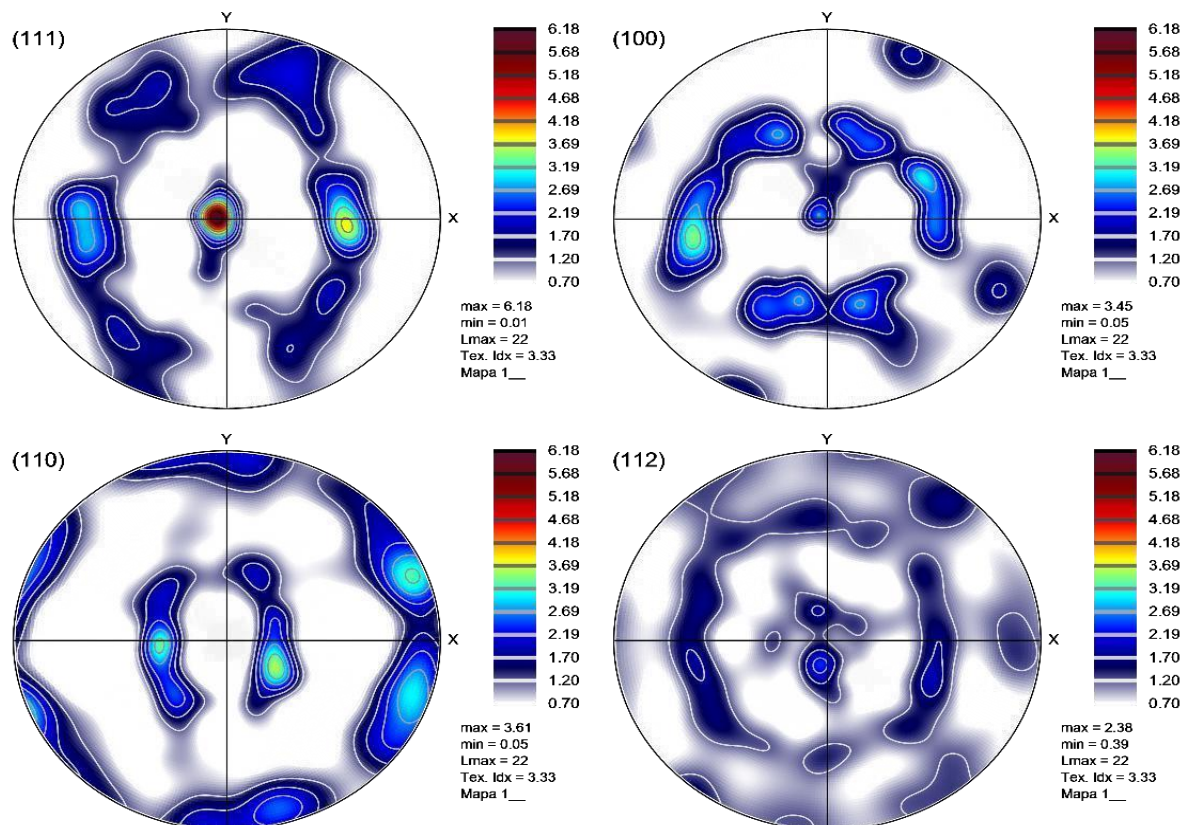


Figura 5.24. Figuras de Polo para os planos a) (111), b) (100), c) (110) e d) (112), planos de interesse para o sistema cúbico de face centrada da fase constituinte Ferrita (IMAGEM OBTIDA EM LABORATÓRIO).

5.4. Função de distribuição de orientação

A função de distribuição de orientação (ODF) é forma de representação mais completa dentre as ferramentas para o estudo das texturas do ponto de vista metalúrgico. A partir dela, é possível determinar os principais componentes texturais associados às orientações preferenciais encontradas em cada material. E por mais que sua constituição e aparato matemático sejam complexos, na prática, a análise das ODFs se resume à sua comparação com seções ou cortes específicos no Espaço de Euler, o qual ainda é definido em função do sistema cristalino da fase que se deseja observar a textura. Comumente, interpretam-se as ODFs como uma descrição estatística tridimensional das orientações cristalográficas preferenciais em um material policristalino. Logo, as ODFs são compostas por picos de intensidade que correspondem às orientações preferenciais ou componentes de textura específicos.

A Figura 3.15 apresenta os dois cortes mais usuais no estudo de texturas em materiais de estrutura CCC, sendo esses cortes a $\varphi_2 = 0^\circ$ e $\varphi_2 = 45^\circ$. Nesses cortes é possível identificar o que se denomina fibras de textura, isto é, os componentes texturais responsáveis pela geração das orientações preferenciais observadas. Por exemplo, para a seção em $\varphi_2 = 45^\circ$ determinam-se os sistemas de deslizamentos cujas direções estão paralelas à direção de laminação (DL) do

material. Assim, se determinada textura é caracterizada como sendo do tipo fibra γ (gama), sabe-se que esse componente textural foi obtido a partir do deslizamento, logo alinhamento, da direção $\langle 111 \rangle$, direção mais densa da estrutura CCC.

Os dados de Função de Distribuição de Orientação (ODF) gerados neste estudo descritivo da textura do aço GNO estão apresentados na Figura 5.25. Comparando esses dados com as seções apresentadas na Figura 3.14 é possível, então, determinar as fibras, logo os componentes texturais, que definem as orientações preferenciais da fase constituinte Ferrita no aço GNO.

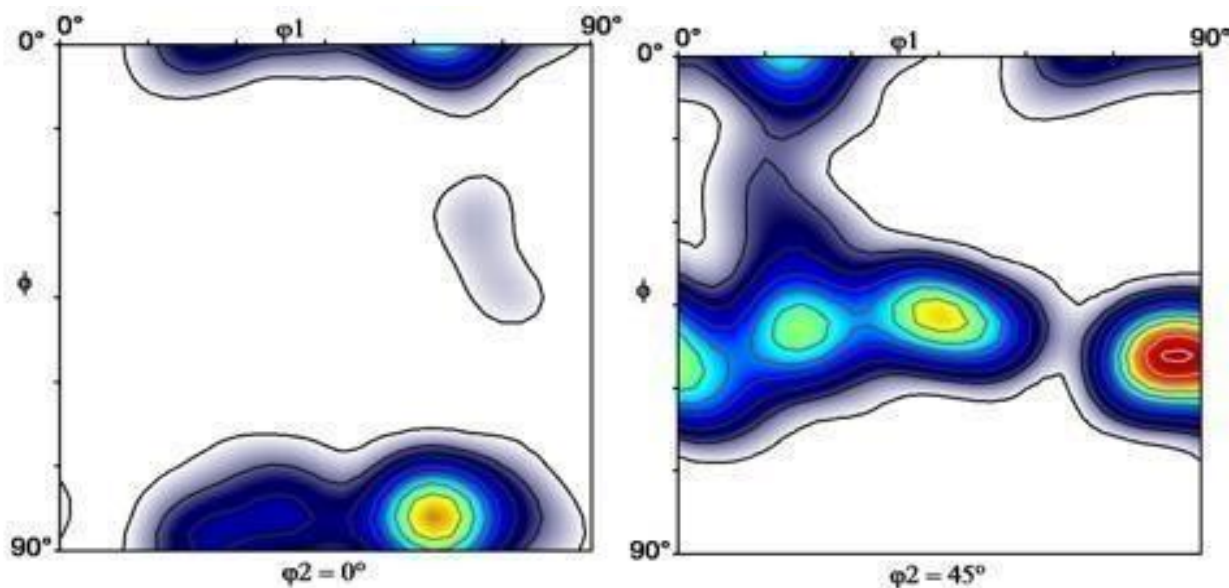


Figura 5.25. ODFs para o aço GNO; a) $\phi_2 = 0^\circ$ e b) $\phi_2 = 45^\circ$ (IMAGEM OBTIDA EM LABORATÓRIO).

Após análise e comparação definiu-se que a seção em $\phi_2 = 0^\circ$ para o aço GNO estudado neste trabalho não apresenta nenhuma componente textura ali. Isto já era esperado pois para fases do sistema CCC, como a Ferrita constituintes deste aço, sua simetria faz com que os principais componentes de textura ideal apareçam na seção definida à $\phi_2 = 45^\circ$, na imagem é possível observar alguns picos gerados em $\Phi = 56^\circ$.

Analisando a Figura 5.25 (b) e comparando-a com a Figura 3.15 (b) foi possível constatar a presença do componente textural Fibra γ no aço GNO. Isto é, após o processamento industrial deste material e a obtenção do mesmo na condição de análise, a Fibra γ representa as orientações cristalográficas preferenciais para a fase constituinte Ferrita. Para além da determinação da Fibra γ , é possível ainda aproximar que os seguintes componentes texturais, E $(111)\langle -1-1\ 2 \rangle$ e F $(111)\langle -1-3\ 2 \rangle$ estão presentes formando a textura do aço como destacado na Figura 5.26. Além disto, ao analisar as densidades de planos na mesma direção, temos E chegando a 8,80 e F com 6,42, quando comparados a outros planos e direções

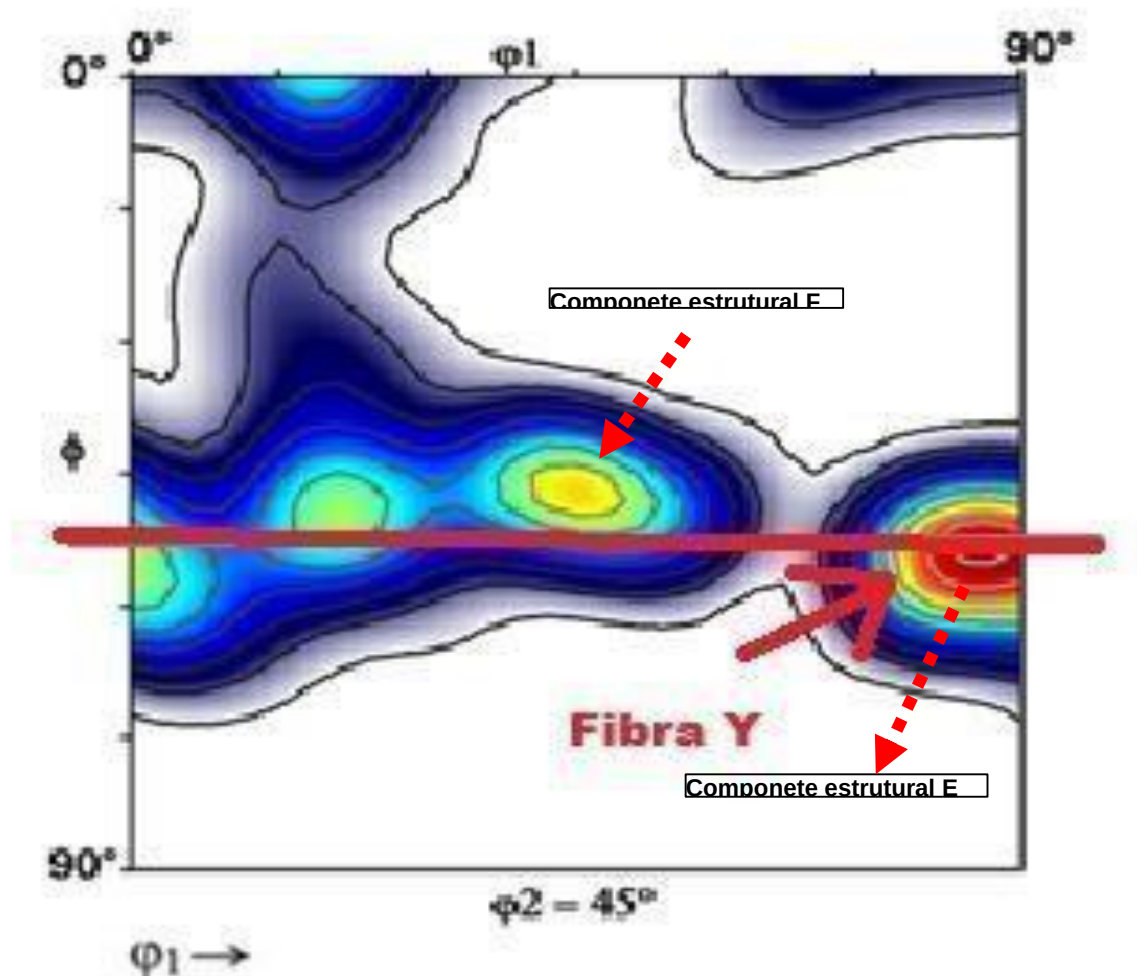


Figura 5.26. ODFs para o aço GNO em $\phi_2 = 45^\circ$ destacando a Fibra γ e seus componentes indexados (AUTORAL).

O componente textural $(111)\langle -1-12 \rangle$ de maior pico de intensidade na ODF do aço GNO em estudo é o principal precursor de grãos com textura do tipo Goss, dentre todos os possíveis da Fibra γ (BARNETT, 1998). Este resultado vai ao encontro da condição de semiprocessamento do aço GNO abordado aqui, uma vez que o mesmo seria submetido a tratamentos térmicos de recristalização subsequentes caso fosse demandada altos graus de texturização visando melhores propriedades magnéticas.

6. CONCLUSÃO

A presente monografia comprovou a aplicação da técnica de Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD) como uma ferramenta fundamental para caracterização fundamental para a caracterização microtextural de um Aço Elétrico de Grão Não-Orientado (GNO) de baixo teor de silício em seu estado semi-processado.

A dedicação na preparação metalográfica se mostrou um fator decisivo para o estudo, onde foi utilizado solução de diamante de $0,25\mu\text{m}$ no último polimento manualmente, otimizando os padrões de Raia de Kikuchi e deixando a superfície livre de tensões, com isso se

deu a obtenção dos mapas cristalográficos assegurando a confiabilidade dos dados para análise detalhada.

A avaliação da microtextura por meio da Figura de Polo Inversa, Figura de Polo e da Função de Distribuição de Orientação (ODF) demonstrou a necessidade de se trabalhar com essas três ferramentas de representação microtextural de modo a entender completamente a textural de um material cristalino. Além disso, pode-se evidenciar a predominância da fibra gama (111)//DN com uma densidade máxima de em E de 8,80 no plano (111) *na direção* $\langle -112 \rangle$, e em F com densidade de 6,42 no plano (111) *na direção* $\langle 1-3-2 \rangle$, frente a outros componentes texturais que se mostraram em alguma das ferramentas de representação, e que poderiam causar confusão na interpretação da textura, caso apenas um tipo de representação fosse abordado.

Os picos de intensidade de orientação nos componentes E e F, no plano (111)//DN, com valores respectivos de 8,80 e 6,42, quantifica o grau de orientação que deixa a magnetização do motor mais difícil como descrito na Figura 3.5. Contudo, se tratando de um aço semiprocessado, o cliente faz outro tratamento térmico depois para chegar nos padrões que ele normalmente utiliza no recozimento secundário podendo aumentar o tamanho de grão em até 150 μm .

O estudo destaca o papel crucial da engenharia de composição, pois as adições estratégicas de Sb e Mn impactam na modulação da nucleação e crescimento de grãos, fornecendo à indústria transformadora, uma chapa com um “DNA” microtextural controlado. O sucesso da siderurgia em fornecer um material com essa textura inicial otimizada é que habilita o subsequente recozimento final (no cliente) que pode aumentar ainda mais a intensidade da fibra gama.

REFERÊNCIAS

ABBASCHIAN, REZA, ABASCHIAN LARA, REED-HILL, R. E. Annealing. In: **Physical Metallurgy Principles**. Cengage Learning, 4ª Edição 2008. 750p.

ALCÂNTARA, F. L., CUNHA, M. A. Estudo da recristalização secundária do aço silício de grão orientado. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**. São Paulo, v. 2, n. 3, p. 3226, 2006.

ÁLVARES, G. **Otimização de Técnicas de Preparo de Amostras para Difração de Elétrons Retroespehados – EBSD**. 89 folhas. Monografia – Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Ouro Preto, 2011.

APERAM. **Aços Elétricos de Grão Orientado de Grão Não-Orientado**. 2012. Disponível em: <https://brasil.aperam.com/wpcontent/uploads/2015/08/A%C3%A7osEl%C3%A9tricosGO-e-GNO-1.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2025.

ARDILA, M. A. N. **Influência do Nióbio na textura e Resistência à Corrosão de Aços Inoxidáveis Ferríticos em Ambientes Aerados e Des aerados**. 37 folhas, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2013).

BAPAPOUR, A.; HOSSEINIPOUR, S.; J.; JAMAATI, R.; ABBASI, MAJID.; **Modeling Coercity in 1.2% Si Electrical Steel with Antimony Additions: A Responeded Surface Methodology Approach To Grain Size and Crystallographic Texture Effects**.

Metallography, Microstructure, and Analysis (2025) 14:120-134.

BECKLEY, P. **Electric steels: for rotating machines**. (Power and energy series no.37). 1.

Steel, Electrical. 1.Title II. Institution of Electrical Engineers 620.1'1297. Published by The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2002.

BERTOTTI, G.; SCHINO, G.; MILONE, A.; FIORILLO, F. On the effect of grain size on magnetic losses of 3% non-oriented SiFe. **Le Journal de Physique Colloques**, v. 46, 1985

CARDOSO, Afonso Vaz de Mello. **Determinação da temperatura de recristalização secundária do aço elétrico de grão orientado produzido com baixa temperatura de reaquecimento de placa**. 2017. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2. ed. Hoboken: Wiley–IEEE Press, 2008.

DA ROCHA, N. C. **Representações Microtexturais e suas Aplicações a um Aço IF Recristalizado**. Monografia - Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Ouro Preto 2017.

DOS SANTOS, J. C. **Estudo e classificação de um aço elétrico de grão não orientado quanto ao seu estado microestrutural através de sistema de visão computacional**. 128 folhas. Dissertação de Mestrado Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia, Ceará, Maracanaú, 2017.

ENGLER, O.; RANDLE, V. **Introduction to Texture Analysis – Macrotexture, Microtexture and Orientation Mapping**. CRC Press ed., 2ª Edição, p35, 2010.

GONÇALVES, C. M. **Cinética da recristalização e Evolução da Textura em Aço Inoxidável Ferrítico AISI 430 Estabilizado com Nióbio, Laminado a Frio e Submetido a**

Recozimentos Isotérmicos. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas Dissertação, Belo Horizonte, 2015.

GONZÁLEZ, F.; HOUBAERT, Y. A review of ordering phenomena in iron-silicon alloys.

Revista de Metalurgia, v. 49, n. 3, p. 178–199, 2013.

HAWEZY, D. **The influence of silicon content on physical properties of nonoriented silicon steel.** *Materials Science and Technology*, v. 33, n. 14, p. 1560–1569, 2017.

JAMAATI, R. Annealing Texture of Nanostructured IF Steel. **Materials Characterization**, v. 106, p 411-419, 2015.

LANDGRAF, F. J. G. Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos. *In*: BOTT, I; RIOS, P.; PARANHOS, R. **Aços: perspectivas para os próximos 10 anos.** RECOPE Metal Mecânica, p. 109- 128, 2002.

LIMA, L. M. G. **Estudo da Evolução da Textura, da Microtextura e da Mesotextura de Recristalização, Após Baixos Graus de Deformação a Frio, em Dois Aços Ferríticos Com Baixo Teor De Carbono.** 2005. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

LOW, Marjorie. Estudo do desenvolvimento da textura durante a recristalização primária de aços ferríticos por difração de raios X e difração de elétrons retroespalhados. 2006. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MAITLAND, T.; SITZMAN, S. Electron Backscatter Diffraction (EBSD) Technique and Materials Characterization Examples. *In*: **Scanning Microscopy for Nanotechnology** – 74

Techniques and Applications, Zhou, W.; Wang, Z. L. (editors). Springer Science Business Media, LLC, 2006, p. 41-75.

OLIVEIRA, A. F. **Caracterização de um aço IF após relaminação no laminador de encruamento**. 153 páginas. Dissertação de Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, 2010.

PADILHA, A. F.; SICILIANO Jr., F. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 1995.

REED-HILL, R. E. **Princípios de Metalurgia Física**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

REZENDE, J. E. **Evolução da Microestrutura e Textura com a Temperatura de Acabamento de um Aço GNO com 1,3% de Si**. 113 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2003

SARAEI, MOHAMAD, M. A. MOGHIMI AND AYOUB BAGHERI. “**Modeling batch annealing process using data mining techniques for cold rolled steel sheets**.” KDD4Service '11 (2011).

SARDINHA, N. A. **Comparação da Textura e Propriedades Mecânicas de um Aço IF para Estampagem Resultante da Laminação Convencional e Assimétrica**. 102 folhas.

Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Curso de Mestrado em Ciências dos Materiais, Rio de Janeiro, 2012

SCHWARTZ, A. J., KUMAR, M., ADAMNS, B. L., FIELD, D. P. **Electron Backscatter Diffraction in Materials Science**. Springer, 2ª Edição. Nova Iorque, 2000. 403p.

YONAMINE, T.; HENRIQUE, L.M.; TAKANOHASHI R.; CHAGAS. F. C.;WOLGIEN, V. ZWIRMAN, N.; SERNA, M.; DE LIMA, N. B.; VILELA, J. M. C.; DE ANDRADE, M. S., LANDGRAF, F. J. G. Anisotropia das Propriedades Magnéticas de Aços SemiProcessados. **7º Seminário sobre materiais elétricos e magnéticos, do 57º congresso ABM Internacional**, S. Paulo, Julho de 2002.