



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação de Mestrado

Graziele Gianini Braga Maria

Análise das respostas magnéticas exibidas pelo aço de grão não orientado (GNO) e grão orientado (GO) após carregamento cíclico por cisalhamento

Belo Horizonte

2015



Graziele Gianini Braga Maria

Análise das respostas magnéticas exibidas pelo aço de grão não orientado (GNO) e grão orientado (GO) após carregamento cíclico por cisalhamento

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Wellington Lopes

Co-Orientadora: Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Belo Horizonte

2015

Maria, Graziele Gianini Braga.
M332a Análise das respostas magnéticas exibidas pelo aço de grão não orientado (GNO) e grão orientado (GO) após carregamento cíclico por cisalhamento / Graziele Gianini Braga Maria. - 2015.
110 f. : il.; tabs. ; grafs ; fotos. –

Orientador: Wellington Lopes.
Co-orientadora: Elaine Carballo Siqueira Corrêa
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2015.

Bibliografia.

1. Aço - Metalurgia. 2. Barkhausen – Efeito de. 3. Cisalhamento.
I. Lopes, Wellington. II. Corrêa, Elaine Carballo Siqueira. III. Título.

CDD: 620.11297



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

“ANÁLISE DA RESPOSTA MAGNÉTICA EXIBIDAS PELO AÇO DE GRÃO NÃO ORIENTADO (GNO) E GRÃO ORIENTADO (GO) APÓS CARREGAMENTO CÍCLICO POR CISALHAMENTO”

Autora: Graziele Gianini Braga Maria

Orientador: Prof. Dr. Wellington Lopes

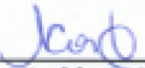
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:


Prof. Dr. Wellington Lopes (ORIENTADOR)

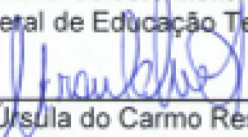
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG


Profª. Drª. Elaine Carballo Siqueira Corrêa (CO-ORIENTADORA)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG


Profª. Drª. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG


Profª. Drª. Úrsula do Carmo Resende

Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG


Prof. Dr. Silvério Ferreira da Silva Júnior

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN

Belo Horizonte, 13 de Fevereiro de 2015.

Dedicatória

*Aos meus pais, Carmo e Heloisa, que me
incentivam a seguir meus sonhos.*

Agradecimentos

Agradeço à Deus pelo dom da vida e principalmente por me indicar o caminho certo a seguir nos momentos de dúvida.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Wellington Lopes pelo apoio e amizade bem como seus ensinamentos durante todo o curso.

Agradeço a minha co-orientadora Prof. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa pelo apoio e força em momentos difíceis. Não posso deixar de mencionar o carinho e amizade e dizer que sempre serei grata pela sua presença em minha vida.

Ao Prof. Dr. Silvério pelo total apoio na realização dos ensaios e análises dos resultados, se mostrando sempre acessível e paciente em todos os momentos. Ao pessoal do laboratório de ensaio não destrutivos do CDTN pela disponibilidade em ajudar.

Ao pessoal coordenação do mestrado e da secretária do departamento por auxiliarem nas questões administrativas sempre que necessário.

Ao técnico do laboratório Geraldinho pela ajuda na confecção dos corpos de prova.

Agradeço aos colegas do mestrado, Suzanny, Andréia e Fernanda e, principalmente, à Aline Magalhães, pelo apoio durante o curso e em especial nos momentos finais. Os colegas do grupo de pesquisa, Marcelo Fonseca, Felipe Berilo e Breno Ribeiro pelo apoio e também pelos momentos de descontração no laboratório.

Aos meus amigos pelo apoio e compreensão nos momentos de ausência.

Ao Sérgio, que na reta final trouxe calma em momentos difíceis e também pelo carinho e apoio.

A minha família e em especial á meus pais que mesmo não entendendo tanto essa minha escolha em seguir a carreira acadêmica me apoiaram incondicionalmente.

“Sei” (Nando Reis)

Resumo

Um melhor aproveitamento energético e um decréscimo no consumo de energia são alvos de estudos que buscam soluções de alto rendimento. Opções como a otimização dos equipamentos elétricos e a utilização de aços de melhor eficiência são levadas em consideração. Esses aços são conhecidos como aços elétricos ou aços ao silício, podem ser de grão orientado ou não orientado. Os aços elétricos são materiais com boas propriedades magnéticas aplicados na geração, transmissão e utilização da energia elétrica. No entanto, deve-se destacar que as propriedades dos materiais, de modo geral, dependem das diferentes condições adotadas para o processamento dos mesmos. Deste modo, considerando a dependência existente entre as condições de solicitação mecânica e as respostas exibidas pelos diferentes tipos de materiais, este trabalho apresenta o estudo da resposta magnética exibida pelos aços de grão orientado e grãos não orientados, após as chapas desses materiais serem submetidas à rotas de processamento envolvendo a aplicação dos esforços de tração e de cisalhamento mediante a realização das rotas tração/cisalhamento e cisalhamento direto/cisalhamento reverso (cisalhamento cíclico). Os resultados indicaram a dependência das propriedades em função da quantidade e modo de deformação plástica. De maneira geral, a combinação dos esforços, para os dois materiais, acarretou em um decaimento das propriedades magnéticas.

Palavras chave: Aços GNO, aços GO, propriedades magnéticas, efeito Barkhausen, cisalhamento cíclico.

ABSTRACT

Improved energy use and a decrease in energy consumption targets are studies that seek high performance solutions. Options such as the optimization of electrical equipment and the use of better efficiency steels are considered. These steels are known as electrical steel or silicon steel, may be oriented or non-oriented. Electrical steels are materials with good magnetic properties applied in the generation, transmission and use of electricity. However, it should be emphasized that the material properties generally depend on the conditions adopted for different data processing. Thus, considering the interdependence of the mechanical stress conditions and responses exhibited by different types of materials, this paper presents the study of the magnetic response exhibited by grain steels oriented and non grain oriented after the plates of these materials be submitted to processing routes involving the application of tensile and shear efforts by conducting the routes traction / shear and direct shear / reverse shear (cyclic shear). The results indicated the dependence of properties versus the quantity and plastic deformation mode. In general, the combination of efforts for the two materials resulted in a decay of the magnetic properties.

Keywords: GNO steels, GO steel, magnetic properties, Barkhausen effect, cyclic shear.

Lista de figuras

Figura 3. 1 - Pólos livres.....	26
Figura 3. 2 - Direções de magnetização.....	27
Figura 3. 3 - Magnetostricção no ferro.....	28
Figura 3. 4 - Domínios magnéticos.....	29
Figura 3. 5 - Classificação dos domínios quanto a rotação dos momentos magnéticos	30
Figura 3. 6 - Estágios de magnetização	31
Figura 3. 7 - Curva de histerese em diferentes frequências de magnetização.....	34
Figura 3. 8 - Descontinuidades da curva de magnetização.....	36
Figura 3. 9 - Ruído Barkhausen característico do aço GO	37
Figura 3. 10 - Amplitude do ruído X Curva de histerese.....	38
Figura 3. 11 - Valor RMS_{RMB} X Campo de excitação	39
Figura 3. 12 - Relação entre tensão e o $RMB_{energia}$	42
Figura 3. 13 - Sonda magnetoelástica.....	44
Figura 4. 1 - Textura Goss	49
Figura 4. 2 - Aplicações dos aços elétricos	51
Figura 4. 3 - Resistividade elétrica	53
Figura 4. 4 - Indução e perdas magnéticas totais na direção de aplicação do campo magnético.....	55
Figura 5. 1 - Metodologia adotada no trabalho.....	56
Figura 5. 2 - Microscópio óptico Fortel	58
Figura 5. 3 - Difrátômetro de raios x com destaque para o porta amostra	59
Figura 5. 4 - Software utilizado para o cálculo do tamanho de grão.....	60
Figura 5. 5 - Microdurômetro utilizado no trabalho	61
Figura 5. 6 - Máquina de ensaios universal Instron.....	62
Figura 5. 7 - Esquema do corpo de prova utilizado no ensaio de tração.....	62
Figura 5. 8 - Máquina de ensaios universal no ensaio de cisalhamento	63
Figura 5. 9 - Esquema do corpo de prova utilizado no ensaio de cisalhamento.....	64
Figura 5. 10 - Rollscan 300	65
Figura 5. 11 - Posicionamento do cp na sonda	66
Figura 6. 1 - Microestrutura do aço GNO como recebido.....	68
Figura 6. 2 - Microestrutura do aço GO como recebido	69

Figura 6. 3 - Difratoograma do aço GNO como recebido	69
Figura 6. 4 - Difratoograma do aço GO como recebido.....	70
Figura 6. 5 - Curva tensão X deformação do aço GNO como recebido	73
Figura 6. 6 - Curva tensão X deformação do aço GO como recebido.....	74
Figura 6. 7 - Curvas tensão X deformação do aço GNO deformado em diferentes magnitudes.....	76
Figura 6. 8 - Curvas tensão X deformação do aço GO deformado em diferentes magnitudes.....	78
Figura 6. 9 - Valor RMS em função da quantidade de deformação – (0,1V / 6Hz)....	80
Figura 6. 10 - Valor RMS em função da quantidade de deformação – (0,9V / 9Hz)..	80
Figura 6. 11 - Rota Tração / Cisalhamento aço GNO.....	81
Figura 6. 12 - Rota Tração / Cisalhamento aço GO	81
Figura 6. 13 - Comparação entre valor de pico e posição de pico para o aço GNO .	83
Figura 6. 14 - Comparação entre valor e posição de pico para o aço GO	84
Figura 6. 15 - Envelope do sinal.....	85
Figura 6. 16 - Valor RMS em diferentes profundidades de captação do ruído para o aço GNO	86
Figura 6. 17 - Valor RMS em diferentes profundidades de captação do ruído para o aço GO.....	87
Figura 6. 18 - Rota Cisalhamento Cíclico aço GNO	88
Figura 6. 19 - Rota Cisalhamento Cíclico aço GO.....	89
Figura 6. 20 - Comparação entre valor e posição de pico para o aço GNO	90
Figura 6. 21 - Comparação entre valor e posição de pico para o aço GO	91
Figura 6. 22 - Valor RMS em diferentes profundidades de captação do ruído para o aço GNO	92
Figura 6. 23 - Valor RMS em diferentes profundidades de captação do ruído para o aço GO.....	92
Continuação Figura 6. 23 - Valor RMS em diferentes profundidades de captação do ruído para o aço GO.....	93
Figura 6. 24 – Comparação entre rotas aço GNO pré - deformado em 1,5%	93
Figura 6. 25 - Comparação entre rotas aço GO pré - deformado em 1,5%.....	94
Figura 6. 26 - Comparação entre rotas aço GNO pré - deformado em 4,5%	95
Figura 6. 27 - Comparação entre rotas aço GO pré - deformado em 4,5%.....	95
Figura 6. 28 - Comparação entre rotas aço GNO pré - deformado em 8,0%	96

Figura 6. 29 - Comparação entre rotas aço GO pré - deformado em 8,0%.....	96
Figura 6. 30 - Comparação entre valor e posição de pico para o aço GNO nas duas rotas	98
Figura 6. 31 - Comparação entre valor e posição de pico para o aço GO nas duas rotas	99
Figura 6. 32 - Valor RMS em diferentes profundidades de captação do RMB variando o modo de deformação para o aço GNO	100
Figura 6. 33 - Valor RMS em diferentes profundidades de captação do RMB variando o modo de deformação para o aço GO	101

Lista de tabelas

Tabela 5. 1 - Composição química aço GNO	57
Tabela 5. 2 - Composição química aço GO	57
Tabela 5. 3 - Tamanho de grão (G) x Diâmetro médio correspondente	60
Tabela 6. 1 - Tamanho de grão do aço GNO como recebido.....	70
Tabela 6. 2 - Microdureza Vickers dos aços elétricos	71
Tabela 6. 3 - Dureza de outros aços elétricos	72
Tabela 6. 4 - Propriedades mecânicas do aço GNO como recebido.....	72
Tabela 6. 5 - Propriedades mecânicas de outros aços elétricos	73
Tabela 6. 6 - Propriedades mecânicas do aço GO como recebido	74
Tabela 6. 7 - Propriedades mecânicas do GNO pré - deformado em diferentes magnitudes.....	75
Tabela 6. 8 - Propriedades mecânicas do GO pré - deformado em diferentes magnitudes.....	77
Tabela 6. 9 - Aumento percentual entre o RMS antes e após a deformação em tração	79

Lista de abreviaturas e siglas

ARB - Amplitude do ruído magnético Barkhausen
ASTM - American Society for Testing and Materials
AU - Alongamento uniforme
MBN - Magnetic barkhausen noise
CCC - Cúbica de corpo centrado
EBSD - Electron backscattered diffraction
FWHM - Largura da curva na metade do valor máximo
GNO - Grão não orientado
GO - Grão orientado
LE - Limite de escoamento
LR - Limite de resistência
MO - Microscopia óptica
PEAK - Valor de pico
PEAKPOS - Posição de pico
RMB - Ruído magnético Bharkhausen
RMS - Root mean square
SAE - Society of Automotive Engineers
TG - Tamanho de grão

Lista de símbolos

$\langle J_s \rangle$ - Valor médio da polarização ($0,85/J_s$)

μ - Permeabilidade magnética

μ_0 - Permeabilidade magnética no vácuo

A - Ampere da indução a um campo magnético de 50 A/cm

A_1 - Área do ciclo

B - Indução magnética

B_{50} - Valor da indução magnética para um campo aplicado de 5000 A/m

$B_{\text{máx}}$ - Densidade de fluxo máxima

d - densidade do material

$d\phi / dt$ - Taxa de variação do fluxo magnético

e - Espessura

E_{an} - Energia anisotrópica magnetocristalina

E_{dis} - Energia de desordem

E_{ex} - Energia de troca

E_m - Energia magnetostática

E_{stric} - Energia magnetoelástica

E_T - Energia livre de magnetização ou energia total

F - Ferrita

f - Frequência de magnetização

G - Número do tamanho de grão ASTM

G^w - Coeficiente adimensional (0,1356)

H - Campo magnético

H_c - Campo coercitivo

H_d - Campo desmagnetizante

H_{eff} - Campo efetivo

H_{hist} - Campo coercitivo

HV - Hardness Vickers

Hz - Hertz

H_α - Campo relativo a tensão aplicada

l - Comprimento inicial

i - Intensidade da corrente

J_{ex} - Integral de troca

k_b - Constante de Boltzmann
 L - Comprimento das espiras
 M - Magnetização
 M_1 - Momento magnético
 n_1 - Número de pontos do sinal
 n - expoente de encruamento
 N - Número de espiras
 N_{AE} - Número de grãos inteiros equivalente
 N_e - Número de espiras
 P_a - Perda anômala
 P_h - Perda histerética
 P_p - Perda parasita
 P_{total} - Perda total
 $RMB_{energia}$ - Energia magnética Barkhausen
 RMB_{RMS} - Valor RMS do ruído
 RMB_{RMS} - Valor RMS do ruído Barkhausen
 S - Seção reta
 S_i e S_j - Momentos angulares dos spins
 T - Temperatura
 T - Tesla
 ν - coeficiente de Poisson
 V - Tensão
 V_1 - Volume do material
 V_i - Tensão instantânea
 V_i - Valor de tensão instantânea
 V_m - Valor médio do ruído
 V_m - Valor médio do ruído
 X_m - Suscetibilidade magnética do material
 α - Parâmetro adimensional que representa o acoplamento entre os domínios
 Δl - Comprimento final
 λ - Magnetostricção
 ρ – Resistividade
 σ - condutividade elétrica
 σ - Tensão

ϕ - ângulo entre spins

Ω - ohm

Θ - ângulo entre a direção de aplicação da tensão e a direção do campo magnético

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	20
2. OBJETIVO	22
2.1. Objetivos gerais	22
2.2. Objetivos específicos	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1. Propriedades magnéticas.....	23
3.1.1. Momento magnético	24
3.1.2. Energia livre de magnetização.....	25
3.1.3. Domínios magnéticos	28
3.1.4. Curva de magnetização	30
3.1.5. Perdas Magnéticas	32
3.1.6. Efeito Barkhausen	35
3.1.6.1. Efeito da microestrutura no ruído Barkhausen	38
3.1.6.2. Efeito das tensões no RMB.....	40
3.2. Ensaio magnetoelástico	43
3.2.1. Equipamentos.....	43
3.2.2. Análise do sinal.....	45
4. Aços Elétricos	47
4.1. Características gerais dos aços elétricos	47
4.2. Aços GNO	48
4.3. Aços GO.....	49
4.4. Histórico	50
4.5. Aplicação dos aços elétricos	51
4.6. Parâmetros que afetam as propriedades magnéticas dos aços elétricos	52
4.6.1. Composição química	52
4.6.2. Tamanho do grão	53

4.6.3.	Textura	54
4.6.4.	Efeito das Tensões	54
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	56
5.1.	Descrição geral do trabalho realizado	56
5.2.	Materiais.....	57
5.3.	Caracterização microestrutural	57
5.4.	Tamanho de grão	59
5.5.	Ensaio de dureza	61
5.6.	Ensaio de tração	61
5.7.	Ensaio de Cisalhamento	63
5.8.	Rotas de processamento	64
5.8.1.	Tração/Cisalhamento.....	64
5.8.2.	Cisalhamento cíclico.....	65
5.9.	Ensaio Barkhausen	65
6.	RESULTADO E DISCUSSÃO	68
6.1.	Caracterização microestrutural	68
6.2.	Tamanho de grão	70
6.3.	Dureza.....	71
6.4.	Ensaio de tração	72
6.4.1.	Tração até a ruptura	72
6.8.2.	Tração variando a quantidade de deformação	74
6.5.	Ensaio Barkhausen	79
6.5.1.	Análise preliminar	79
6.5.2.	Efeito da quantidade de deformação na resposta magnética.....	79
6.5.2.1	Rota Tração / Cisalhamento.....	79
6.5.2.2	Rota Cisalhamento Cíclico	87

6.5.3. Efeito do modo de deformação plástica na resposta magnética dos aços GO e GNO	93
7. Conclusão.....	102
Referências bibliográficas	103

1. INTRODUÇÃO

A demanda pela eficiência energética tem crescido nos últimos anos, e com ela a busca por equipamentos mais eficientes. Nos equipamentos elétricos, de maneira geral, existem três tipos de perdas: a mecânica por atrito; no cobre e as perdas no ferro que são relacionadas ao núcleo feito de aço. Uma alternativa para a redução dessas perdas energéticas sem grandes modificações de projeto seria a seleção de um aço com melhores propriedades magnéticas.

A utilização dos aços elétricos na maioria dos equipamentos elétricos tem sido alternativa para a um melhor aproveitamento energético. Destaca-se ainda que o desenvolvimento desses aços confunde-se com a própria história da indústria elétrica. Os aços elétricos, também conhecidos como aços siliciosos são materiais com boas propriedades magnéticas aplicados na geração, transmissão e utilização da energia elétrica. Esses aços são divididos em duas famílias: a de grão orientado, GO, e a de grão não orientado, GNO, que tem como sua maior diferença, de maneira geral, a orientação preferencial dos grãos (LOSS, 2010).

A alta demanda desse material ocorre em razão de o mesmo apresentar alta capacidade de amplificar o fluxo magnético, boa resistividade elétrica e uma composição química favorável a redução de perdas magnéticas.

Neste aspecto, os aços GO apresentam textura pronunciada sendo mais utilizados em aplicações nas quais suas propriedades magnéticas devem ser semelhantes em uma determinada direção. Já nos aços GNO ocorre o inverso, por não apresentarem textura pronunciada, são utilizados em situações em que suas propriedades devem ser semelhantes em todas as direções.

As propriedades magnéticas dos aços siliciosos dependem de suas características microestruturais (tamanho de grão, presença e distribuição de precipitados e inclusões) do estado de tensões e de sua composição química. Sua grande sensibilidade ao estado de tensões limita a sua capacidade de ser deformado de forma mais severa. Tensões de pequena magnitude podem provocar distorções em sua rede cristalina, alterando suas propriedades magnéticas. Dessa forma, o

conhecimento do comportamento magnético desse material em presença de diversos tipos e graus de deformação se torna essencial no processamento desses materiais, apesar de os mesmos não serem submetidos a processos intensos de conformação mecânica, sendo o mais comum operações de corte (cisalhamento).

Após o processamento final, os aços elétricos são tratados termicamente a fim de adequar suas propriedades magnéticas. A resposta magnética exibida pelos aços elétricos depende do processamento, ou seja, das condições de laminação e de tratamento térmico que foram impostas aos mesmos a partir do fluxo siderúrgico.

Deste modo, considerando a dependência existente entre as condições de solicitação mecânica e as respostas exibidas pelos diferentes tipos de materiais, este trabalho propõe o estudo da resposta magnética exibida pelos aços GO e GNO após as chapas desse material serem submetidas à rotas de processamento envolvendo a aplicação dos esforços de tração e de cisalhamento, mediante a realização das rotas de deformação plástica envolvendo a aplicação de tração/cisalhamento e cisalhamento direto/cisalhamento reverso (cisalhamento cíclico).

2. OBJETIVO

2.1. Objetivos gerais

O objetivo geral deste trabalho é o estudo dos efeitos decorrentes das condições de solicitação mecânica na resposta magnética dos aços GNO e GO.

2.2. Objetivos específicos

- Analisar as propriedades magnéticas, por meio do ruído magnético Barkhausen, dos aços GNO e GO, após as chapas desse material serem submetidas a ciclos de carregamento mecânico compostos pela combinação dos esforços de tração e cisalhamento: rota tração/cisalhamento e de cisalhamento direto-cisalhamento reverso (carregamento cíclico);
- Identificar o efeito do estado prévio do material: pré-deformado em laminação a frio (condição do estado como recebido) e laminado/tracionado na resposta magnética do aço de grão não orientado e orientado;
- Investigar o efeito da quantidade de pré-deformação em tração e em cisalhamento durante a condução das rotas de processamento tração/cisalhamento e cisalhamento direto/cisalhamento reverso (cisalhamento cíclico), respectivamente, nas propriedades magnéticas dos aços elétricos que foram selecionados;
- Investigar a influência do modo de deformação (tração/cisalhamento e cisalhamento cíclico) na resposta magnética dos aços GNO e GO.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo introduzir conceitos sobre o magnetismo e suas propriedades, bem como os parâmetros que afetam essas propriedades. Outro objetivo deste capítulo é a apresentação de uma visão geral do ensaio magnetoelástico e de como ele pode ser utilizado para avaliar o comportamento de um material quando este é submetido à magnetização.

3.1. Propriedades magnéticas

O magnetismo pode ser definido como sendo uma propriedade, por meio da qual os materiais podem exercer forças de atração ou repulsão. A origem dessa força magnética está relacionada com o movimento de partículas carregadas eletricamente.

Em geral, as forças magnéticas são abordadas como campos formados por linhas, que indicam a direção de aplicação do campo (CALLISTER, 2002). O campo magnético externo, intitulado por H , tem sua intensidade determinada pela Equação 3.1. A unidade de H de acordo com o SI é ampere por metro (A/m).

$$H = \frac{N_e I}{L} \quad (3.1)$$

no qual,

N_e é o número de espiras

L o comprimento

I a intensidade da corrente.

Ao se aplicar um campo magnético (H) em um material, suscetível à magnetização, o mesmo gera um fluxo magnético no material. A densidade desse fluxo é conhecida como indução magnética (B). Já a permeabilidade magnética (μ) mede a facilidade dessas linhas de fluxo penetrarem no aço (BOTELHO, 2012). A permeabilidade também pode ser compreendida como a capacidade de amplificação do fluxo

magnético. Desta forma, quando um aço apresenta permeabilidade de 2000, isso significa que o mesmo possui a habilidade de amplificar o campo magnético aplicado em 2000 vezes (LANDGRAF, 2002). A permeabilidade pode ser calculada por meio da Equação 3.2:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (3.2)$$

Onde,

μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo

B é a indução magnética

H é o campo magnético

A magnetização (M), proporcional a H, pode ser definida como o incremento dado ao campo magnético externo em razão dos momentos magnéticos se alinharem na direção do campo (SILVA JR, 2005; CALLISTER, 2002). A magnetização pode ser calculada por meio da Equação 3.3,

$$M = H X_m \quad (3.3)$$

Onde,

X_m é a suscetibilidade magnética do material

H é o campo magnético

3.1.1. Momento magnético

O momento magnético pode ser entendido como a razão do magnetismo em materiais ferromagnéticos. O momento magnético é a resultante do momento dos elétrons, e está relacionado ao movimento angular, rotação em relação ao seu eixo, e ao movimento em torno no átomo, translação. Essa movimentação do elétron possibilita o surgimento de um campo magnético perpendicular a sua trajetória (GRIJALBA, 2010). Quando um campo externo é aplicado, o campo magnético gerado pelos momentos tende a se alinhar na mesma direção (GRIJALBA, 2010; LANDGRAF, 2002; BOHN, 2009).

Os materiais ferromagnéticos, em decorrência da minimização da energia livre magnética, possuem organização de longo alcance, concebendo regiões de magnetização, denominados domínios magnéticos, os quais também estão presentes no estado desmagnetizado (BOHN, 2009; LANDGRAF, 2002; CULLITY, GRAHAM, 2009).

3.1.2. Energia livre de magnetização

A energia livre de magnetização ou energia total é o somatório das parcelas associadas aos tipos de interações que ocorrem em um material ferromagnético. Essa energia determina a forma como os domínios irão se comportar durante o processo de magnetização (GRIJALBA, 2010).

A energia total de magnetização é descrita segundo a Equação 3.4,

$$E_T = E_{ex} + E_m + E_{an} + E_{stric} + E_{dis} \quad (3.4)$$

No qual:

E_{ex} é a energia de troca

E_m é energia magnetostática

E_{an} é a energia anisotrópica magnetocristalina

E_{stric} é a energia magnetoelástica

E_{dis} é a energia de desordem

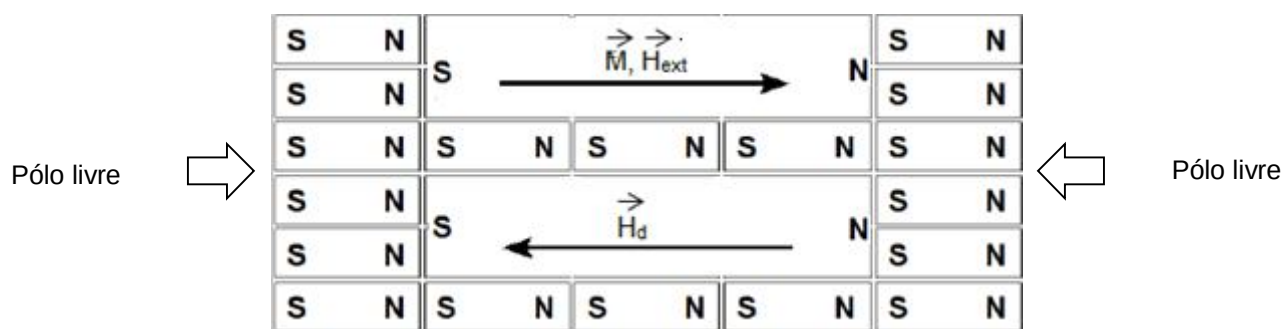
E_{ex} é a energia de troca que determina se o material é passível de ser ordenado magneticamente, ou seja determina o ferromagnetismo. Considerando dois átomos i e j com spins cujos momentos angulares são S_i e S_j , respectivamente, onde J_{ex} é a integral de troca e ϕ o ângulo entre os spins, a energia de troca pode ser calculada conforme a Equação 3.5 (CULLITY, GRAHAM, 2009).

$$E_x = -2J_{ex}S_iS_j = -2JS_iS_j \cos \phi \quad (3.5)$$

Caso o valor da integral de troca seja positivo a energia de troca atinge seu valor mínimo quando os spins são paralelos ($\cos \phi = 0$) e máxima quando os spins são antiparalelos ($\cos \phi = -1$). Um valor positivo da integral de troca é uma condição necessária para que o material seja ferromagnético. Quando J_{ex} é negativa os spins são antiparalelos (CULLITY, GRAHAM, 2009).

E_m (energia magnetostática) ocorre em razão do componente normal do campo magnético ser descontínuo nos extremos da amostra. Essa descontinuidade gera um campo desmagnetizante (H_d) de sentido contrário ao campo externo. Pólos livres localizados na borda do material geram essa densidade de cargas, como pode ser verificado na Figura 3.1, responsável pelo aparecimento de H_d . Pode-se atribuir o surgimento dos domínios magnéticos a essa parcela da energia total (BOHN, 2009).

Figura 3. 1 - Pólos livres



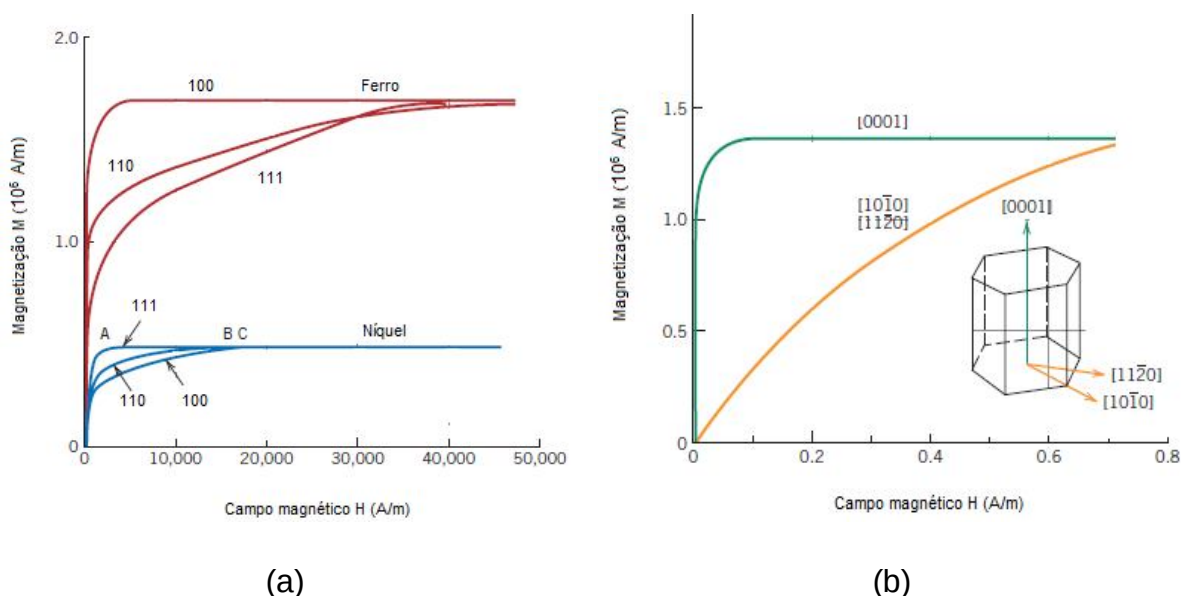
Fonte: BOHN, 2009 (Adaptado)

E_{an} é a energia anisotrópica magnetocristalina, que relaciona a orientação preferencial de magnetização à orientação cristalográfica dos materiais ferromagnéticos. Essa parcela da energia total atua de forma a favorecer a magnetização na direção de determinados eixos cristalográficos, considerados de fácil magnetização. Para que a magnetização ocorra em direções não favoráveis, a energia necessária é muito maior em relação a direções de fácil magnetização. Esse acréscimo de energia entre as direções de fácil e de difícil magnetização corresponde à energia magnetocristalina (GRIJALBA, 2010; BOHN, 2009). Na Figura 3.2 podem ser observadas as direções de magnetização para o ferro, níquel e cobalto.

Na Figura 3.2a, na curva relativa ao ferro, de estrutura cristalina CCC, são apresentadas três direções de magnetização: [100], [111] e [110], sendo a direção [100] a de mais fácil magnetização. O ápice da magnetização na direção [100] é atingido com a aplicação de campos magnéticos de menor intensidade. O mesmo ocorre nas outras direções equivalentes a [100].

Algo análogo pode ser observado para a curva correspondente ao níquel, Figura 3.2a, e ao cobalto, Figura 3.2b. No níquel e no cobalto as direções de fácil magnetização são [111] e [0001], nessa ordem, bem como em suas direções equivalentes (SILVA JR, 2005; CALLISTER, 2010).

Figura 3. 2 - Direções de magnetização

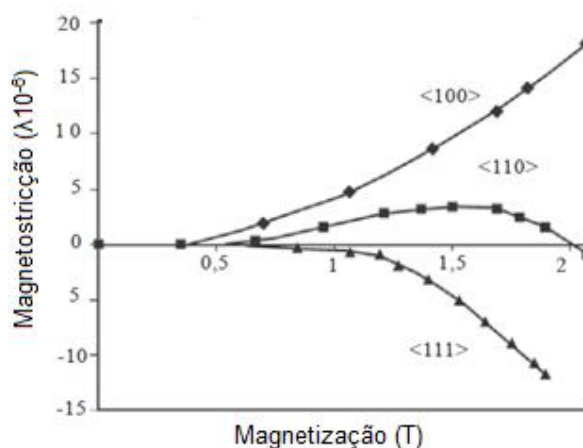


(a) ferro e níquel (b) cobalto

Fonte: CALLISTER, 2010 (Adaptado e traduzido)

E_{stric} é a energia magnetoelástica e está relacionada a magnetostricção, que é definida como a variação dimensional apresentada pelo material durante a magnetização. A magnetostricção é quantizada por meio da variação do comprimento final em relação ao inicial ($\Delta l/l$ ou λ) (GRIJALBA, 2010; BOHN, 2009). O movimento de parede de 90° e a rotação provocam variações no comprimento, o que não ocorre para o movimento de parede de 180° . Na Figura 3.3 pode-se observar a magnetostricção no ferro.

Figura 3. 3 - Magnetostricção no ferro



Fonte: LANDGRAF, 2002 (Adaptado)

Nas direções <100>, a magnetostricção aumenta conforme o campo magnético é elevado, logo pode se concluir que o movimento de paredes de 90° é mais intenso nessas direções. Quando ocorre contração o movimento de paredes ocorre por rotação, o que é notado nas direções <111>. Na curva intermediária, relativa às direções <110>, considera-se que a magnetostricção praticamente não ocorre até o campo de 0,7 T, vindo surgir após esse valor até 1,5T, ocorrendo por meio do movimento de parede de 90°. A partir de 1,5 T até 2,0 T o movimento de parede ocorrerá por rotação, ocorrendo uma contração no material (LANDGRAF, 2002).

E_{dis} é a parcela da energia total denominada energia de desordem, que leva em consideração as descontinuidades presentes no material, como as lacunas, as discordâncias e as inclusões.

3.1.3. Domínios magnéticos

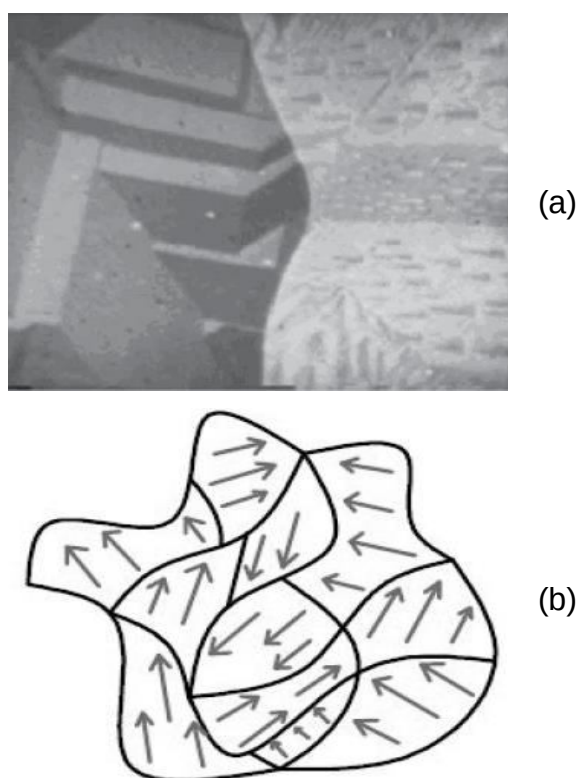
Os domínios magnéticos também podem ser definidos como regiões nas quais os momentos magnéticos apresentam ordenação de longo alcance. Os materiais ferromagnéticos apresentam essa disposição mesmo em seu estado desmagnetizado (BOHN, 2009, GRIJALBA, 2010; LANDGRAF, 2002).

Cada um desses domínios atua como um ímã, apresentando polos norte e sul. A forma como os domínios magnéticos estão posicionados retrata a simetria da rede cristalina. (BOHN, 2009).

Na Figura 3.4 podem ser observados domínios em dois grãos adjacentes com diferentes orientações separados por uma interface chamada de parede de domínio magnético (LANDGRAF, 2002).

De acordo com o aumento do campo externo H , os momentos magnéticos de um determinado domínio são orientados na direção de aplicação do campo magnético (LANDGRAF, 2002).

Figura 3. 4 - Domínios magnéticos



(a) imagem e (b) esquema

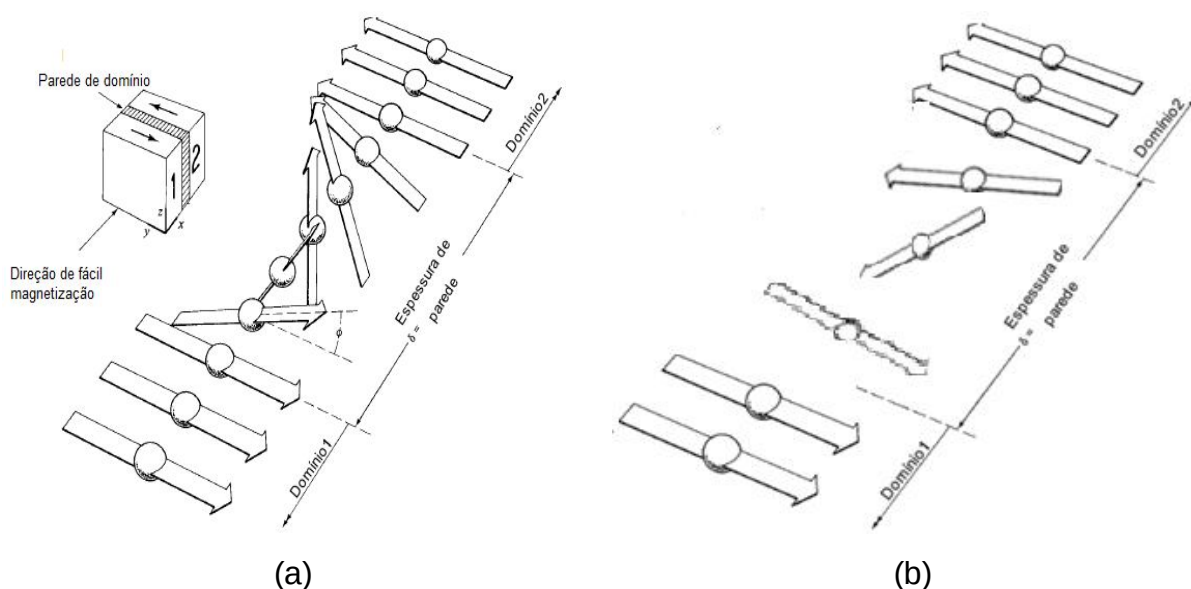
Fonte: LANDGRAF, 2002; GRIJALBA, 2010

As paredes de domínio podem ser classificadas em relação ao ângulo formado entre a direção de magnetização e os domínios que a parede separa. Domínios vizinhos que exibem direções de magnetização em direções opostas são chamados 180° , já

os domínios com direção de magnetização ortogonal são denominados 90° (BOHN, 2009).

As paredes de domínio também podem ser classificadas de acordo com a rotação de seus momentos magnéticos. Quando um momento rotaciona saindo de seu plano original, a parede é classificada como Bloch e quando a rotação é no plano em que o momento se encontra a parede é denominada Néel. Um esquema com esses dois tipos de paredes é exibido na Figura 3.5.

Figura 3. 5 - Classificação dos domínios quanto a rotação dos momentos magnéticos



Parede de Bloch (a) e parede de Néel (b)

Fonte: CULLITY, GRAHAM, 2009 (Adaptado e traduzido)

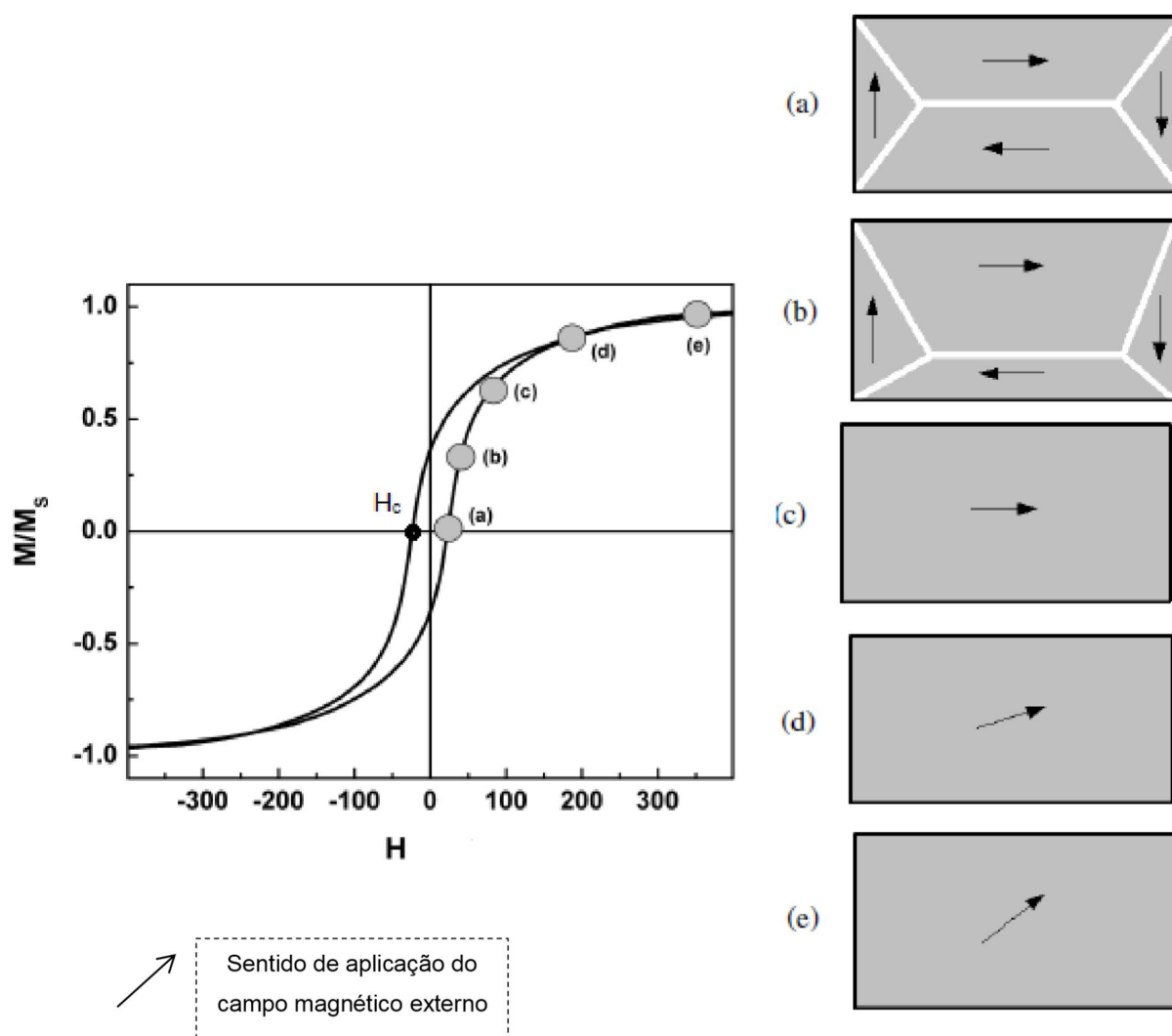
Na Figura 3.5 nota-se uma espessura de parede o que indica que a transição dos momentos ocorre progressivamente.

3.1.4. Curva de magnetização

A curva de magnetização ou curva de histerese pode ser visualizada em diferentes configurações, em razão dos diferentes arranjos dos domínios magnéticos (BOHN, 2009).

Na Figura 3.6 podem ser observados os estágios de magnetização e o respectivo arranjo dos domínios em cada etapa. A princípio pode-se observar o material ferromagnético no estado desmagnetizado, no qual a estrutura dos domínios é visualizada, ponto (a). À medida que o campo magnético externo é aplicado, os domínios que estão na direção do campo vão aumentando. Em contrapartida, os domínios que estão na direção oposta ao campo são reduzidos, ponto (b) (BOHN, 2009).

Figura 3. 6 - Estágios de magnetização



A região entre os pontos (a) e (b) pode ser entendida como sendo uma região de permeabilidade inicial, na qual a magnetização é reversível. Após a retirada do campo magnético os domínios retornam a sua posição inicial, sem qualquer

alteração em seu arranjo (FARIAS, 2005; SILVA JR, 2005).

Conforme o campo externo é aplicado, as paredes de domínio vão desaparecendo, uma vez que os momentos magnéticos vão se alinhando, ponto (c). Essa região em que ocorre esse alinhamento, entre os pontos (b) e (c), é denominada região de magnetização irreversível. O mecanismo de magnetização que prevalece é o movimento de parede, de maneira irreversível, ou seja, com a retirada do campo magnético os domínios não retornam a posição inicial.

Para campos magnéticos de maior magnitude a magnetização ocorrerá por meio do alinhamento dos domínios na direção do campo externo, ponto (d), até o momento em que o ponto de saturação é atingido, ponto (e). A saturação magnética é atingida quando a elevação do campo magnético não resulta em aumento da magnetização, os domínios magnéticos estão orientados na mesma direção. O tipo de magnetização predominante na região entre os pontos (d) e (e) é o de rotação dos domínios, também de forma irreversível (BOHN, 2009; CULLITY; GRAHAM, 2009; SANTOS, 2005; SILVA JR, 2005;).

Assim que o campo externo é retirado nem todos os momentos magnéticos retornam a posição inicial. Essa orientação que permaneceu no material é denominada magnetismo remanescente ou residual. O atraso entre B e H é conhecido como histerese magnética. Para que o material recupere a condição inicial é necessária a aplicação de um campo magnético de sinal contrário, denominado campo coercitivo (H_c) (SANTOS, 2005).

No processo de magnetização, energia magnética é convertida em térmica, o que pode levar ao aparecimento ou coalescimento de partículas que deterioram as propriedades magnéticas. Essa redução na eficiência do material é conhecida como envelhecimento magnético (MARRA; BUONO, 2006).

3.1.5. Perdas Magnéticas

Durante o ciclo de magnetização tem-se a transformação parcial da energia elétrica

em calor. Essa dissipação de calor está associada às perdas magnéticas e pode ocorrer de duas formas: por meio da variação energética nos domínios, durante a magnetização, e em razão da indução de corrente no ferro.

A perda magnética total, perda no ferro, é formada por três parcelas: a perda histéretica (P_h), parasita (P_p) e anômala (P_a) (BOTELHO, 2012; CARDOSO, 2010; OLIVEIRA JR, 2014; SANTOS, 2005).

As perdas histéreticas estão relacionadas com a movimentação dos domínios, uma vez que estes que devem superar o atrito e a inércia para que se orientem no sentido do campo magnético aplicado (OLIVEIRA JR, 2014). Essa fração da perda magnética total é depende fortemente da microestrutura do material, sendo influenciada pelo tamanho de grão, pela presença de discordâncias e pelas inclusões do material (OLIVEIRA JR, 2014; BOTELHO, 2012).

A perda por histerese pode ser calculada a partir da curva de histerese, que tem sua área interna proporcional à energia dissipada, como pode ser identificado na Equação 3.6 (LANDGRAF, 2002; PINHO, 2009).

$$P_h = fV_1A_1 \quad (3.6)$$

No qual:

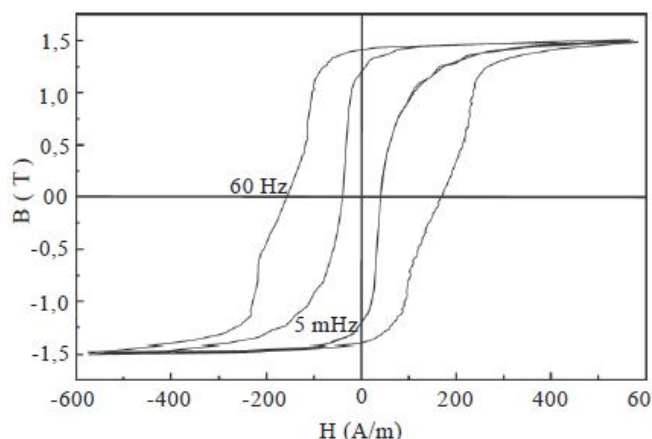
f é a frequência de magnetização

V_1 é o volume do material

A_1 corresponde a área do ciclo

Segundo LANDGRAF (2002) quando a frequência de magnetização é reduzida, a área interna da curva também apresenta como tendência a sua diminuição, como pode ser visualizado na Figura 3.7. Mesmo em condições quase estáticas, a área sempre está presente, existindo sempre uma energia dissipada.

Figura 3. 7 - Curva de histerese em diferentes frequências de magnetização



Fonte: LANDGRAF, 2002

A perda por corrente parasita, também denominada de correntes de Foucault ou corrente turbilhão, ocorre devido ao surgimento de correntes elétricas induzidas no material. Essas correntes surgem devido à variação de fluxo magnético no material, o que provoca a formação de um campo magnético de sentido contrário ao campo externo aplicado (FUKUHARA, 2010; PINHO, 2009).

Essa fração da perda total está relacionada ao tamanho de grão, à composição química e à espessura do material e pode ser calculada por meio da Equação 3.7 (CARDOSO, 2010).

$$P_p = \frac{(\pi B f e)^2}{6 \rho d} \quad (3.7)$$

Onde:

P_p é a perda por corrente parasita

B é a indução máxima (T)

e é a espessura (mm)

f é a frequência (Hz)

ρ é a resistividade ($\mu\Omega\text{m}$)

d é a densidade do material (kg/m^3)

A perda anômala é a diferença entre a perda total e as outras duas parcelas, a histéretica e a parasítica, sendo sua presença é atribuída ao atrito decorrente da

movimentação das paredes de domínio (BOTELHO, 2012). As perdas anômalas podem ser obtidas por meio da Equação 3.8 (SANTOS, 2005).

$$P_a = 8B_{\text{máx}} f T G (2\sigma G^w <J_s> H_{\text{hist}} f)^{1/2} / d \quad (3.8)$$

No qual:

$B_{\text{máx}}$ é a densidade de fluxo máxima (T)

f é a frequência (Hz)

TG é o tamanho de grão (m)

σ é a condutividade elétrica (S/m)

G^w coeficiente adimensional (0,1356)

$<J_s>$ é o valor médio da polarização (0,85 J_s)

H_{hist} é o campo coercivo

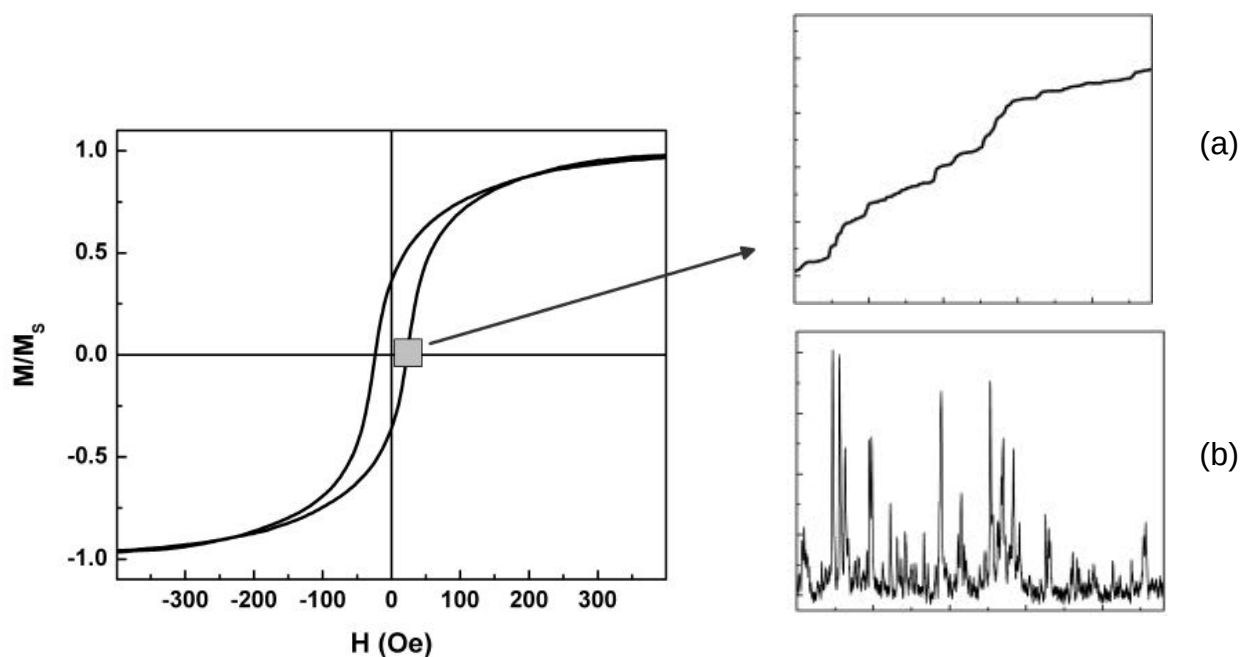
d é a densidade do material do núcleo (kg/m³)

3.1.6. Efeito Barkhausen

A primeira descrição do ruído Barkhausen foi apresentada em 1919 por Heinrich Barkhausen. A descoberta ocorreu por meio de um experimento que avaliava as variações na magnetização em uma bobina conforme o campo magnético era variado discretamente (BOHN, 2009; DREHMER, 2013; SIWIK, 2011).

A curva de magnetização apresenta algumas discontinuidades, como pode ser observado na Figura 3.8. Isso ocorre em função das paredes de domínio apresentarem restrições à sua movimentação durante a magnetização (FUKUHARA, 2010; STEWART, 2004; SIWIK, 2011).

Figura 3. 8 - Descontinuidades da curva de magnetização



(a) Saltos Barkhausen (b) derivada da curva de magnetização em relação ao tempo

Fonte: BOHN, 2009

Descontinuidades, como discordâncias, inclusões, contornos de grão, poros, lacunas, átomos substitucionais e intersticiais, ancoram o movimento de paredes, dando origem aos sítios de aprisionamento. À medida que o campo magnético externo é aumentado, a parede consegue transpor o sítio de aprisionamento, caracterizando um movimento em saltos, Figura 3.8a. A derivada da curva de histerese em relação ao tempo, Figura 3.8b, equivale ao sinal do ruído, o que retrata suas descontinuidades (BOHN, 2009; DESVAUX, 2004; FUKUHARA, 2010; SILVA JR, 2005).

O somatório de todos os saltos, que ocorrem durante a magnetização, dá origem ao ruído Barkhausen (Barkhausen Noise - BN), cujos pulsos de tensão são detectados por uma bobina ferromagnética (DESVAUX, 2004) com o auxílio da lei de Faraday-Lenz, que pode ser observada na Equação 3.9,

$$V = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.9)$$

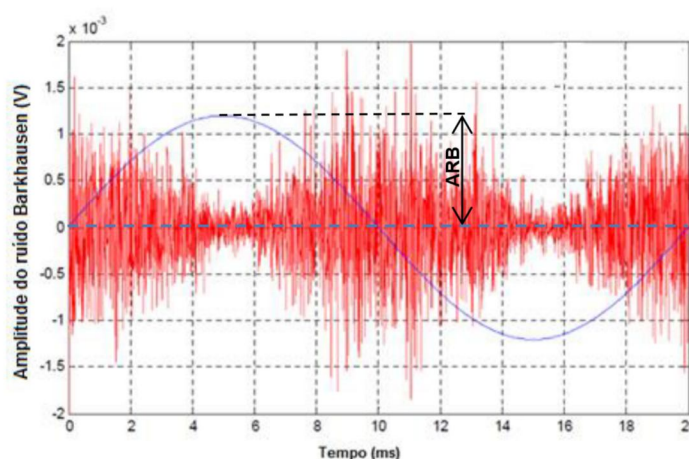
Essa equação determina o ruído no qual,
N é o número de espiras

$d\phi/dt$ é a taxa de variação do fluxo magnético (BOHN, 2009).

Na Figura 3.9 pode ser observado um esquema que exhibe o aspecto característico do ruído Barkhausen em função do tempo, para um ciclo de magnetização. A tensão de excitação é representada pela onda senoidal, o ruído é representado pelo envelope do sinal e a seta indica o valor da amplitude do ruído, ARB, (SILVA JR, 2005; CHUKWUCHEKWA, 2011).

Dois tipos de ruídos são produzidos durante a magnetização, o ruído magnético Barkhausen e o acústico Barkhausen (SILVA JR, 2005; ASTUDILLO et al, 2012). O ruído acústico é causado pelo movimento brusco de parede de 90° , que ao transpor uma descontinuidade cria variações pontuais na magnetostricção, emitindo ondas elásticas. O movimento de parede de 180° , não contribui para a emissão do ruído magnético acústico, uma vez que sua movimentação não produz magnetostricção (YUEHUANG et al., 1993). O ruído Barkhausen é gerado predominantemente pelo movimento de parede de 180° , e em menor magnitude pelo movimento de rotação (SILVA JR, 2005; DESVAUX, 2004).

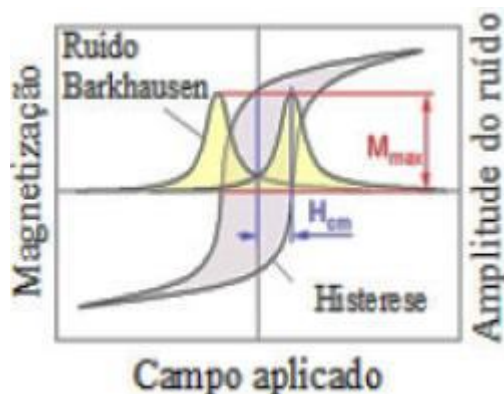
Figura 3. 9 - Ruído Barkhausen característico do aço GO



Fonte: CHUKWUCHEKWA, 2011 (Adaptado e traduzido)

Associando o sinal da amplitude do ruído com a curva de histerese, Figura 3.10, observa-se que o valor máximo do ruído ocorre na região de H_c , ponto de maior inclinação da curva de histerese (SILVA JR, 2005; SIWIK, 2011).

Figura 3. 10 - Amplitude do ruído X Curva de histerese



Fonte: SIWIK, 2011 (Adaptado).

3.1.6.1. Efeito da microestrutura no ruído Barkhausen

O ruído Barkhausen é uma técnica não destrutiva muito utilizada para caracterizar a microestrutura de um material ferromagnético. O ensaio permite nítida identificação de cada microestrutura, uma vez que o aspecto do sinal relativo a cada microestrutura é distinto (GÜR; ÇAM, 2006; CAPÓ - SÁNCHEZ et al, 2004).

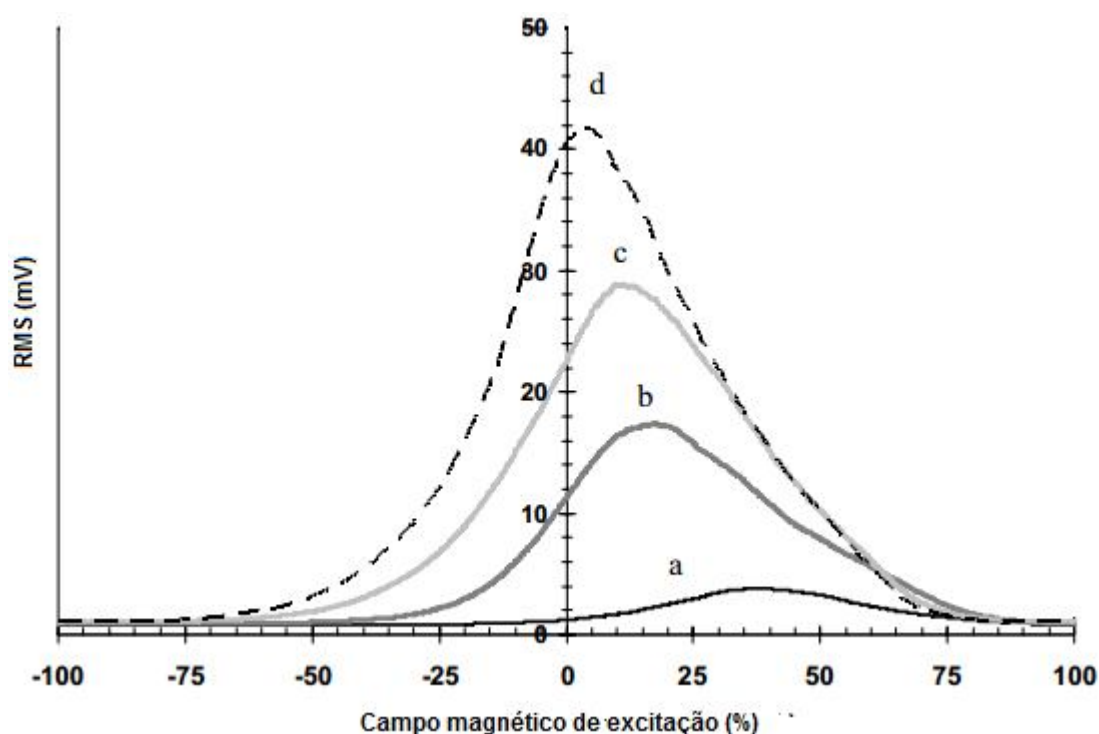
Essa relação entre o ruído e a microestrutura pode ser observada na Figura 3.11, na qual a curva exibe o sinal relativo a quatro constituintes. A curva 'a' representa a martensita, 'b' martensita revenida, 'c' perlita fina e ferrita, já 'd' está associado a perlita grosseira e ferrita. O perfil exibido na Figura 3.11, pertence ao aço SAE 4140, após os tratamentos térmicos adequados (GÜR; ÇAM, 2006).

A amplitude das curvas exibidas na Figura 3.11 está relacionada à magnitude do salto Barkhausen, e exibe a seguinte ordem de intensidade (menor para a maior): martensita, martensita revenida, perlita fina e ferrita, seguida da perlita grosseira e ferrita. O campo magnético relacionado à amplitude é uma grandeza necessária ao movimento de parede a partir de um sítio de ancoramento.

O valor RMS do aço SAE 4140, relativo à martensita, é o menor entre os constituintes analisados. O tamanho médio dos domínios magnéticos, nessa condição, é menor em virtude do menor tamanho das agulhas de martensita, não

sendo necessários grandes saltos durante a magnetização do material. Em contrapartida, a alta densidade de discordâncias na martensita dificulta o movimento de parede, sendo necessário um alto campo magnético para promover o crescimento do domínio (GÜR; ÇAM, 2006; SILVA, 2010).

Figura 3. 11 - Valor RMS_{RMB} x Campo de excitação



(a) Martensita, (b) martensita revenida, (c) perlita fina e ferrita, (d) perlita grosseira e ferrita.

Fonte: GÜR; ÇAM, 2006.

Já na martensita revenida a estrutura magnética se torna mais grosseira, sendo o tamanho médio dos domínios aumentado. A amplitude é então elevada em razão do salto ser maior. Deste modo, a resistência à movimentação das paredes se torna menor. Logo, o campo de excitação necessário ao crescimento do domínio é menor (GÜR; ÇAM, 2006; SILVA, 2010).

Na ferrita o ruído apresenta elevada amplitude, indicando que os saltos Barkhausen requeridos também são maiores. O tamanho do salto entre as paredes de domínio depende do tamanho médio de grão, uma vez que o contorno de grão atua como uma eficaz barreira à movimentação das paredes (RANJAN; JILES; RASTOGI, 1987). A orientação preferencial da perlita, matriz ferrítica com lamelas de cementita,

pode favorecer a passagem da parede de domínio formando um caminho com menores restrições.

Entre a perlita fina e a grosseira, a que apresenta maior sinal é a perlita grosseira. O maior valor do ruído desta é explicado pela menor quantidade de obstáculos, uma vez que o espaço interlamelar na perlita grosseira é maior. Desta forma, o salto Barkhausen também será maior.

Por meio da análise do sinal RMS de cada uma das microestruturas exibidas na Figura 3.11 conclui-se que o arranjo microestrutural irá determinar a forma como as paredes de domínio avançam na presença dos sítios de ancoramento. Os contornos de grão, bem como o tamanho de grão são os maiores obstáculos à movimentação dos domínios, exercendo grande influência na amplitude do sinal. A presença e a distribuição de precipitados e inclusões também afetam o sinal ao bloquear o movimento de parede. As discordâncias também atuam dessa forma, ao impedir o avanço dos domínios, atuam na amplitude além de elevar o campo magnético necessário à magnetização do material.

3.1.6.2. *Efeito das tensões no RMB*

O arranjo e o comportamento dos domínios magnéticos são influenciados pelo estado de tensões presente no material, uma vez que o equilíbrio das energias que compõe a energia magnética total é desfeito (STEFANITA, 2008; BLAOW; EVANS; SHAW, 2007). O efeito das tensões na magnetização pode descrito como um campo efetivo, descrito por meio da Equação 3.10 (JILES; LI, 2004).

$$H_{\text{eff}} = H + \alpha M + H_{\alpha} \quad (3.10)$$

H é o campo magnético externo

M a magnetização

α é um parâmetro adimensional que representa o acoplamento entre os domínios, ele pode ser calculado por meio da Equação 3.11.

H_α é o campo magnético relativo a tensão aplicada, pode ser calculada por meio da Equação 3.12

$$\alpha = \frac{k_b T}{\mu_0 M_1} \quad (3.11)$$

k_b é a contante de Boltzmann

T é a temperatura

μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo

M_1 é o momento magnético

$$H_\sigma = \frac{3}{2} \frac{\sigma}{\mu_0} \frac{d\lambda}{dM} (\cos^2 \Theta - \nu \sin^2 \Theta) \quad (3.12)$$

σ é o valor da tensão, que assumira um valor positivo quando a tensão for de tração e negativo quando a tensão for de compressão;

λ é a magnetostricção

M é a magnetização

μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo

Θ é o ângulo entre a direção de aplicação da tensão e a direção do campo magnético

ν é o coeficiente de Poisson

Quando o material é submetido à aplicação da tensão, a energia magnética total sofre um rearranjo a fim de apresentar o menor somatório de suas parcelas. As energias magnetocristalina e magnetoelástica competem para determinar a direção de magnetização dos domínios (STEFANITA, 2008).

As tensões elásticas provocam redução da energia magnetoelástica o que leva a um alinhamento dos momentos magnéticos na direção cristalográfica, mais próxima à sua direção de aplicação (STEFANITA, 2008; SILVA JR, 2005; JAGADISH; CLAPHAM, ALTHERTON, 1989). Esse alinhamento se dá quando a magnetostricção característica do material é positiva. Ao se aplicar um campo

magnético na mesma direção de aplicação da tensão de compressão a amplitude do ruído é reduzida, já na direção perpendicular o ruído é aumentado.

Para a tração o comportamento observado é o oposto, tendo a amplitude do ruído aumentado quando com a tensão apresenta na mesma direção do campo, e a amplitude reduzida quando a direção entre o campo magnético e a tensão é perpendicular, Figura 3.12 (STEFANITA, 2008; BLAOW; EVANS; SHAW, 2007).

Na Figura 3.12 pode-se observar o comportamento característico do ruído quando o aço é submetido à deformação por meio da aplicação de tensões de tração. Na Figura 3.12a é exibido um gráfico polar da energia magnética Barkhausen, $RMB_{energia}$, no qual o círculo é alongado na direção do carregamento uniaxial indicando um aumento do ruído magnético.

Figura 3. 12 - Relação entre tensão e o $RMB_{energia}$

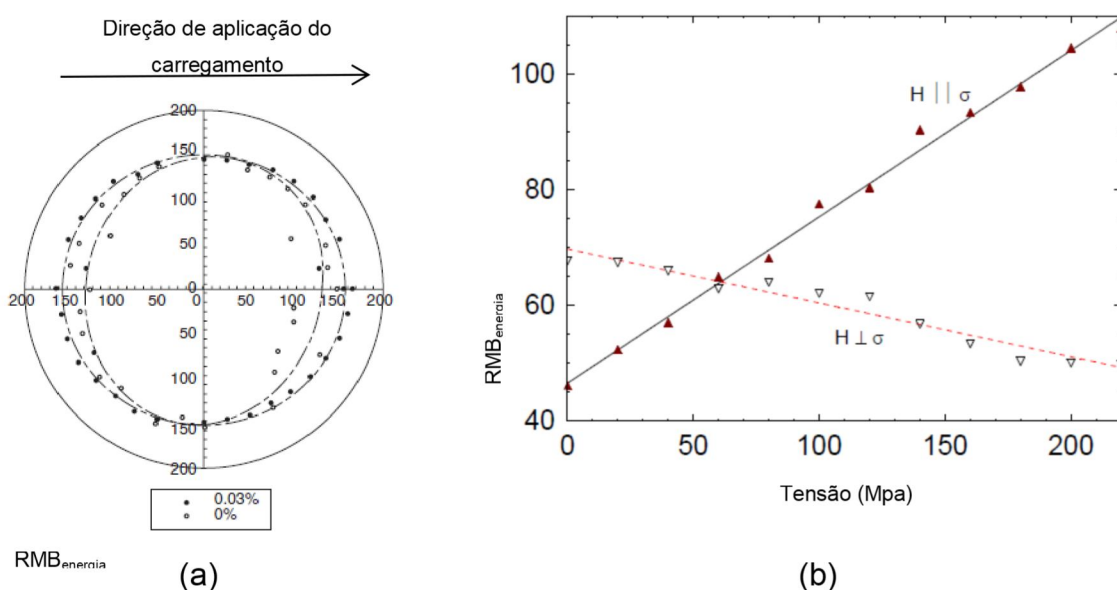


Gráfico polar $RMB_{energia}$ (a) $RMB_{energia}$ X Tensão

Fonte: STEFANITA, 2008; KRAUSE et al., 2013, adaptado e traduzido

Na Figura 3.12b é observado um aumento do $RMB_{energia}$ quando o campo e a tensão aplicados têm a sua direção de aplicação paralelas, linha cheia, e uma redução do ruído quando a direção de aplicação do campo e a tensão são perpendiculares, linha pontilhada.

As tensões que provocam deformações plásticas distorcem a rede cristalina de forma permanente, o deslizamento de planos cria campos de tensão que afetam a dinâmica dos domínios magnéticos, podendo alterar a textura magnética dos materiais ferromagnéticos. Outro efeito da deformação plástica é o aumento da densidade de discordâncias, o que provoca um aumento do ruído magnético, uma vez que a quantidade de obstáculos ao movimento de parede aumenta (JAGADISH; CLAPHAM, ALTHERTON, 1989).

As tensões trativas aumentam a quantidade de paredes de domínio de 180° além de ativar a movimentação de outros domínios magnéticos, por meio da redução da energia necessária à sua movimentação. As tensões compressivas apresentam comportamento inverso (DESVAUX et al. , 2004;. SILVA JR, 2005).

3.2. Ensaio magnetoelástico

O ensaio magnetoelástico é uma técnica não destrutiva que permite a avaliação de propriedades magnéticas, tensões residuais, dureza e características microestruturais dos materiais ferromagnéticos (SORSA, 2013; CAPÓ - SÁNCHEZ et al, 2004). O efeito Barkhausen e toda a dinâmica de movimentação dos domínios magnéticos são o princípio do ensaio. A sensibilidade do ensaio a várias aplicações, a facilidade em executá-lo faz com que esse método se destaque entre os ensaios não destrutivos (KIM; KWON, 2002).

3.2.1. Equipamentos

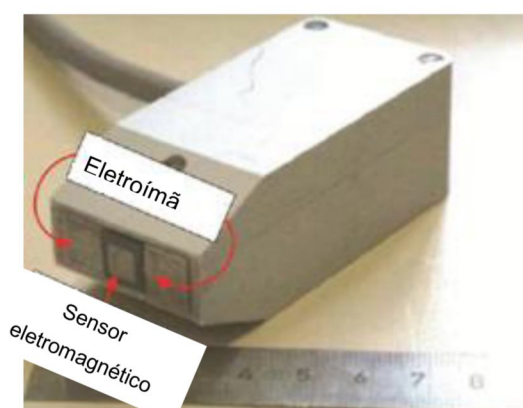
Basicamente para a realização do ensaio são utilizados um equipamento para a magnetização, um sistema de aquisição de dados e um sensor eletromagnético (SORSA, 2013)

O aparato usado na magnetização é formado por um gerador de função e um amplificador. O gerador de função produz ondas senoidais ou triangulares, o que afeta o tipo do sinal emitido. Segundo Durin e Zapperi (2006), a aplicação de um

campo magnético externo com forma triangular é recomendada em razão de simplificar o cálculo do sinal. Para caracterização do material Sipahi (1993) considera mais adequado a utilização de uma onda senooidal.

Já o amplificador exerce duas funções, a de amplificar o sinal e a de alimentar o eletroímã que irá magnetizar o material (SILVA JR; MARQUES, 2006). A captação do ruído é feita pelo sensor eletromagnético, que é uma bobina constituída de um núcleo ferromagnético. O eletroímã que atua na magnetização e o sensor eletromagnético são montados em um único conjunto denominado sonda magnetoelástica, como pode ser observada na Figura 3.13a (DIAS, 2011). A sonda composto pelo eletroímã e o sensor, é fabricado de acordo com a aplicação e geometria da peça.

Figura 3. 13 - Sonda magnetoelástica



Fonte: DIAS, 2011.

No equipamento e no software são ajustados os valores de tensão, frequência, corrente bem como a quantidade de “envelopes” que serão apresentados após a realização do ensaio. Em geral o sensor é colocado em contato com a região do material a ser analisada uma vez que seu afastamento irá provocar a redução do fluxo magnético no material.

A frequência de teste é a frequência com que o campo magnético é aplicado ao material, além de determinar a profundidade de aquisição de dados está associada à velocidade de varredura do ensaio. Elevadas frequências possibilitam uma aquisição de dados superficial, já com frequências mais baixas o inverso ocorre (ASTUDILLO

et al, 2012; BLAOW; SHAW, 2014). Essa aquisição de dados relacionada a frequências é denominada “efeito de pele” e pode ser calculada conforme a Equação 3.13.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{f\sigma\mu_0\mu_r}} \quad (3.13)$$

Onde,

f é a frequência

μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo

μ_r é a permeabilidade magnética do material

σ é a condutividade elétrica

3.2.2. Análise do sinal

Para análise do ruído utiliza-se a envoltória do sinal do ruído, que é calculado por meio da transformada de Fourier (SIWIK, 2010). Após o cálculo do envelope pode-se calcular o valor máximo do pico (PEAK), a posição do pico (PEAKPOS), a largura da curva na metade do valor máximo (FWHM) e o valor médio quadrático (RMS – Root mean square), que é o mais utilizado e bem aceito pela comunidade científica (LINDGREN; LEPISTO, 2002; SULLIVAN, 2004).

O valor RMS corresponde à raiz quadrada do ruído Barkhausen em função do tempo, e pode ser calculado por meio da Equação 3.14.

$$\text{RMS}_{\text{RMB}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_m)^2}{n-1}} \quad (3.14)$$

No qual:

RMS_{RMB} é o valor RMS do ruído Barkhausen

V_i é o valor de tensão instantânea

V_m é o valor médio do ruído

n_1 é o número de pontos do sinal

O sinal RMB apresenta média nula tendo seu sinal centrado na amplitude, logo o desvio padrão corresponde ao valor RMS representando as variações em torno do ruído Barkhausen (GRIJALBA, 2010).

4. Aços Elétricos

Neste capítulo será apresentado uma visão geral dos aços elétricos bem como dos parâmetros que influenciam o seu desempenho magnético.

4.1. Características gerais dos aços elétricos

Com o objetivo de reduzir perdas energéticas a maioria dos equipamentos elétricos possui em seu interior algum componente produzido com aços elétricos, sendo utilizados em todo o ciclo energético (FUKUHARA, 2010; LOSS, 2010). Estima-se que no Brasil sejam consumidos 330.000 toneladas desses aços anualmente (LANDGRAF, 2002).

Na composição química do material o principal elemento de liga é o silício, que na concentração ideal aumenta a resistividade e reduz perdas magnéticas (GIROTO, 2010). A qualidade ou desempenho dos aços siliciosos é comumente avaliada em relação às perdas e à permeabilidade magnética, sendo estes os parâmetros de controle durante a produção desse aço (TOLEDO, 2007).

Uma classificação comum destes aços é o uso do termo “mole” pelo fato de estes permanecerem parcialmente magnetizados com a retirada do campo magnético (ROCHA; MEZA, 2005).

Na etapa final da produção dos aços elétricos são obtidas chapas com espessuras que variam entre 0,27mm e 0,90mm. Essa etapa de conformação é sempre seguida por um recozimento para aliviar tensões e acertar as propriedades do aço.

O tamanho de grão, o estado de tensões, assim como a quantidade de impurezas também devem ser considerados para uma melhor resposta magnética do material.

4.2. Aços GNO

O campo magnético nos motores elétricos incide no plano da chapa, o que em presença de corrente alternada faz o fluxo magnético variar constantemente. Em razão dessa variação do fluxo, na produção dos motores devem-se utilizar aços com propriedades magnéticas semelhantes em todas as direções. Essa isotropia magnética é alcançada com a utilização dos aços elétricos de grão não orientado (CARDOSO, 2010; LANDGRAF, 2002). Os aços GNO são ligas Fe - Si com o teor de Si em torno de 3,5% e teores de carbono inferiores a 0,003%, apresentando ótima relação custo benefício.

Estes aços não possuem textura acentuada, porém apresentam famílias de componentes orientados preferencialmente denominados textura de fibra. A direção de fácil magnetização do ferro $\langle 100 \rangle$ é considerada como ideal e levando em consideração a direção de aplicação do campo magnético, a textura de fibra mais apropriada é a $\{100\} \langle 0vw \rangle$. Essa fibra ideal, também conhecida como fibra cúbica, tem seus grãos com planos $\{100\}$ paralelos à chapa e direções $\langle 100 \rangle$ em todos os planos (BOTELHO, 2012; KOVAC, DZUBINSKY; SIDOR, 2004)

Os aços de grão não orientado podem ser classificados em três grupos:

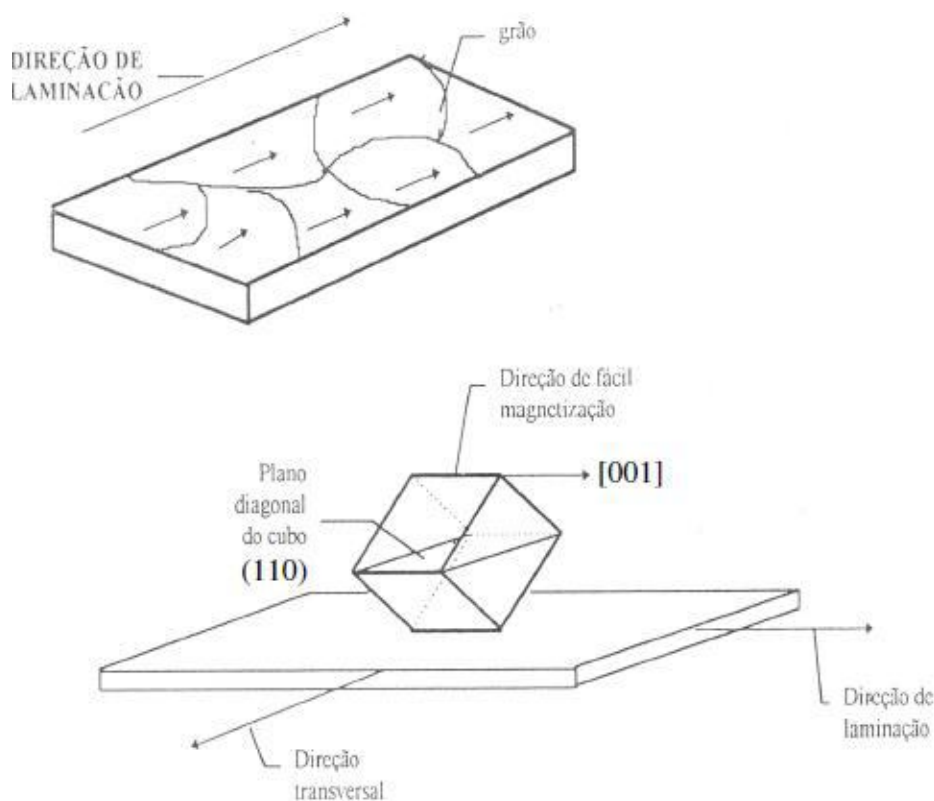
- **Totalmente processados:** são aços cujas propriedades magnéticas já foram definidas pela siderúrgica, não sendo necessário tratamento térmico posterior. Exibem altos valores de permeabilidade magnética e baixas perdas magnéticas (NEGRI, 2011).
- **Semiprocessados:** as propriedades magnéticas desses aços devem ser definidas pelo cliente, por meio de recozimento (NEGRI, 2011).
- **Não processados:** por meio da decarbonetação e do crescimento de grão pode-se reduzir em 50% as perdas magnéticas. Os aços AISI 1006 e AISI 1008 pertencem a esse grupo.

4.3. Aços GO

O processo desenvolvido por Goss é utilizado na produção do aço de grão orientado, GO. A textura encontrada nesses aços (110)[001] faz com que o mesmo seja muito utilizado na fabricação de transformadores, uma vez que seu campo magnético é aplicado em direções preferenciais. Deste modo, sua montagem é feita de forma a aproveitar da melhor forma esse campo preferencial (BOTELHO, 2012).

A textura Goss é definida como a associação do plano (110) com a direção de laminação [001], o que é exibido na Figura 4.1 (SANTOS, 2005). Devido à essa orientação preferencial, suas propriedades magnéticas decaem na direção transversal (SANTOS, 2005).

Figura 4. 1 - Textura Goss



Fonte: SANTOS, 2005

A textura Goss é gerada por meio da recristalização secundária de uma matriz

primária. Esse mecanismo de crescimento dessa textura ainda não é bem explicado, sendo o mais aceito o do crescimento seletivo. O modelo do crescimento seletivo se baseia no fato de que os grãos Goss tem maior probabilidade de formar contornos especiais com os grãos da matriz. Dois elementos são necessários para a sua obtenção: a presença de inibidores até a fase de recozimento e a formação de uma textura de recristalização primária ideal (CESAR, 2012).

Os aços de grão orientado podem ser classificados como:

- **Aço GO regular:** produzido pelo método GOSS com permeabilidade magnética em torno de 1800.
- **Aço GO de alta indução:** apresenta menores perdas magnéticas e maior permeabilidade, quando comparado com o GO regular.
- **Aço GO com refino de domínios magnéticos:** fabricado a partir do GO de alta indução, tendo seus domínios magnéticos refinados por meio de um laser. Apresenta maior permeabilidade e menores perdas magnéticas (SANTOS, 2005).

4.4. Histórico

Após a descoberta do comportamento magnético da terra e do desenvolvimento da lei de atração e repulsão das cargas por Coulomb, observou-se no decorrer da história, uma relação entre os aços elétricos, o eletromagnetismo e as máquinas elétricas (SANTOS, 2005).

Após Hadfield e outros pesquisadores, no início do século XX, que estudavam as ligas ferro - silício, concluírem que o silício aumentava a resistividade das ligas, foi desenvolvida uma tecnologia para a produção dos aços silício (TOLEDO, 2007). Já 1903 marca o início da produção do aço GNO, laminado à quente na forma de chapas. A laminação a frio desse aço teve seu início em 1930 (LANDGRAF, 2002).

A origem dos aços de grão orientado data de 1934, quando Goss desenvolveu uma orientação preferencial dos grãos, que ficou conhecida como textura Goss {110}[001] (CESAR, 2012; LANDGRAF, 2002). A partir da década de 50 as pesquisas realizadas já começaram a apresentar avanços com a relação à redução de perdas magnéticas, sendo estabilizadas na década de 70 e 80 (CESAR, 2012). Após esse período os avanços tecnológicos têm permitido constantes melhorias no processo de produção dos aços elétricos.

No Brasil a produção dos aços de grão não orientado iniciou-se em 1956 pelo processo de laminação a quente. A produção por laminação a frio data de 1979, para o aço GNO e de 1981 do aço GO (LANDGRAF, 2002)

4.5. Aplicação dos aços elétricos

Os aços GO são utilizados principalmente na produção de transformadores, reatores de potência, hidrogeradores, turbogeradores. Já os aços GNO podem ser utilizados em motores, geradores de usina hidrelétrica, compressores herméticos, freezers e ar condicionado, reatores de lâmpadas fluorescentes (CARDOSO, 2010). Na Figura 4.2 pode - se observar diversos exemplos de aplicações dos aços elétricos.

Figura 4. 2 - Aplicações dos aços elétricos

Aplicação	Aços de grão não orientado		Aços de grão orientado	
	Baixo silício	Alto silício	Convencional	Alta permeabilidade
Motores pequenos				
Reatores de lâmpadas				
Motores médios AC	_____			
Transformadores de solda	_____			
Transformadores de áudio	_____	_____		
Transformador de potência pequeno		_____	_____	
Máquinas rotativas		_____		
Geradores médios	_____			
Transformadores de distribuição			_____	
Transformador de potência				_____

Fonte: MOSES, 1990 (Adaptado)

4.6. Parâmetros que afetam as propriedades magnéticas dos aços elétricos

A resposta eletromagnética dos aços ao silício é afetada diretamente pelo processo de fabricação, composição química e características microestruturais deste material. Alguns parâmetros de maior relevância bem como as perdas a que eles se relacionam serão discutidos nos itens seguintes.

4.6.1. Composição química

Os aços de grão não orientado são diferenciados fundamentalmente por sua composição química, e pela presença dos seguintes elementos: silício, alumínio, fósforo e manganês (NEGRI, 2011). O teor de silício nos aços elétricos pode representar até 6,5% em peso da constituição do aço (BOTELHO, 2012).

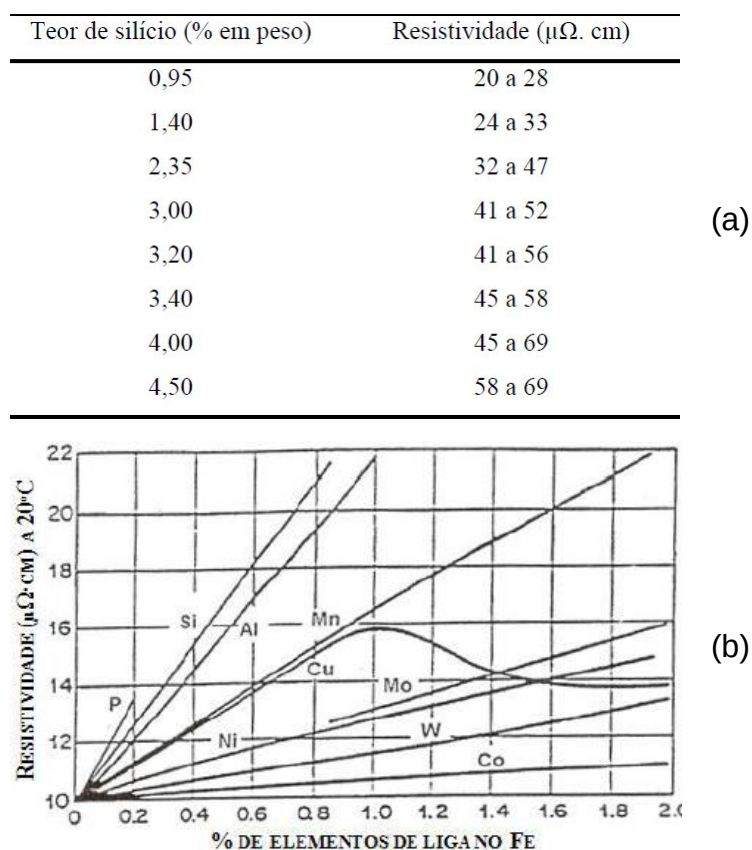
O teor de silício em aços convencionais fica em torno de 3,5 %, o que eleva a resistividade e ductilidade além de reduzir as perdas magnéticas (BOTELHO, 2012). Em torno de 6,5% o silício eleva a resistividade e reduz a magnetostricção, porém sua utilização nessa condição fica limitada a alta dureza adquirida pelo material em função do silício (NEGRI, 2011). Na figura 4.3 pode ser observada a influência dos elementos de liga na resistividade, tendo como destaque a atuação do silício nessa propriedade.

Além afetar a resistividade o Si causa precipitação do oxigênio, o que reduz perdas histeréticas e o envelhecimento magnético. Acima de 0,05% de carbono o silício precipita a grafita, o que não interfere nas perdas por histerese. Ligas com teores de Si superiores a 2,5% podem ser recozidas em temperaturas maiores, uma vez que a transformação gama alfa é obstruída pela presença desse elemento, o que leva a formação de grãos maiores, o que também reduz a parcela de perdas magnéticas relativas à histerese (TOLEDO, 2007).

O teor de carbono bem como a presença de elementos residuais interfere nas propriedades magnéticas, devido à possibilidade de formarem precipitados e inclusões. A presença desses precipitados e inclusões aumenta as perdas

magnéticas por formarem centros de aprisionamento dos domínios magnéticos. Para valores menores do que 30ppm em carbono, essa redução nas propriedades não é pronunciada de forma a interferir no desempenho desses aços (NEGRI, 2011).

Figura 4. 3 - Resistividade elétrica



Influência do silício (a) e de outros elementos de liga (b) na resistividade

Fonte: ASM Committee on magnetically soft material. Magnetically Soft Materials in TOLEDO 2007; MARRA, 2006.

4.6.2. Tamanho do grão

O tamanho do grão é um parâmetro significativo no controle de perdas magnéticas totais. As perdas histeréticas são reduzidas com a presença de grão maiores, porém essa granulação mais grosseira pode levar ao aumento das perdas por correntes parasitas (CESAR, 2012; TOLEDO, 2007).

Um tamanho de grão ideal é requerido de forma a equilibrar essas duas parcelas da perda magnética total. O diâmetro médio de 150 μm é considerado ideal, em aços

de grão não orientado. Já em aços de grão orientado o tamanho de grão que minimiza as perdas está entre 2 e 3 mm (CESAR, 2012).

O aumento do tamanho de grão leva a um aumento do tamanho dos domínios magnéticos, reduzindo também a quantidade de contornos de grão, que são barreiras ao movimento de parede.

4.6.3. Textura

O aço GO apresenta melhores propriedades magnéticas na direção de laminação, apresentando maior permeabilidade e menores perdas nessa direção. A técnica mais comum para designar a textura é a difração de raios X, e o EBSD (*electron backscattered diffraction*) (CESAR, 2012).

Já o GNO não exibe essa orientação pronunciada, apresenta somente um feixe de textura, o que lhe confere propriedades semelhantes em todas as direções (NEGRI, 2011).

Na Figura 4.4 é observado um gráfico de indução e perdas totais em relação a um ângulo Θ . Esse ângulo é corresponde ao ângulo entre a aplicação do campo magnético e a direção de laminação. Verifica - se a variação da indução magnética e das perdas totais conforme se varia Θ , isso ocorre em razão da textura Goss, sendo as propriedades do aço GO dependentes de sua orientação (LANDGRAF; TAKANOHASHI; CAMPOS, 2002).

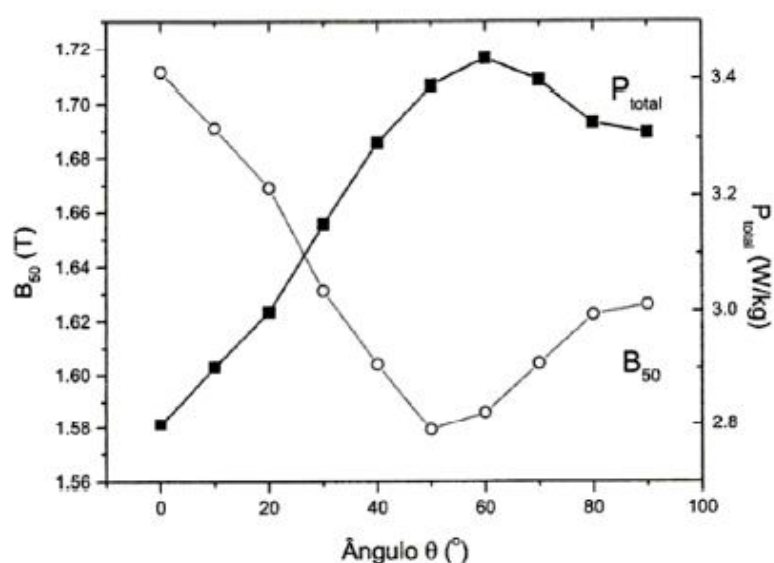
4.6.4. Efeito das Tensões

O desempenho dos aços ao silício é afetado pela presença de tensões mecânicas. Tensões elásticas de pequena magnitude podem dar origem a deformações, causando distorções na rede cristalina (SANTOS, 1999).

Exemplos de tensões residuais na utilização dos aços elétricos podem ser

observados durante o corte da chapa, o resfriamento não controlado e até mesmo no manuseio do material. Essa distorção gerada por essas operações pode afetar a permeabilidade e as perdas magnéticas da chapa, estendendo-se por uma distância relativa a espessura da chapa (SANTOS, 1999). Essas tensões que geram deformações plásticas, mesmo que localizadas, afetam a dinâmica do movimento de paredes podendo aumentar a densidade de discordâncias, que atuam ancorando os domínios magnéticos.

Figura 4. 4 - Indução e perdas magnéticas totais na direção de aplicação do campo magnético



Fonte: LANDGRAF, 2002

5. MATERIAIS E MÉTODOS

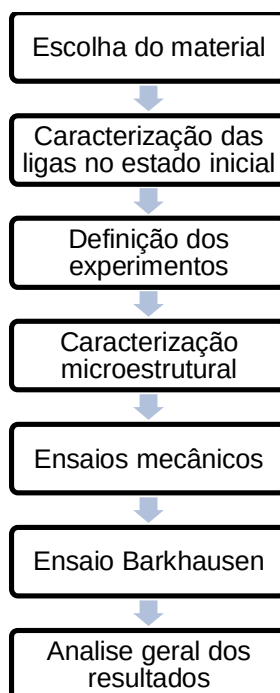
5.1. Descrição geral do trabalho realizado

Como identificado antes, este trabalho apresenta o estudo do efeito da variação do processamento mecânico na resposta magnética dos aços GO e GNO. A resposta magnética é avaliada por meio do ruído Barkhausen, ao se comparar o ruído produzido pelo material ao ser magnetizado no estado inicial com o ruído presente no aço elétrico após os corpos de prova serem submetidos à deformação em tração, tração e cisalhamento e cisalhamento cíclico.

Já a caracterização mecânica foi concluída com a realização do ensaio de dureza Vickers, por meio do microdurômetro, e do ensaio de tração, utilizando-se uma máquina de ensaios universais.

Na Figura 5.1 é exibida uma representação esquemática do estudo realizado.

Figura 5. 1 - Metodologia adotada no trabalho



Fonte: Produzido pela autora

5.2. Materiais

Neste trabalho foram selecionados dois materiais: o aço de grão orientado, GO, tipo P999E, e o aço de grão não orientado, GNO, tipo P920P, ambos doados pela Aperam South America. As composições químicas informadas pelo fabricante podem ser verificadas nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5. 1 - Composição química aço GNO

GNO - P920P					
C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	Cr (%)	Ni (%)
0,0021	2,062	0,4206	0,0257	0,1967	0,0266

Fonte: Aperam

Tabela 5. 2 - Composição química aço GO

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

Fonte: Aperam

O aço GNO, com 2% de silício, foi fornecido na forma de chapas com 0,3mm de espessura. Já o aço GO com teor de silício em torno de 3% foi fornecido sob a forma de chapas de 0,27mm de espessura. Estes aços são totalmente processados, não sendo necessário um recozimento posterior.

5.3. Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural foi conduzida por meio do ensaio metalográfico e da difração de raios - X. Os ensaios foram realizados nos materiais no estado como recebidos. O ensaio metalográfico permitiu uma análise da microestrutura bem como a obtenção do tamanho de grão. Já a difração de raios - X corroborou a microestrutura encontrada na metalografia.

Para realização da análise metalográfica as amostras foram preparadas seguindo o

procedimento convencional: corte em guilhotina, embutimento, lixamento, polimento, ataque com uso do reativo químico adequado.

Optou-se por realizar o embutimento à quente com o objetivo de ao final do processo, se obter um corpo de prova com a superfície mais plana. O embutimento foi feito utilizando-se uma prensa da marca *Arotec modelo Pre30Mi* utilizando como resina o baquelite.

As amostras foram lixadas empregando-se lixas de óxido de alumínio na seguinte sequência: #240, #320, #400 e #600. O lixamento foi realizado em uma lixadeira da marca *Struers*. O polimento foi conduzido em uma politriz da marca *Struers*, a sequência de panos utilizada foi a de 9 µm, 3µm e 1µm, tendo como agente abrasivo a pasta de diamante.

O ataque químico foi feito por imersão utilizando como reagente o Nital 5% (solução de ácido nítrico - HNO_3 - diluída em álcool - $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$). A amostra ficou imersa na solução por aproximadamente 5 minutos. A análise das amostras foi feita por microscopia óptica (MO) em um microscópio da marca *Fortel*, que pode ser visualizado na Figura 5.2. Para a caracterização do material no estado inicial foram utilizadas duas amostras de cada material.

Figura 5. 2 - Microscópio óptico Fortel



Fonte: Produzido pela autora

A difração de raios-x foi conduzida em um equipamento da marca Shimadzu, com

ângulo de varredura de 20° a 100° e passo de $0,02\text{ s}^{-1}$. Além do corte, não foi feito nenhum tipo de preparação na amostra referente ao estado inicial do material. O equipamento utilizado pode ser visualizado na Figura 5.3

Figura 5. 3 - Difratorômetro de raios x com destaque para o porta amostra



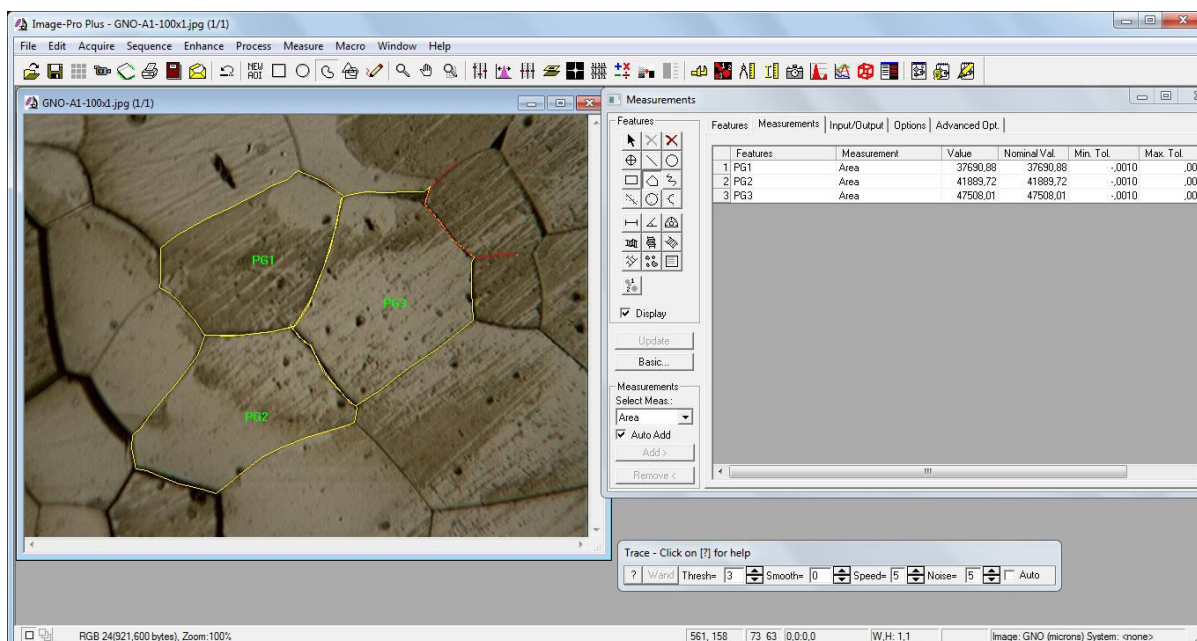
Fonte: Produzido pela autora

5.4. Tamanho de grão

Para determinação do tamanho de grão do aço GNO foi utilizado o software *Image-Pro Plus 6.0*. Foram feitas 200 medições a partir das fotomicrografias obtidas na metalografia. O diâmetro médio foi calculado em função da área de cada grão, como pode ser observado na Figura 5.4, que exemplifica o cálculo do tamanho médio do grão por meio do software. Após as 200 medições, a média das áreas foi calculada para em seguida encontrar o respectivo valor do diâmetro do tamanho de grão a partir do cálculo da raiz quadrada dessa média.

Após uma análise prévia verificou-se que não seria possível medir o tamanho de grão do aço GO por meio do software, uma vez que em única imagem não era possível visualizar um grão inteiro. Optou-se por avaliar o tamanho de grão por meio de uma comparação com base na norma ASTM E112.

Figura 5. 4 - Software utilizado para o cálculo do tamanho de grão



Fonte: Produzido pela autora.

O tamanho de grão ASTM (G), foi calculado por meio da Equação 5.1:

$$G = 1 + 3,3219 \log_{10} N_{AE} \quad (5.1)$$

Onde N_{AE} é o número de grãos por polegada quadrada em um aumento de 100x (FUCHS, 2008). O tamanho médio do grão foi obtido ao relacionar G com o diâmetro médio do grão, que pode ser observado na Tabela 5.3.

Tabela 5. 3 - Tamanho de grão (G) x Diâmetro médio correspondente

Número de Tamanho de Grão ASTM (G)	Diâmetro Médio (μm)
00	508,0
0	359,2
0,5	302,1
1,0	254,0
1,5	213,6
2,0	179,6
2,5	151,0
3,0	127,0
3,5	106,8
4,0	89,8

Fonte: ASTM, 1996 in FUCHS, 2008 (Adaptado).

5.5. Ensaio de dureza

O ensaio de dureza foi um dos testes utilizados para caracterizar mecanicamente os materiais. O ensaio foi conduzido em um microdurômetro da marca *Shimadzu* modelo *HMV 2T*, com penetrador Vickers. A carga utilizada foi de 0,2 kgf, aplicada durante 15s. Foram realizadas 10 medições em cada amostra de cada material. As amostras foram preparadas seguindo o procedimento de preparação metalográfica, a não ser pelo ataque químico. O equipamento utilizado no ensaio pode ser observado na Figura 5.5.

Figura 5. 5 - Microdurômetro utilizado no trabalho



Fonte: Produzido pela autora

5.6. Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina de ensaios universal da marca *Instron* modelo 5582, e extensômetro da mesma marca *Instron* modelo 2630-100, que são exibidos na Figura 5.6. O software utilizado para inserção dos parâmetros do ensaio e captura dos dados foi o *Blue Hill 2*. A velocidade de deslocamento do cabeçote superior foi de 4,5 mm/min, tendo um valor de taxa de deformação inicial igual a 0,001/s.

Para caracterizar os materiais mecanicamente foram realizados os ensaios de tração

até o rompimento do corpo de prova. O ensaio foi conduzido no material no estado como recebido, sendo feito com três repetições.

Foram realizados ensaios de tração com pré-deformação convencional de 0,015; 0,030; 0,045; 0,060; 0,080 e 0,110, também com três repetições e para os dois aços. Os valores de deformação foram escolhidos tendo como base o início do efeito casca de laranja, em torno de 0,030, e uma condição na qual esse efeito fosse observado de forma severa. Essa etapa é parte de uma das rotas de processamento escolhidas no trabalho que serão descritas posteriormente.

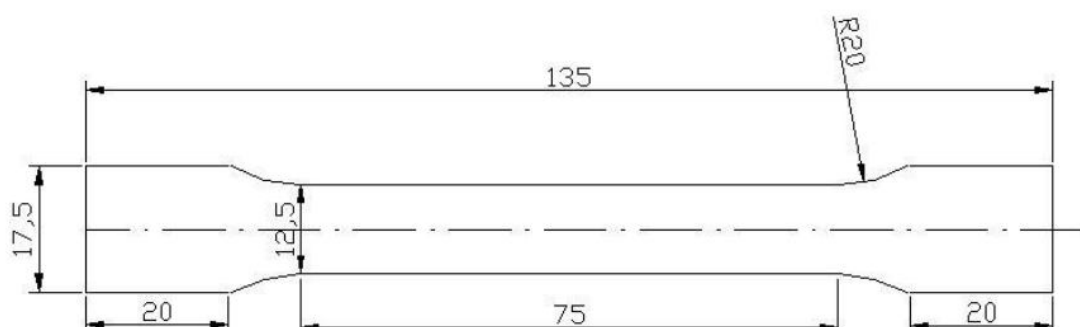
Figura 5. 6 - Máquina de ensaios universal Instron



Fonte: Produzido pela autora

Os corpos de prova foram preparados por eletroerosão de acordo com a norma ASTM E8, conforme pode ser verificado na Figura 5.7.

Figura 5. 7 - Esquema do corpo de prova utilizado no ensaio de tração

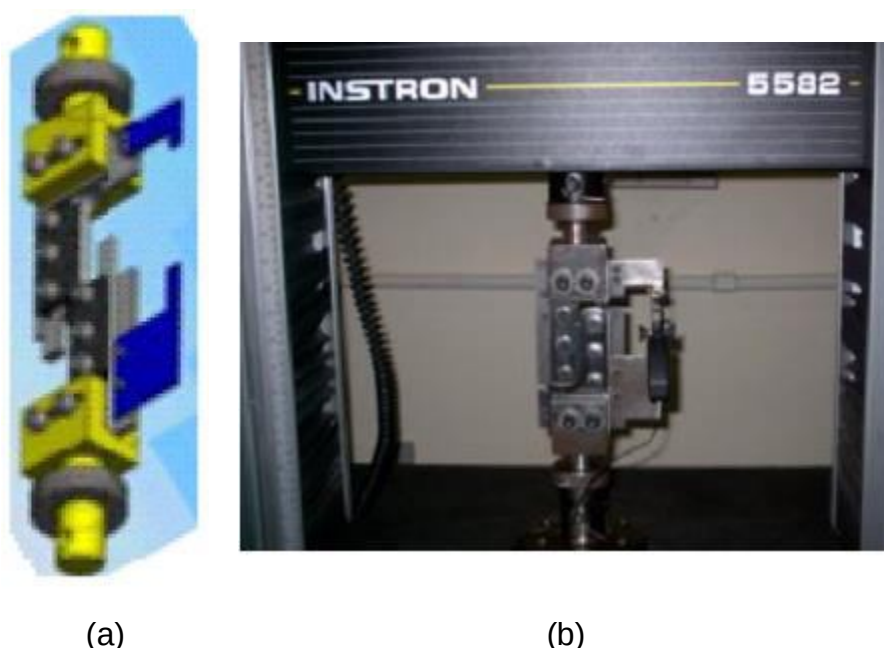


Fonte: Produzido pela autora

5.7. Ensaio de Cisalhamento

O ensaio de cisalhamento foi realizado utilizando os mesmo equipamentos que o ensaio de tração (máquina de ensaios universal *Instron* modelo 5582; extensômetro *Instron* modelo 2630-100; software *Blue Hill 2*), com um o uso de uma garra de cisalhamento ajustada à máquina universal de ensaios, que pode ser visualizada na Figura 5.8.

Figura 5. 8 - Máquina de ensaios universal no ensaio de cisalhamento



Esquema da garra (a) e a garra utilizada no ensaio

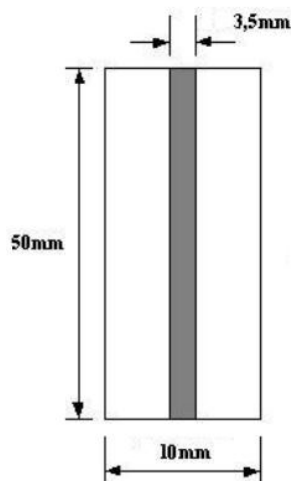
Fonte: LOPES, 2009

O ensaio de cisalhamento foi aplicado às amostras pré - deformadas em tração, sendo ainda realizado o cisalhamento cíclico, o qual consiste na combinação dos cisalhamentos direto e reverso. Os ensaios foram aplicados aos dois aços elétricos escolhidos para análise deste trabalho, sempre com três repetições para cada condição experimental.

O corpo de prova foi confeccionado por meio do corte das chapas em guilhotina Peck, Stow & Wilcox CO, com as seguintes dimensões: 10mm de largura total, 3,5mm de largura efetiva submetida ao cisalhamento e 50mm de comprimento. Um

esquema que representa o corpo de prova pode ser visualizado na Figura 5.9.

Figura 5. 9 - Esquema do corpo de prova utilizado no ensaio de cisalhamento



Fonte: LOPES, 2009 (Adaptado)

A partir do ensaio de tração, os corpos de prova foram cisalhados de modo direto até 0,60 de deformação convencional. Já no cisalhamento cíclico os corpos de prova, foram cisalhados de modo direto em 0,015, 0,045 e 0,080 de deformação convencional, seguido por um cisalhamento de modo reverso de 0,60 de deformação convencional.

5.8. Rotas de processamento

5.8.1. Tração/Cisalhamento

Os materiais foram pré-deformados em tração de 0,015; 0,030; 0,045; 0,060; 0,080 e 0,110 de deformação convencional com posterior cisalhamento em modo direto até 0,60 de deformação convencional para avaliar o efeito da quantidade de deformação na reposta magnética exibida pelos aços elétricos.

Para essa rota os corpos de prova de cisalhamento foram retirados após o corte com uso de uma guilhotina dos corpos de prova de tração na região do comprimento útil com o formato descrito no item 5.7.

5.8.2. Cisalhamento cíclico

Os aços GO e GNO foram cisalhados de modo direto até 0,015; 0,045; e 0,080 de deformação convencional e em seguida, deformado por cisalhamento reverso (semelhante à condução de um ensaio de compressão) até 0,60 de deformação convencional para também avaliar as respostas magnéticas apresentadas pelos dois materiais.

5.9. Ensaio Barkhausen

O equipamento utilizado no ensaio Barkhausen foi o Rollscan 300 da marca *Stresstech*. O software utilizado para a aquisição de dados e para o cálculo das propriedades magnéticas foi o Microscan 600, também da marca *Stresstech*. O equipamento em conjunto com o aparato que contém a sonda utilizada pode ser observado na Figura 5.10.

Figura 5. 10 - Rollscan 300



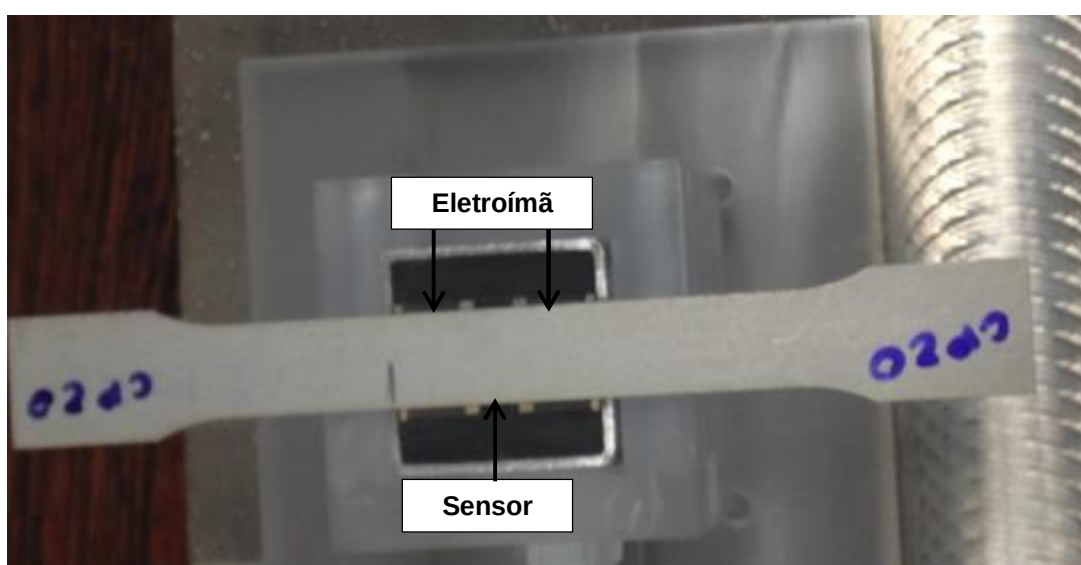
Fonte: (Produzido pela autora)

Os corpos de provas foram os mesmos confeccionados para o ensaio de tração e de cisalhamento. O ruído Barkhausen foi medido antes da realização dos ensaios de

tração e, no caso da rota de cisalhamento cíclico, antes do ensaio de cisalhamento direto e após a condução do ensaio de cisalhamento reverso. As medições foram realizadas dessa maneira para verificar de que forma cada etapa das rotas modificou as propriedades magnéticas dos aços GO e GNO.

Os corpos de prova foram posicionados com a direção de laminação paralela à direção do campo magnético aplicado pela sonda e de forma que a região central ficasse em contato com o polos do eletroímã emissor do campo magnético e o sensor de detecção do ruído, conforme Figura 5.11.

Figura 5. 11 - Posicionamento do cp na sonda



Fonte: (Produzido pela autora)

Inicialmente foram testados vários valores de tensão de excitação e frequência de excitação do campo magnético, a fim de definir quais os parâmetros mais adequados ao material. Esses valores foram testados aleatoriamente por não se ter um conhecimento prévio do comportamento desses materiais quando avaliados por essa técnica. Para a tensão optou-se por utilizar 0,1V, 0,9V e 1,7V e para a frequência de teste 6Hz, 7Hz, 8Hz e 9Hz. Após a seleção da tensão e da frequência, esses valores foram então inseridos no equipamento e no software do instrumento.

Além desses dois parâmetros foram definidos no software outros valores como: a faixa de captação do ruído magnético e a corrente elétrica. Nesse experimento

utilizou-se uma faixa de 70 kHz a 200 kHz, captação superficial de 8 kHz a 200 kHz, com captação em todo o corpo de prova. A corrente elétrica que foi utilizada nos ensaios foi igual a 2,0 A.

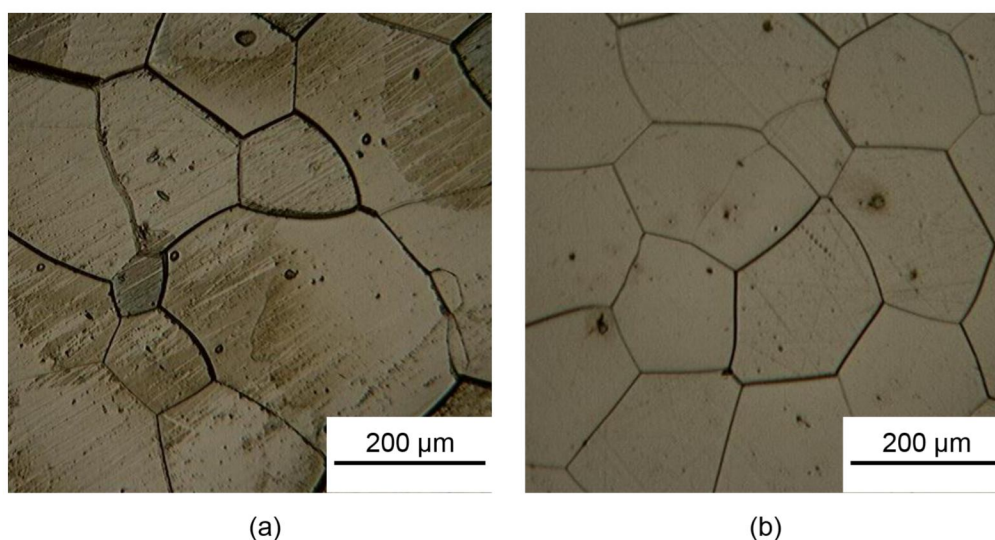
Para análise preliminar dos resultados, optou-se por utilizar o valor RMS, PEAK e PEAKPOS, todos calculados pelo software.

6. RESULTADO E DISCUSSÃO

6.1. Caracterização microestrutural

As fotomicrografias do aço GNO como recebido são exibidas na Figura 6.1, sendo a Figura 6.1a correspondente à amostra 1 e a Figura 6.1b correspondente à amostra 2. Nas imagens pode-se observar apenas um tipo de constituinte, a ferrita. Nota-se a presença de riscos de coloração mais escura na imagem 6.1(a), isso ocorre devido à facilidade que o material tem em oxidar.

Figura 6. 1 - Microestrutura do aço GNO como recebido



Amostra 1 (a) e amostra (2).

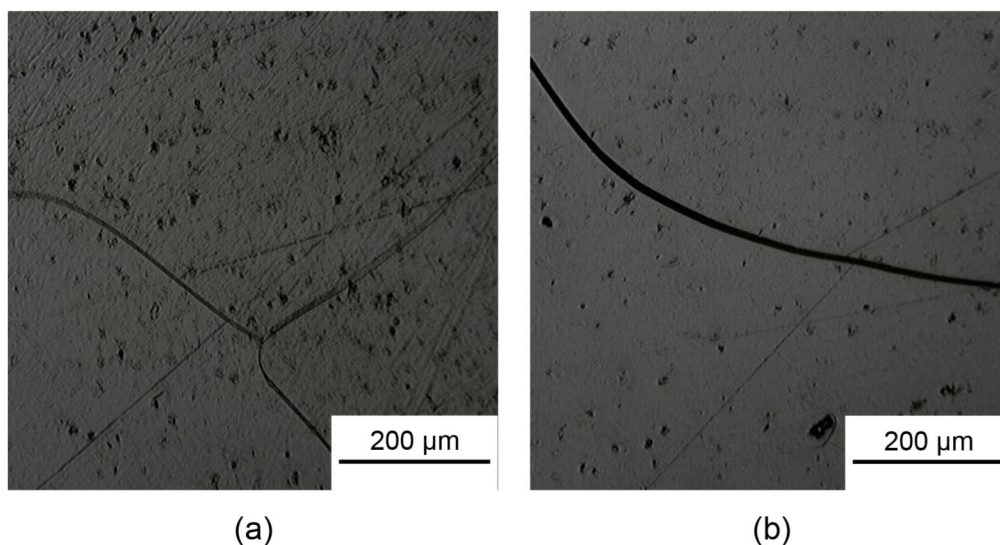
Fonte: (Produzido pela autora)

Na Figura 6.2 podemos observar as fotomicrografias do aço GO no estado inicial. Como ocorreu no aço GNO, somente um constituinte é observado, a ferrita, característica desse material. Por apresentar usualmente um tamanho de grão na faixa dos milímetros não foi possível observar toda a extensão de um grão na imagem, somente seu contorno. A Figura 6.2a é relativa a primeira amostra e a Figura 6.2b a segunda amostra.

Na Figura 6.3 pode ser observado o difratograma do aço GNO como recebido. Podem ser observados picos característicos da ferrita (F) nos seguintes ângulos:

45°, 65°, 82° e 98°. Os picos referentes à ferrita corroboram a caracterização microestrutural, que indicou que o material possui como microestrutura a ferrita. Já o pico localizado próximo ao ângulo de 40°, não está relacionado à microestrutura esperada para esse material. Supõe-se que ele esteja relacionado a alguma impureza ou a algum precipitado.

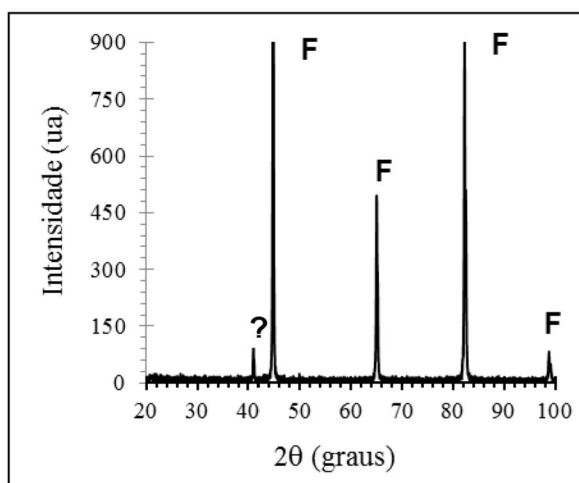
Figura 6. 2 - Microestrutura do aço GO como recebido



Amostra 1 (a) e amostra 2 (b)

Fonte: Produzido pela autora

Figura 6. 3 - Difratoograma do aço GNO como recebido

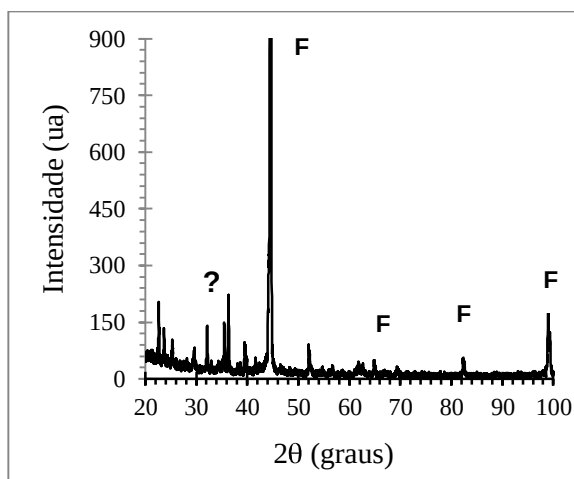


Fonte: Produzido pela autora

Na Figura 6.4 pode-se observar o difratograma do aço GO no estado inicial, como

recebido. Os picos observados, nos ângulos 45° , 65° , 82° e 98° , são característicos da ferrita (F), o que confirma a microestrutura encontrada na metalografia. Já os picos encontrados antes de 45° supõem - se que estejam associados a possíveis impurezas ou mesmo a precipitados.

Figura 6. 4 - Difratoograma do aço GO como recebido



Fonte: Produzido pela autora

6.2. Tamanho de grão

Como pode ser verificado na Tabela 6.1, o valor do diâmetro médio encontrado para o aço GNO, foi de $131,28 \mu\text{m}$. Esse resultado está próximo ao valor do diâmetro médio ideal, que é de $150 \mu\text{m}$ (CESAR, 2012), indicando um material sujeito a menores perdas magnéticas totais.

Tabela 6. 1 - Tamanho de grão do aço GNO como recebido

Média das áreas	Desvio padrão da área	Tamanho de grão (μm)
grãos 17233,68	16505,76	131,28

Fonte: (Produzido pela autora)

Para o aço GO, como citado, não foi possível observar um grão inteiro em uma única imagem. Logo para efetuar o cálculo, foram considerados dois valores N_{AE} : 0 e 1,

estando o tamanho de grão compreendido entre os diâmetros médios associados a esses valores.

O tamanho de grão ASTM associado ao N_{AE} 1, foi o “1”, sendo o diâmetro médio correspondente de 254 μm . O TG relacionado ao N_{AE} 0 foi “0” sendo 359,2 μm o diâmetro correspondente a esse valor. Pode-se dizer que o tamanho médio de grão da amostra estaria entre 254 μm e 359,2 μm , valores considerados ideais para a otimização das perdas magnéticas (CESAR, 2012).

6.3. Dureza

Na Tabela 6.2 são exibidos os resultados de microdureza Vickers dos aços GNO e GO no estado como recebido. A dureza média encontrada para o GNO foi 198,1 HV o que está próximo do esperado para aços da mesma família (APERAM), como pode ser observado na Tabela 6.3., o que indica que a condição de fornecimento do material condiz com o informado pelo fabricante.

Tabela 6. 2 - Microdureza Vickers dos aços elétricos

GNO		GO	
Medições	Dureza (HV)	Medições	Dureza (HV)
1	195	1	235
2	195	2	226
3	206	3	237
4	210	4	234
5	200	5	234
6	190	6	223
7	197	7	235
8	194	8	233
9	200	9	220
10	194	10	236
Média	198,1	Média	231,3
Desvio	6,1	Desvio	6,0

Fonte: Produzido pela autora.

Aços de grão orientado têm uma dureza média de 172 HV, como pode ser verificado na Tabela 6.3 que apresenta dados do fabricante. O valor de dureza médio obtido foi

de 231,3 HV o que estaria acima do valor de dureza de outros aços da mesma família.

Tabela 6. 3 - Dureza de outros aços elétricos

	Aço	Dureza (HV)
GNO	E137	183
GO	E004-7	172

Fonte:APERAM

6.4. Ensaaios de tração

6.4.1. Tração até a ruptura

Na Tabela 6.4 são expressos os valores das propriedades mecânicas calculadas para os três corpos de prova do aço GNO, limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), alongamento uniforme (AU) e expoente de encruamento (n).

Tabela 6. 4 - Propriedades mecânicas do aço GNO como recebido

		LE (MPa)	LR (MPa)	AU (%)	n
Medições	1	380	486,01	14,19	0,10
	2	382	488,09	12,03	0,12
	3	384	488,26	12,2	0,12
	Média	382	487,45	12,81	0,11
	Desvio	2	1,25	1,201	0,0091

Fonte: Produzido pela autora.

Os valores das propriedades mecânicas informados no catálogo do fabricante para aços semelhantes aos GNO e GO podem ser verificados na Tabela 6.5. O limite de escoamento e resistência encontrados no ensaio são superiores aos aços do catálogo, já com o alongamento uniforme ocorre o contrário, sendo este menor do que o valor do catálogo. Apesar dessa diferença pode - se considerar que as

propriedades estão dentro dos materiais utilizados no trabalho estão próximas ao esperado.

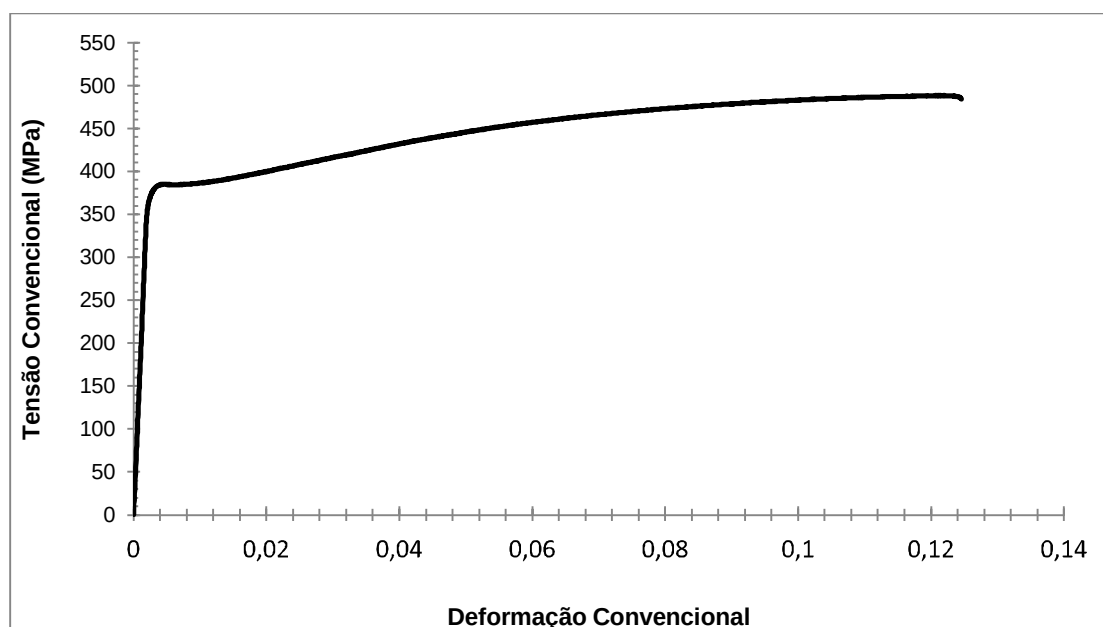
Tabela 6. 5 - Propriedades mecânicas de outros aços elétricos

	Aço	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento uniforme (%)
GNO	E137	354	463	23
GO	E004-7	323	356	17

Fonte: Aperam.

A determinação das propriedades mecânicas foi realizada a partir das curvas tensão deformação convencional. Na Figura 6.5 é exibida a curva relativa ao aço GNO, amostra 3.

Figura 6. 5 - Curva tensão X deformação do aço GNO como recebido



Fonte: Produzido pela autora

Na Tabela 6.6 são apresentados os valores para as propriedades mecânicas determinadas para o aço GO no seu estado inicial. Os valores também foram obtidos

através da curva convencional de tensão x deformação, que pode ser visualizada na Figura 6.6.

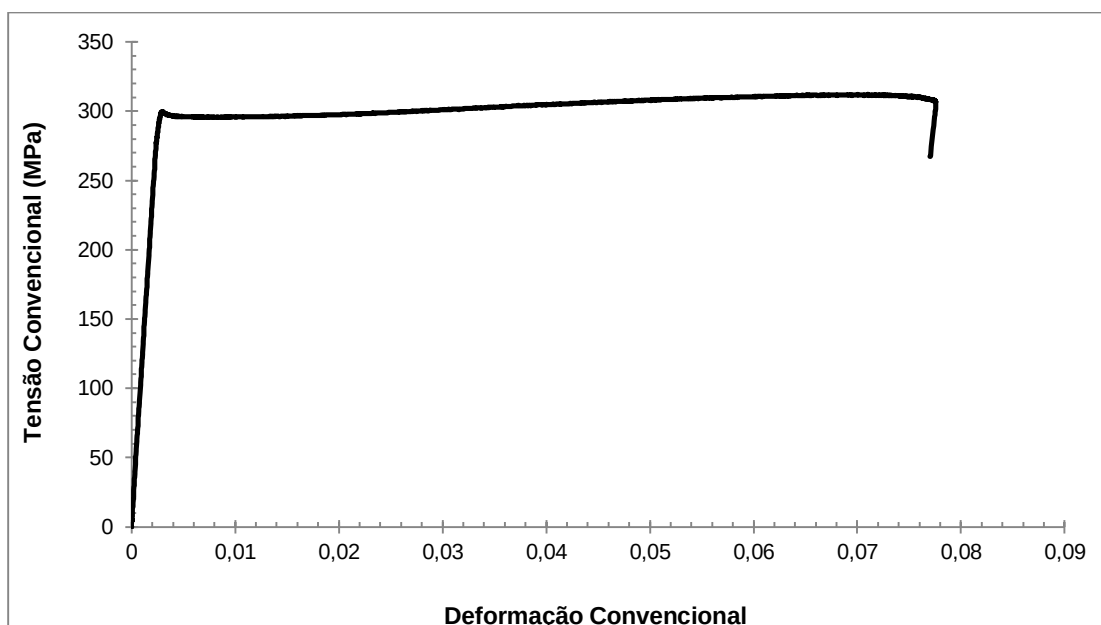
Tabela 6. 6 - Propriedades mecânicas do aço GO como recebido

		LE (MPa)	LR (MPa)	AU (%)	n
Medições	1	295	311,94	7,1	0,21
	2	291	316,92	8,05	0,26
	Média	293	314,43	7,57	0,24
	Desvio	2,83	3,52	0,67	0,04

Fonte: Produzido pela autora

No aço GO é observado que os valores de limite de escoamento e limite de resistência estão bem próximos aos valores apresentados na Tabela 6.5, diferindo apenas no alongamento uniforme.

Figura 6. 6 - Curva tensão X deformação do aço GO como recebido



Fonte: Produzido pela autora

6.8.2. Tração variando a quantidade de deformação

Inicialmente foram escolhidos os seguintes valores de deformação convencional, 3%, 6% e 11%, com base no início da formação do efeito “casca de laranja”, e com deformações consideradas extremas a esse defeito superficial. Após a análise

preliminar dos resultados do ensaio Barkhausen as outras condições foram consideradas.

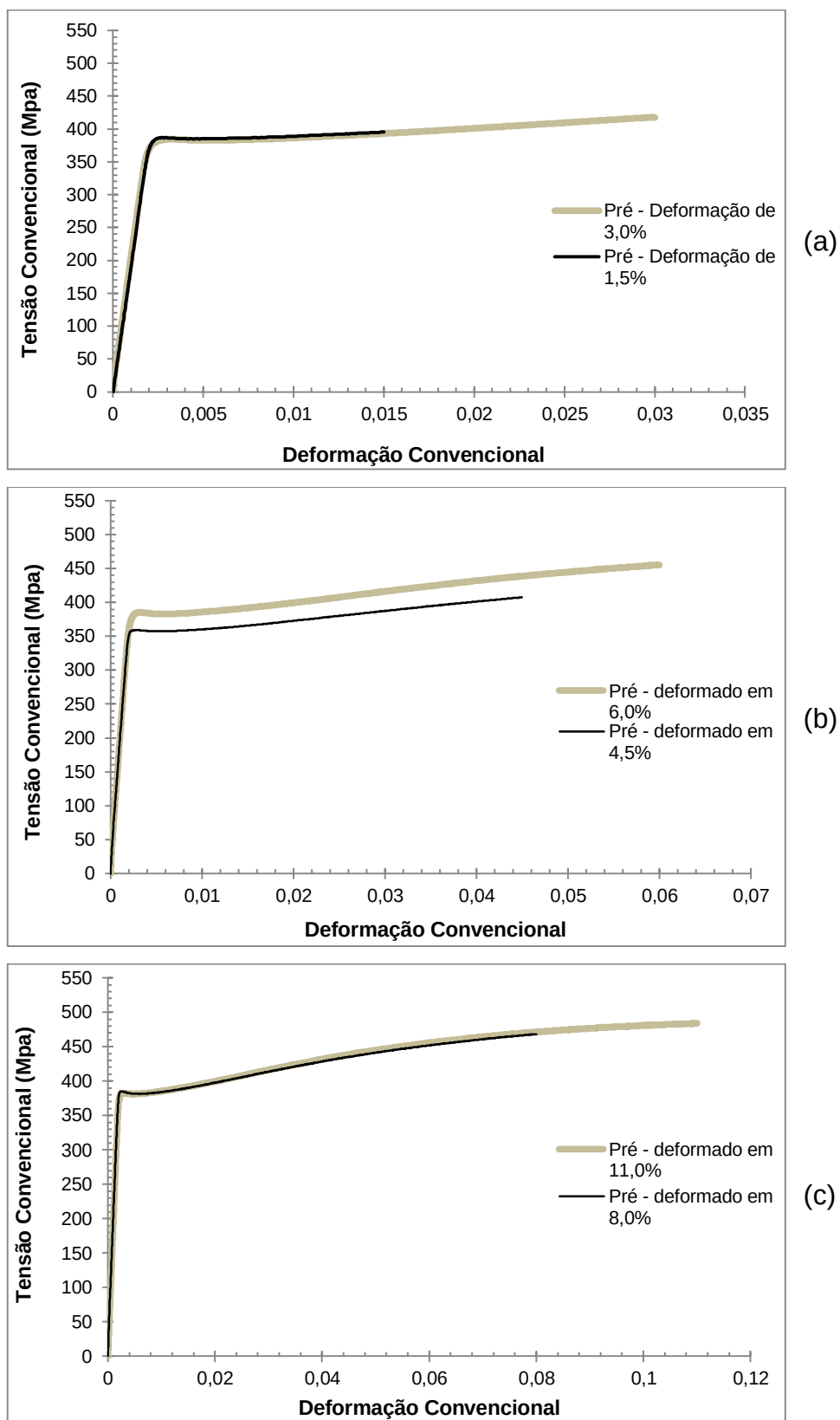
Como forma de caracterizar a resistência mecânica após a pré - deformação em tração dos aços GO e GNO optou-se por calcular o valor de tensão convencional no qual a deformação máxima ocorre em cada condição. Na Tabela 6.7 são apresentados os valores de tensão de fluxo, que são os valores de tensão na deformação máxima em todas as pré - deformações em tração para o aço GNO. Na Figura 6.6 foram apresentados os gráficos tensão x deformação para o aço GNO em todas as condições, sendo expressos de duas em duas condições.

Tabela 6. 7 - Propriedades mecânicas do GNO pré - deformado em diferentes magnitudes

Deformação		Tensão de fluxo (MPa)
1,5%	Média	391,96
	Desvio	6,05
3,0%	Média	412,75
	Desvio	7,45
4,5%	Média	424,8
	Desvio	15,93
6,0%	Média	452,92
	Desvio	6,55
8,0%	Média	471,22
	Desvio	2,59
11,0%	Média	479,48
	Desvio	10,57

Fonte: Produzido pela autora

Figura 6. 7 - Curvas tensão X deformação do aço GNO deformado em diferentes magnitudes



Deformação de 1,5% e 3,0% (a); 4,5% e 6,0%(b); 8,0% e 11,0% (c).

Fonte: Produzido pela autora

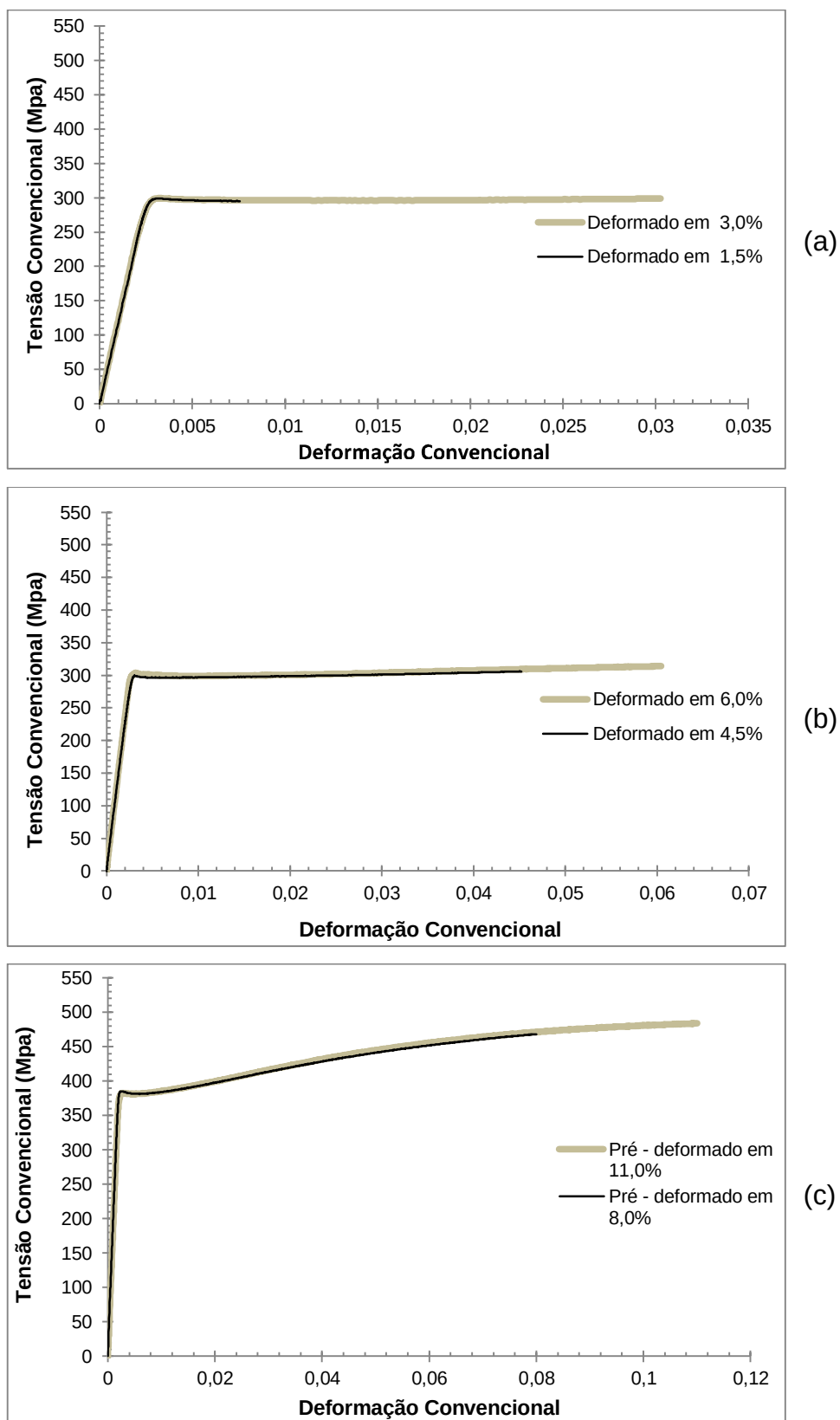
Na Tabela 6.8 são apresentados valores de tensão de fluxo, para o aço GO em todas as pré - deformações em tração utilizadas no trabalho. As curvas tensão x deformação utilizadas para a realização do cálculo das propriedades são apresentadas na Figura 6.7.

Tabela 6. 8 - Propriedades mecânicas do GO pré - deformado em diferentes magnitudes

Deformação		Tensão de fluxo (MPa)
1,5%	Média	296,74
	Désvio	3,30
3,0%	Média	299,05
	Désvio	0,38
4,5%	Média	304,70
	Désvio	1,73
6,0%	Média	311,57
	Désvio	3,62
8,0%	Média	296,53
	Désvio	23,28
11,0%	Média	278,65
	Désvio	54,13

Fonte: Produzido pela autora.

Figura 6. 8 - Curvas tensão X deformação do aço GO deformado em diferentes magnitudes



Deformação de 1,5% e 3,0% (a); 4,5% e 6,0%(b); 8,0% e 11,0% (c)

Fonte: Produzido pela autora

6.5. Ensaio Barkhausen

6.5.1. Análise preliminar

Após uma análise inicial do aumento percentual entre o valor RMS do ruído Barkhausen inicial e após a deformação em tração no aço GNO, optou-se por escolher uma condição em que esse valor apresentasse maior diferença. Na Tabela 6.9 pode-se observar o aumento percentual de duas das condições em que a modificação do ruído foi menor, 0,1V de tensão nas frequências 6 Hz e 7 Hz, e na condição escolhida 0,9 V e 9 Hz.

Tabela 6. 9 - Aumento percentual entre o RMS antes e após a deformação em tração

Tensão (V)	0,1		0,9
Frequência (Hz)	6	7	9
Deformação (%)	Aumento do valor RMS (%)		
1,5	55,10	55,10	79,30
3,0	131,35	79,59	79,12
4,5	53,07	53,13	76,07
6,0	71,49	48,53	81,70
11,0	71,68	40,59	85,73

Fonte: Produzido pela autora

Na Figura 6.9 é exibido o gráficos do valor RMS para uma condição considerada não ideal, onde se pode observar um pequeno aumento entre o estado inicial e após deformado quando comparado ao gráfico do valor RMS da condição escolhida observado na Figura 6.10.

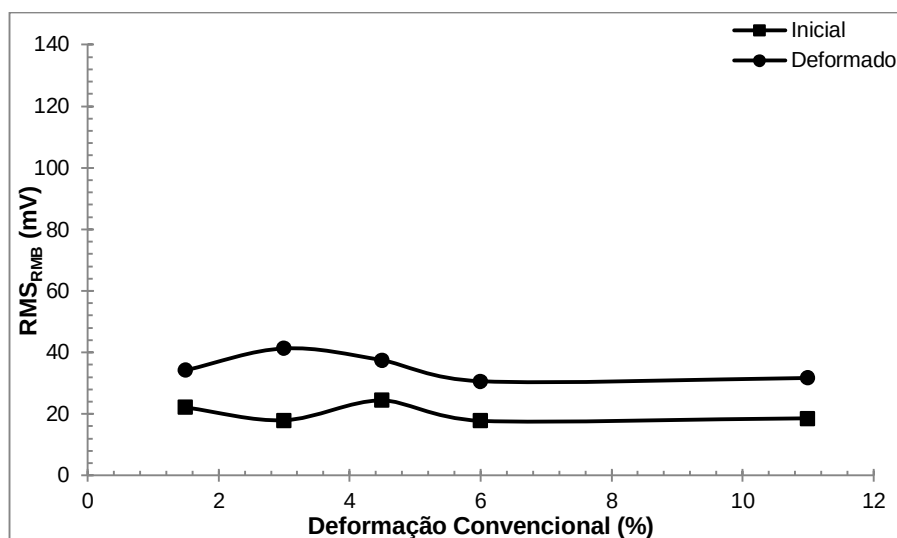
6.5.2. Efeito da quantidade de deformação na resposta magnética

6.5.2.1 Rota Tração / Cisalhamento

Pode - se observar na Figura 6.11 um gráfico do valor RMS em função da

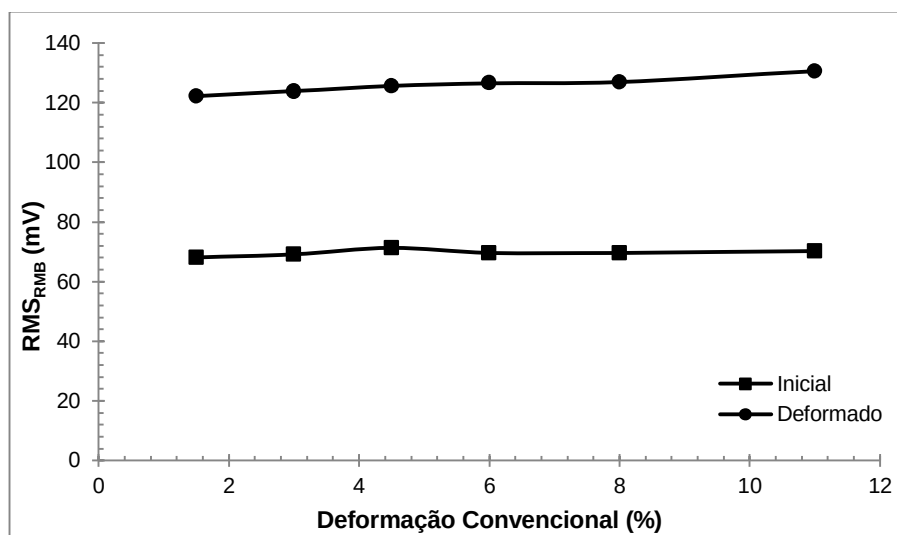
quantidade de deformação convencional para o aço GNO, e na Figura 6.12 para o aço GO. A primeira coluna “Inicial” é relativa ao valor antes da pré - deformação em tração, a coluna “Tração” é o valor obtido após a pré - deformação, já a terceira coluna, “Cisalhamento”, corresponde ao valor RMS após o cisalhamento em modo direto.

Figura 6. 9 - Valor RMS em função da quantidade de deformação – (0,1V / 6Hz)



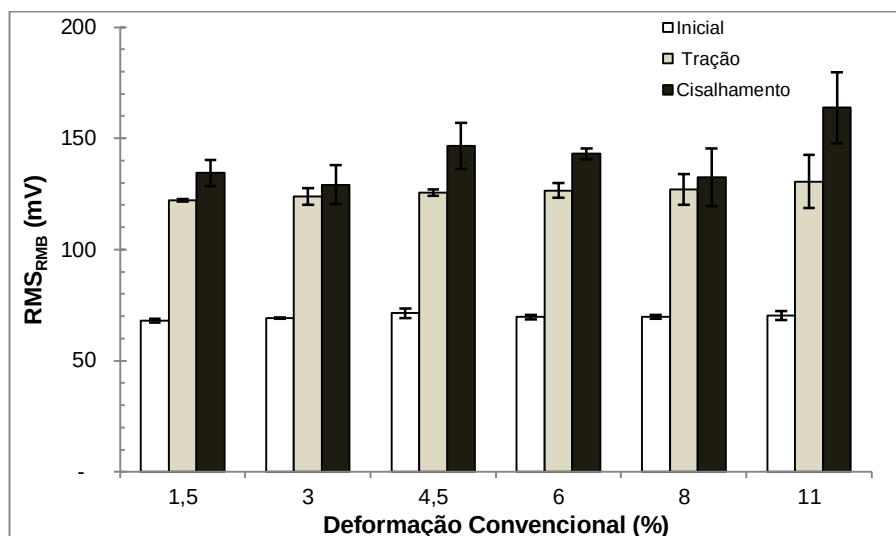
Fonte: Produzido pela autora.

Figura 6. 10 - Valor RMS em função da quantidade de deformação – (0,9V / 9Hz)



Fonte: Produzido pela autora

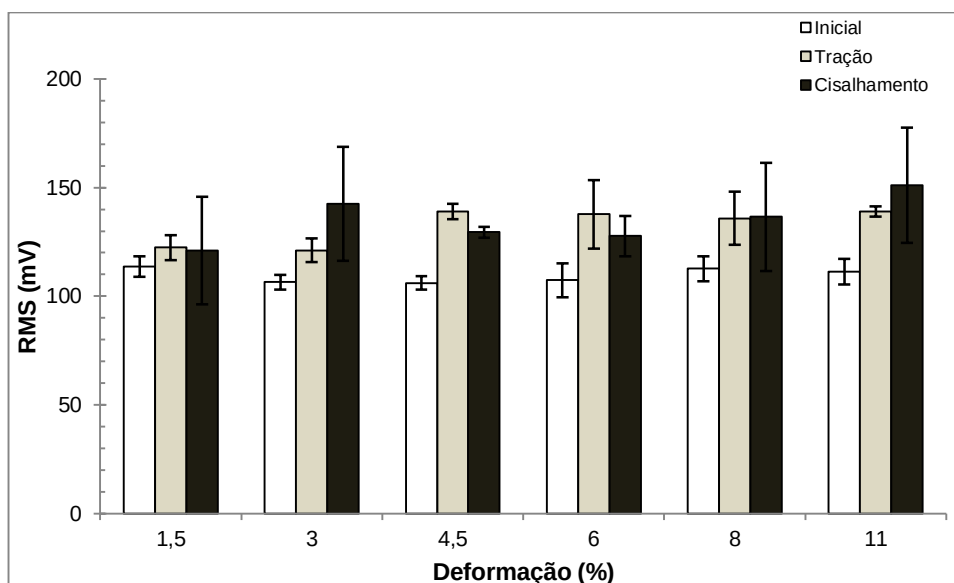
Figura 6. 11 - Rota Tração / Cisalhamento aço GNO



Fonte: Produzido pela autora

O valor RMS inicial apresenta variações muito pequenas com a elevação da deformação convencional, sendo considerado o mesmo para todas as amostras analisadas, o que indica uma uniformidade do material quanto às propriedades magnéticas. Após a pré - deformação em tração e após o cisalhamento direto o valor RMS aumenta, indicando um decaimento das propriedades magnéticas dos materiais. Essa elevação do valor RMS é observada para os dois materiais porém em menor magnitude para o aço GO.

Figura 6. 12 - Rota Tração / Cisalhamento aço GO



Fonte: Produzido pela autora

No aço GNO o aumento da quantidade de pré - deformação em tração não leva a um aumento significativo do valor RMS do ruído. Entretanto atribui - se o aumento do sinal após o cisalhamento ao aumento da quantidade de pré - deformação, uma vez que todos os corpos de prova foram cisalhados de modo direto em 0,60. Quanto maior a quantidade de pré – deformação maior será o valor RMS do ruído após o cisalhamento.

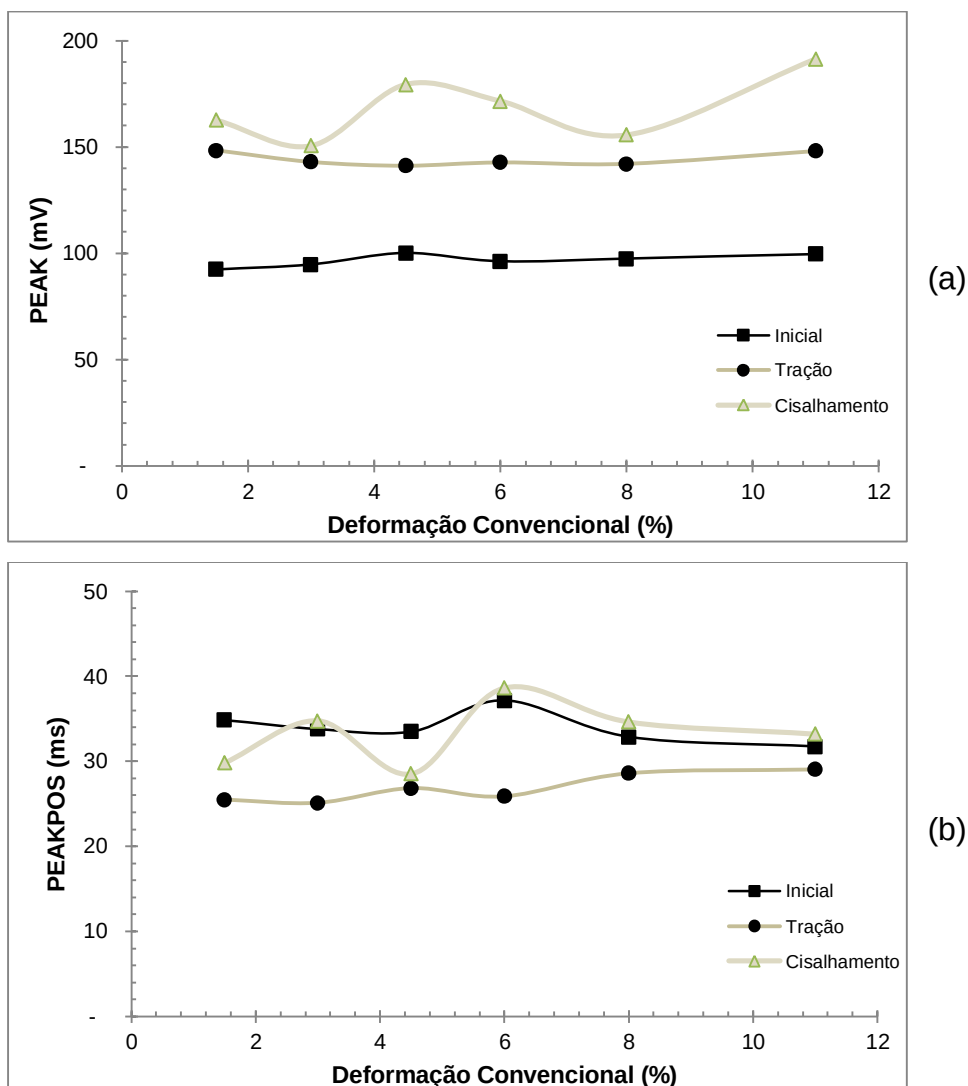
A elevação do ruído conforme a quantidade de deformação aumenta está associada à ampliação da densidade discordâncias. As discordâncias formam sítios de aprisionamento que dificultam os saltos Barkhausen. Na etapa do processamento relativo à tração pode – se inferir que o aumento da quantidade de discordâncias não trouxe grandes alterações no sinal.

Para o GO a pré – deformação também não levou a aumentos significativos no valor do ruído acarretando comportamentos distintos no valor RMS obtido após a etapa de cisalhamento. Nas pré - deformações de 1,5%, 4,5%, 6,0% o ruído após o cisalhamento foi reduzido e nas outras condições o ruído apresentou um leve aumento.

Pode - se explicar a redução do ruído pela presença de tensões compressivas no material decorrente da combinação dos modos de deformação. Com o aumento da quantidade de paredes de domínio de 180° e ativação de outros domínios, os saltos Barkhausen ocorrem em maior quantidade porém em menor intensidade, diminuindo o valor do ruído. Ou pode estar relacionado ao aniquilamento de discordâncias causado pelo cisalhamento direto. Uma vez que se reduzem os sítios de aprisionamento, o ruído também é reduzido. As condições que levaram o sinal a aumentar podem ser explicadas da mesma maneira que no aço GNO.

A Figura 6.13 exhibe os gráficos PEAK e PEAKPOS em função da deformação convencional, para o aço GNO, e a Figura 6.14 para o aço GO. Vale salientar que o valor de pico dos corpos de prova sinalizados pela condição “Inicial”, não sofreu nenhuma deformação, estando alocados nesse gráfico apenas para comparação com as outras duas condições que foram submetidas à deformação.

Figura 6. 13 - Comparação entre valor de pico e posição de pico para o aço GNO

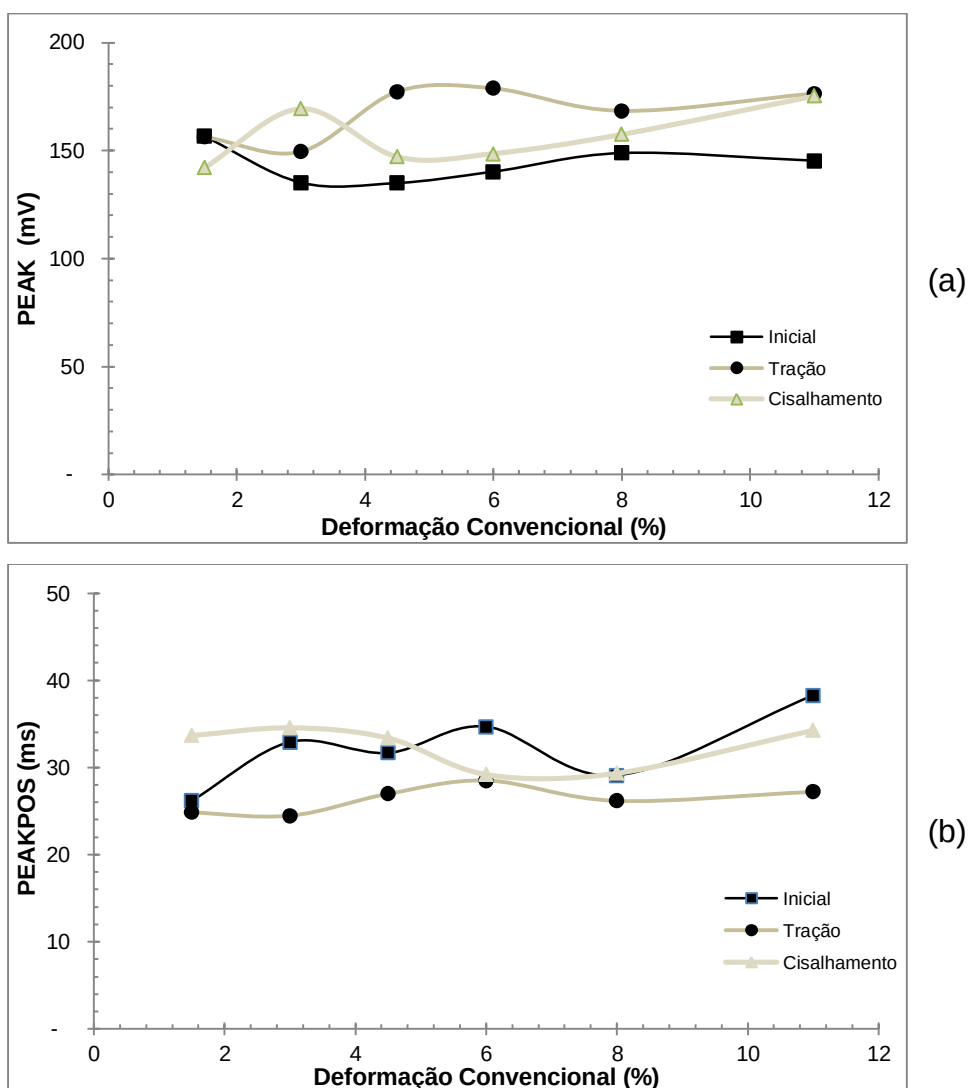


PEAK (a) e PEAKPOS (b)

Fonte: Produzido pela autora.

Nota-se, na Figura 6,13a, um aumento do valor de pico entre a condição inicial e as etapas de deformação, o que aponta que após deformação os saltos Barkhausen tiveram maior magnitude, o mesmo ocorrendo para o aço GO, como pode ser visualizado na Figura 6.14a. Na Figura 6.13b verifica-se que a posição do pico foi deslocada para cima, com exceção da posição de pico inicial, o indica maior dificuldade no avanço do movimento de paredes. Quanto a posição de pico o aço GO apresentou o mesmo comportamento, contudo em menor intensidade.

Figura 6. 14 - Comparação entre valor e posição de pico para o aço GO



PEAK (a) e PEAKPOS (b)

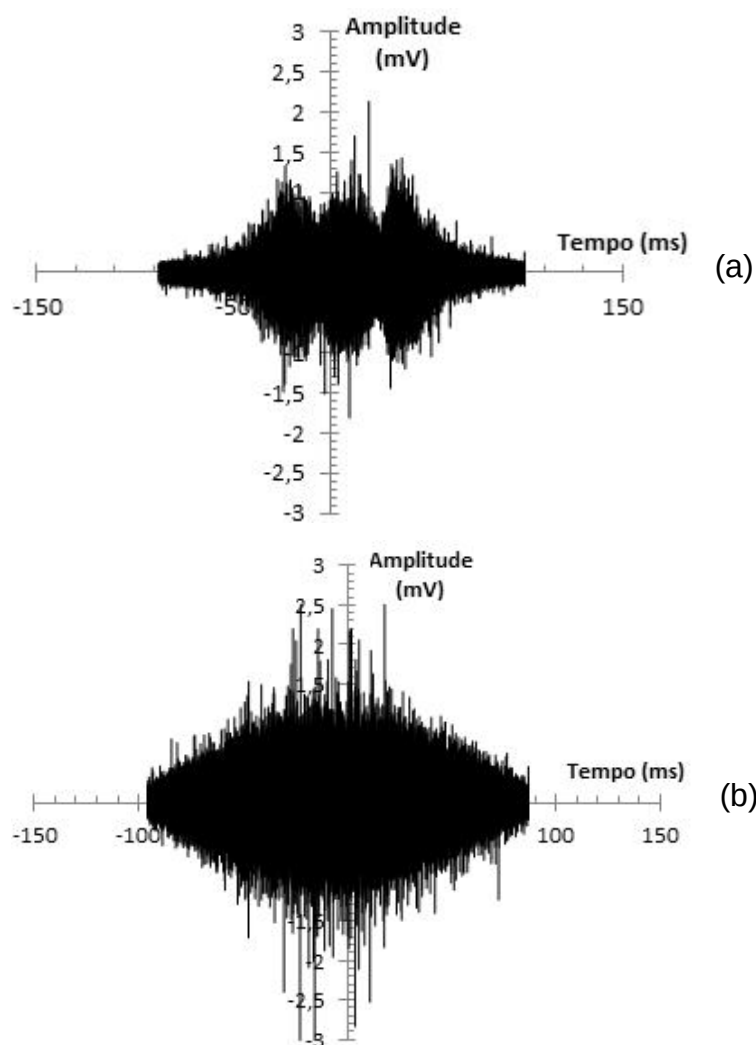
Fonte: Produzido pela autora

No estado inicial os aços GNO e GO apresentaram o envelope do ruído em dois ou três blocos, como pode ser observado na Figura 6.15. Dessa forma o valor de pico será o valor máximo encontrado entre esses blocos. Por esse motivo a posição de pico não está localizada no centro, na metade do envelope. Esse comportamento dos materiais quando submetido à magnetização só é observado na condição inicial.

O aumento dos valores e as mudanças nas posições de pico estão associados à microestrutura, podendo ser relacionados a um aumento da densidade de discordâncias no material, logo corroboram o valor RMS obtido no ensaio.

Na Figura 6.16 são observados gráficos do valor RMS para duas faixas frequências de aquisição de dados, a de 70 kHz a 200 kHz, e a 8 kHz a 200 kHz para o aço GNO. Para o aço GO esses gráficos podem ser observados na Figura 6.17.

Figura 6. 15 - Envelope do sinal



Aço GNO em seu estado inicial (a), após deformação (b)

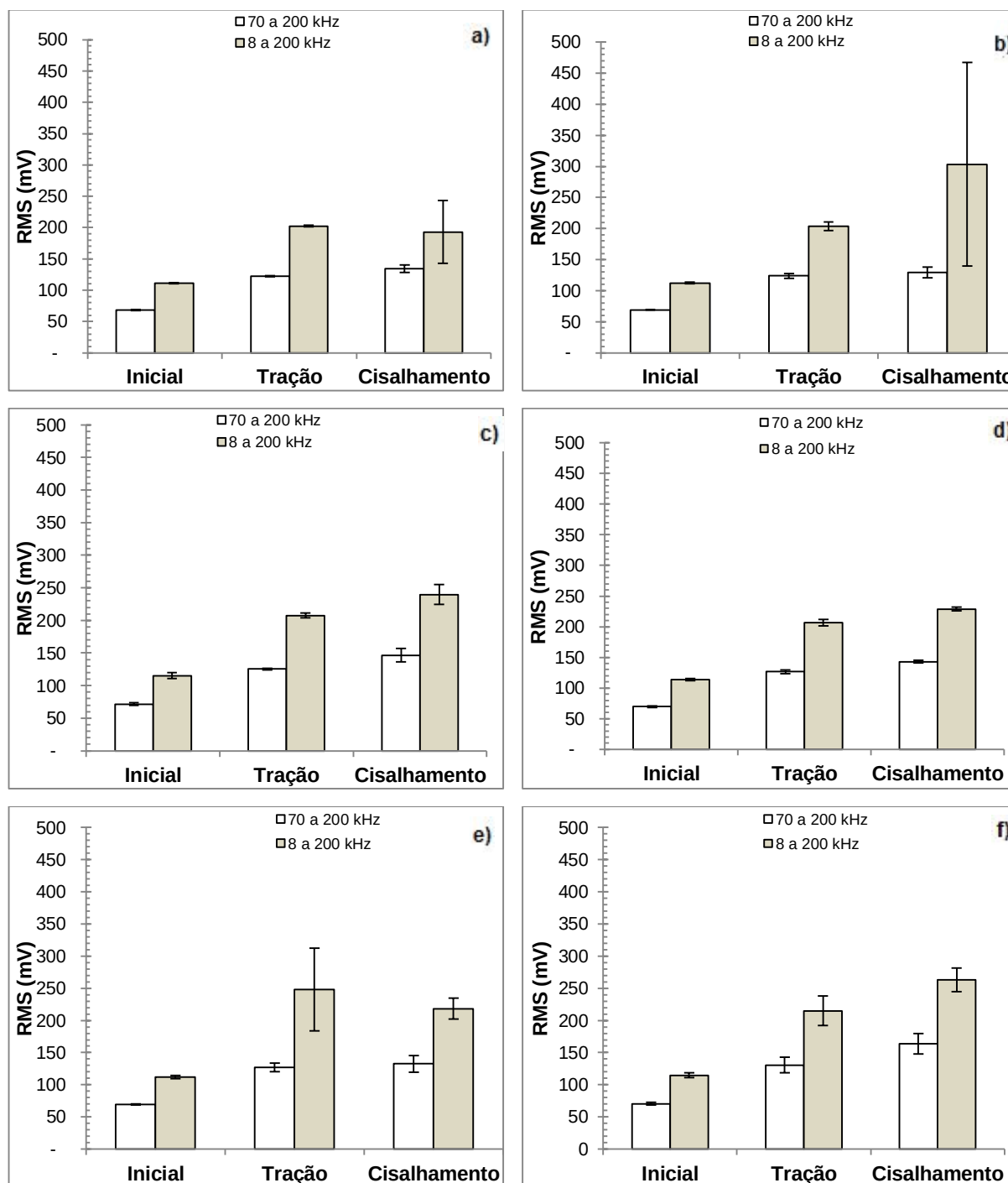
Fonte: Produzido pela autora

A primeira faixa de frequência 70 kHz a 200 kHz assegura uma aquisição de dados do RMB superficial enquanto a outra faixa de frequência permite uma aquisição de dados a uma profundidade maior, abrangendo todo o volume do corpo de prova.

Em todas as condições de deformação observa-se que houve um aumento do valor RMS quando a profundidade de aquisição dos dados do RMB aumentou. De

maneira geral houve uma elevação do valor RMS com a quantidade de deformação. Esse aumento está relacionado à elevação do volume material cujos dados são captados pelo equipamento.

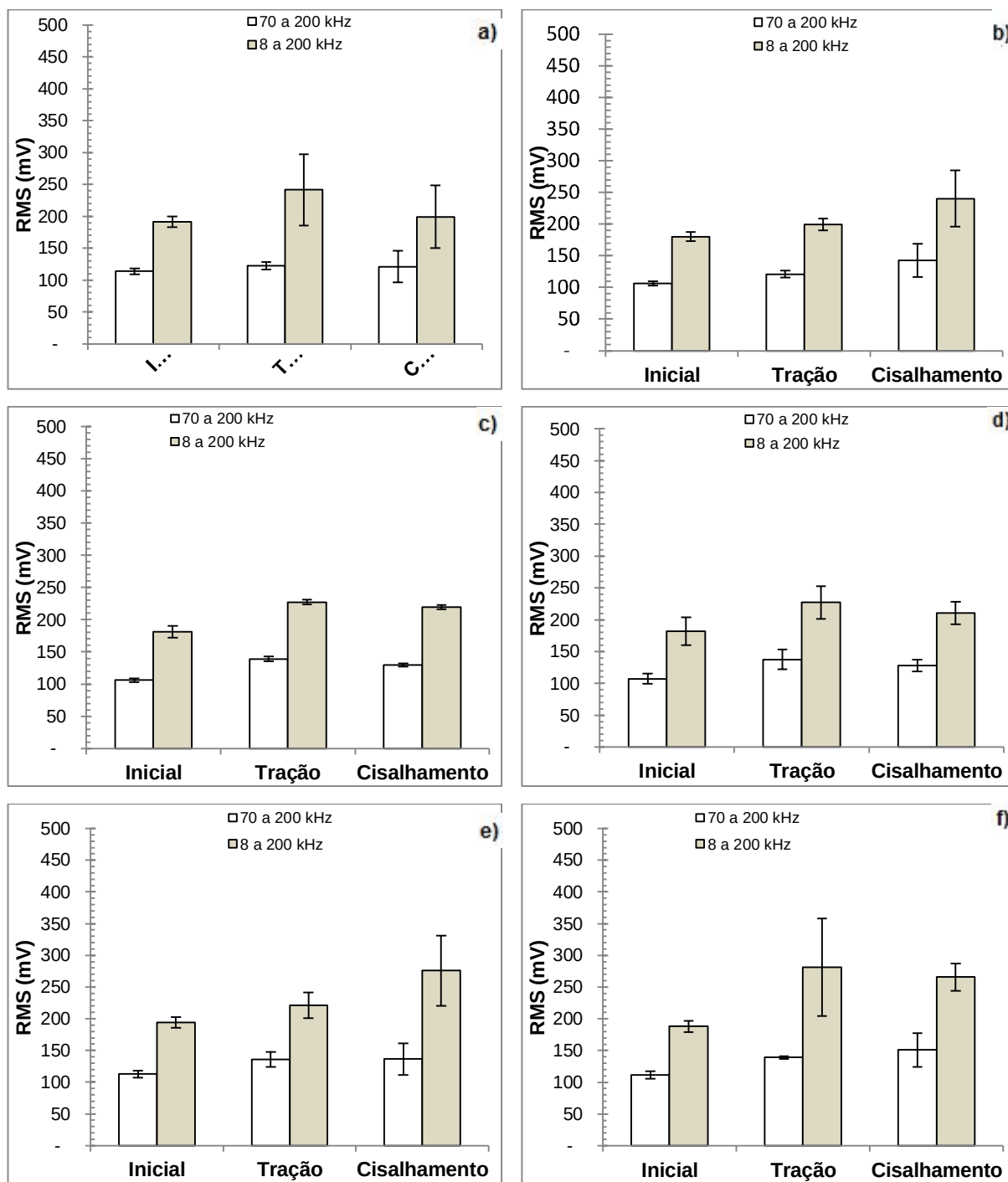
Figura 6. 16 - Valor RMS em diferentes profundidades de captação do ruído para o aço GNO



Deformado em 1,5% (a); 3,0% (b); 4,5% (c); 6,0% (d); 8,0% (e); 11,0% (f).

Fonte: Produzido pela autora

Figura 6. 17 - Valor RMS em diferentes profundidades de captação do ruído para o aço GO



Deformado em 1,5% (a); 3,0% (b); 4,5% (c); 6,0% (d); 8,0% (e); 11,0% (f).

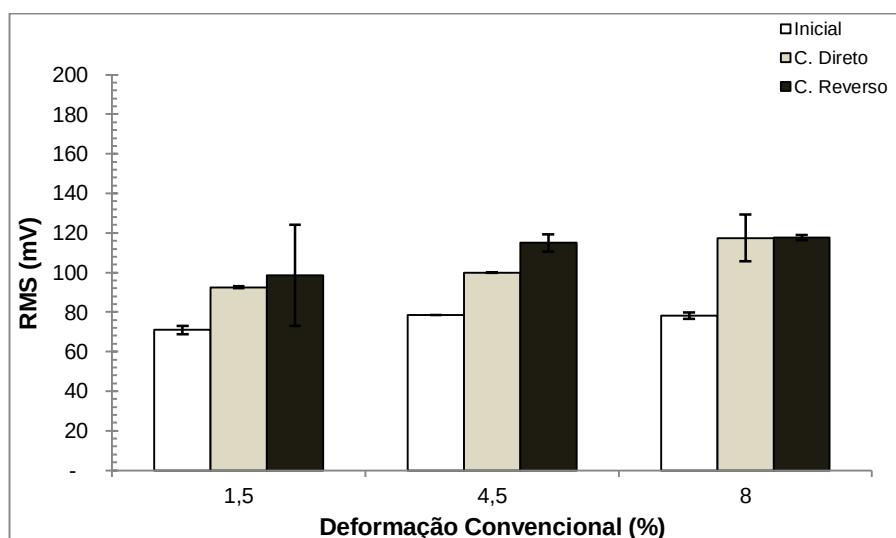
Fonte: Produzido pela autora

6.5.2.2 Rota Cisalhamento Cíclico

O gráfico RMS em função da quantidade de deformação convencional, para o aço

GNO, pode ser observado na Figura 6.18, para o aço GO, o mesmo gráfico é apresentado na Figura 6.19. A coluna “Inicial” corresponde ao valor RMS inicial para os corpos de prova que foram submetidos ao cisalhamento cíclico. A coluna “C.Direto” representa o valor RMS após o cisalhamento no modo direto e a última coluna “C.Reverso” está associada ao valor do ruído após o cisalhamento no modo reverso.

Figura 6. 18 - Rota Cisalhamento Cíclico aço GNO

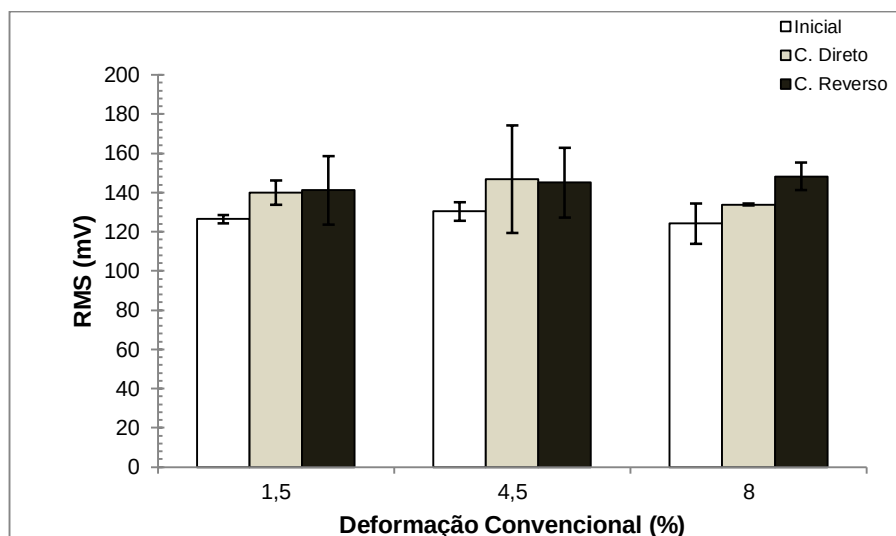


Fonte: Produzido pela autora

O valor RMS inicial pode ser considerado o mesmo para todas as condições de ensaio, nos dois materiais, uma vez que as variações constatadas foram muito pequenas. Após o cisalhamento direto e reverso, para todas as deformações, o valor do ruído foi aumentado, o que aponta para uma redução das propriedades magnéticas. Essa resposta magnética do material em presença de uma maior quantidade de deformação é observada para os dois materiais.

No aço GNO o aumento da quantidade de pré - deformação em cisalhamento direto apresentou uma maior contribuição no aumento do valor RMS do que o cisalhamento em modo reverso. Após o cisalhamento reverso o ruído aumentou porém em menor intensidade quando comparado à pré - deformação. O aço GO apresentou comportamento semelhante, tendo o valor RMS associado à parcela de pré - deformação a maior contribuição para o aumento do ruído.

Figura 6. 19 - Rota Cisalhamento Cíclico aço GO



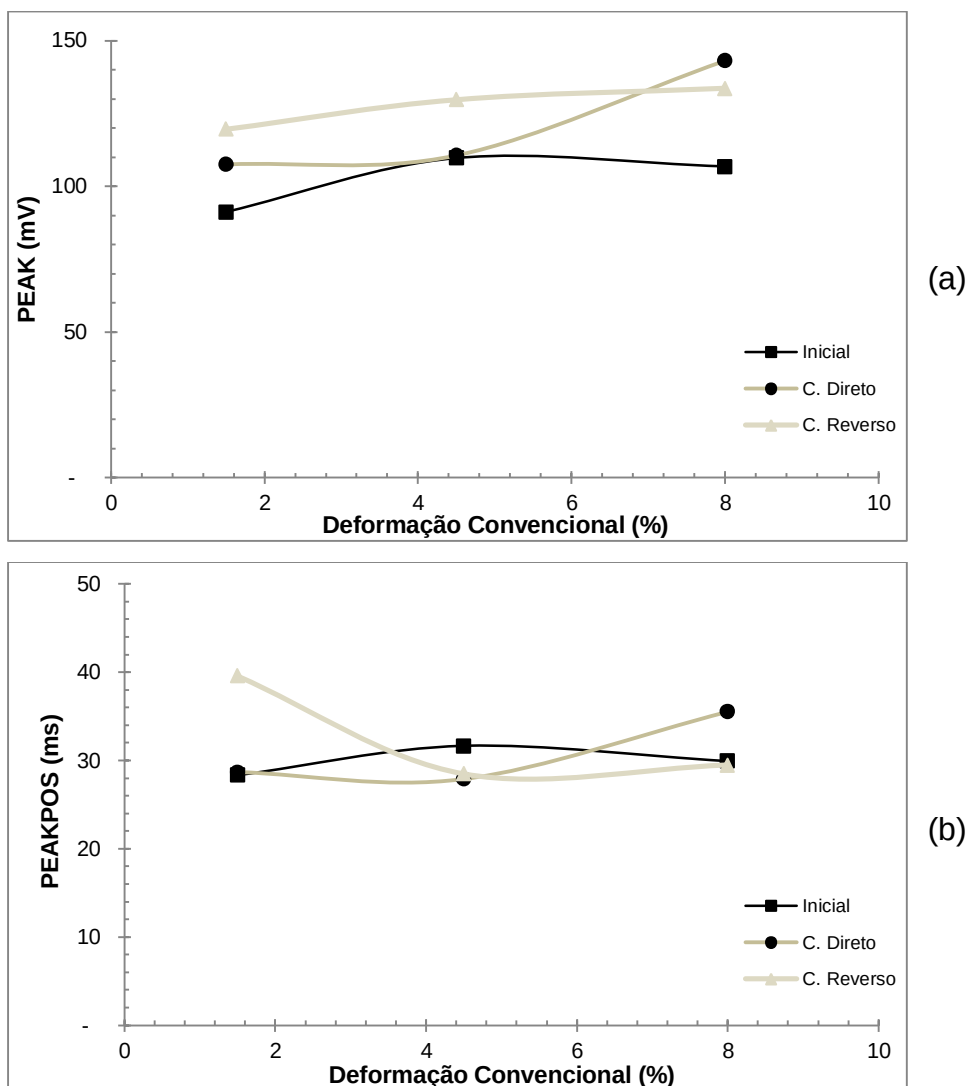
Fonte: Produzido pela autora

A elevação do ruído pode ser explicada pelo aumento da quantidade de discordâncias, em razão da deformação plástica imposta aos materiais. A criação de novos sítios de aprisionamento bem como a intensificação dos sítios já existentes nos materiais dificulta a orientação dos domínios na direção do campo magnético, o que degrada as propriedades magnéticas dos dois aços elétricos.

Na Figura 6.20 e Figura 6.21 podem ser observados gráficos PEAK e PEAKPOS para os aços GNO e GO respectivamente, em função da deformação convencional. Conforme a rota tração / cisalhamento na rota de cisalhamento cíclico a condição inicial não sofreu nenhuma deformação, estando presente no gráfico para facilitar a comparação com as etapas de deformação.

No gráfico exibido na Figura 6.20a verifica - se que o valor de pico foi maior conforme os corpos de prova foram submetidos a uma quantidade maior de deformação, o mesmo acontecendo com o aço GO, Figura 6.21a. O aumento do valor de pico indica uma maior quantidade de saltos em razão da quantidade de obstáculos ter aumentado.

Figura 6. 20 - Comparação entre valor e posição de pico para o aço GNO



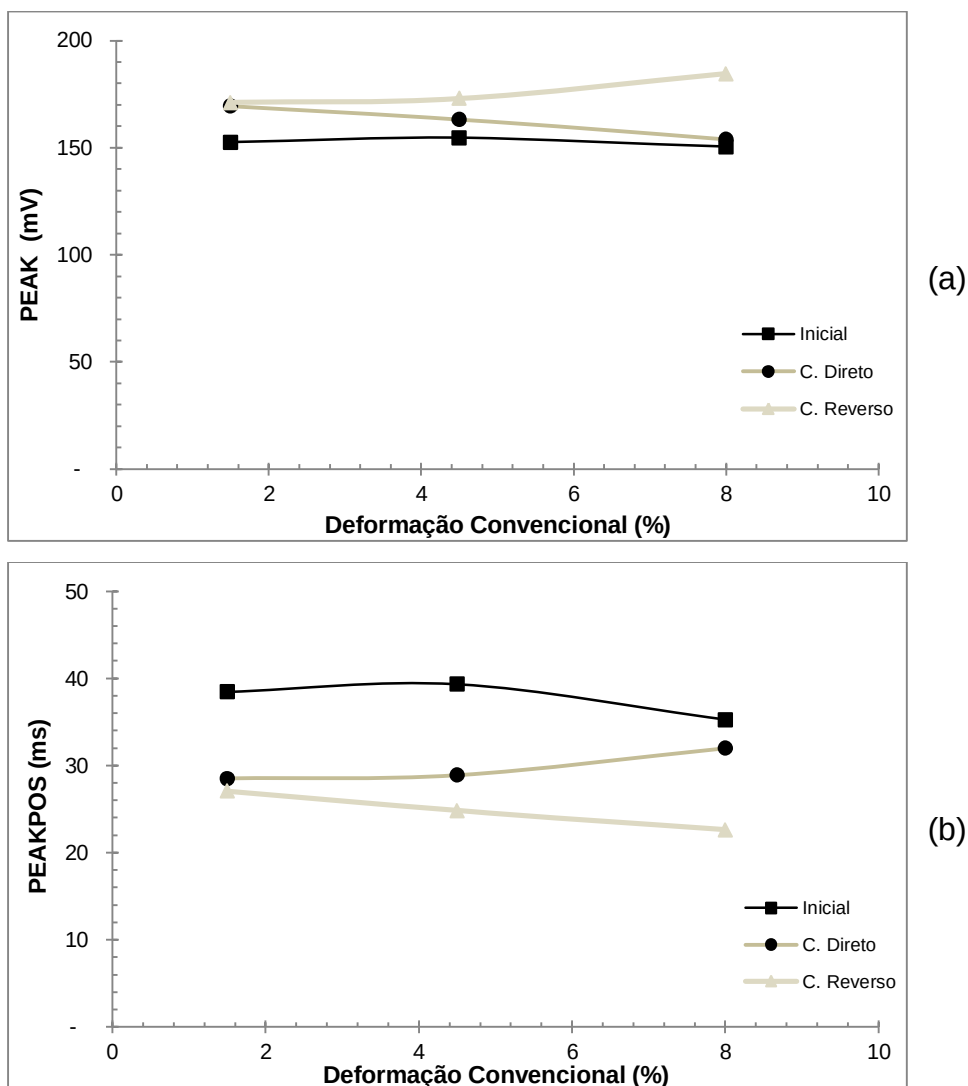
PEAK (a) e PEAKPOS (b)

Fonte: Produzido pela autora

A posição de pico, Figura 6.20b e Figura 6.21b, também variou, apresentando um deslocamento em relação a sua posição inicial. Esse comportamento aponta um impedimento à movimentação dos domínios magnéticos.

Variações nos valores PEAK e PEAKPOS estão relacionadas a alterações na microestrutura do material. Nas condições escolhidas no trabalho essas alterações estão associadas a deformação plástica e o estado de tensões presentes em ambos os materiais. Os resultados encontrados para o valor e posição de pico confirmam o valor do ruído representado pelo valor RMS, sendo essas alterações provocadas pelas distorções na rede cristalina causadas pelas discordâncias.

Figura 6. 21 - Comparação entre valor e posição de pico para o aço GO



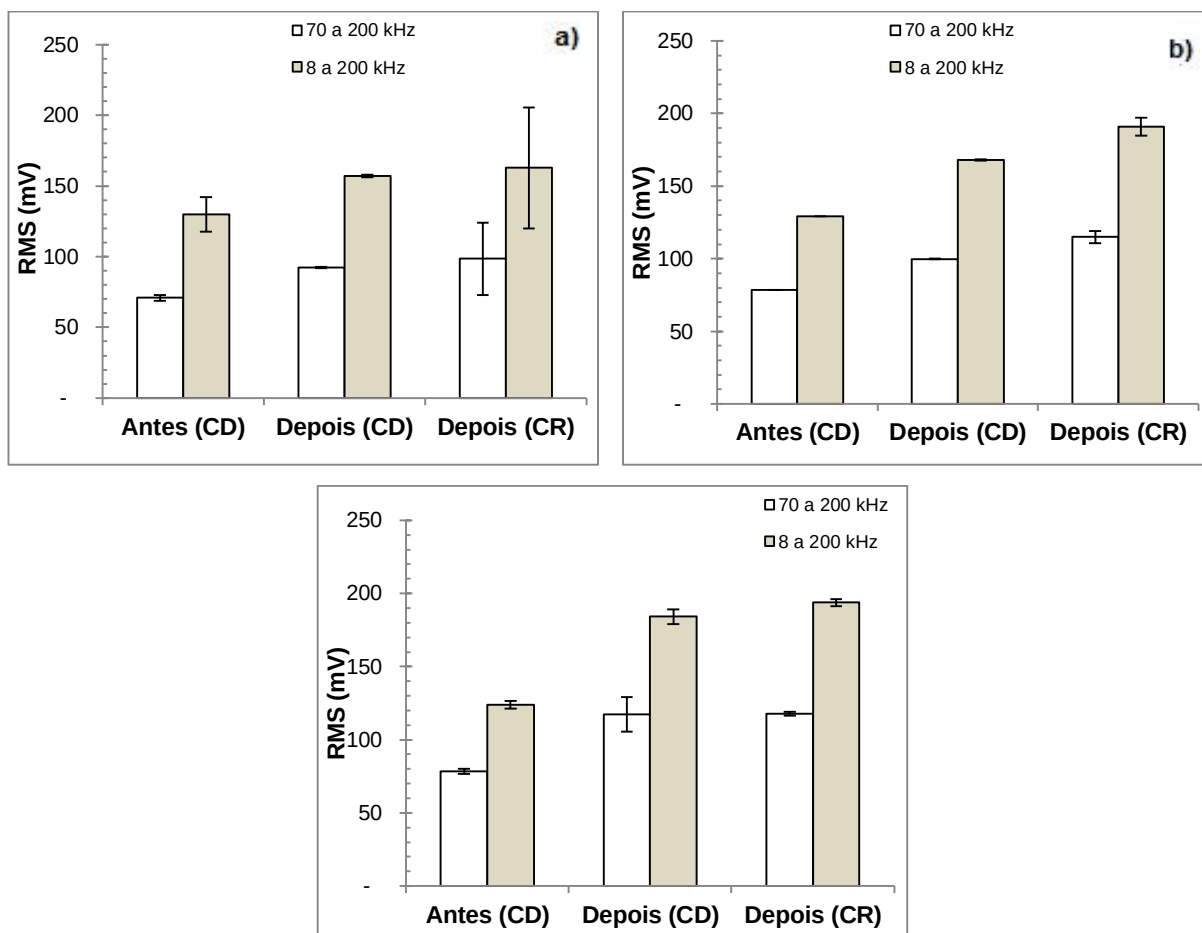
PEAK (a) e PEAKPOS (b)

Fonte: Produzido pela autora

No cisalhamento cíclico também foi observado dois ou três blocos no envelope do ruído quando o material no estado inicial foi submetido à magnetização como ocorreu na rota anterior, estando a posição de pico localizada entre esses blocos.

Na Figura 6.22 e Figura 6.23 são apresentados gráficos do ruído por meio do valor RMS para o aço GNO e GO nas duas faixas de frequências utilizadas no trabalho. Conforme citado, a primeira faixa de frequência, 70 kHz a 200 kHz, uma captação do ruído na superfície do corpo de prova enquanto a outra faixa, 8 kHz a 200 kHz, em toda a extensão do corpo de prova.

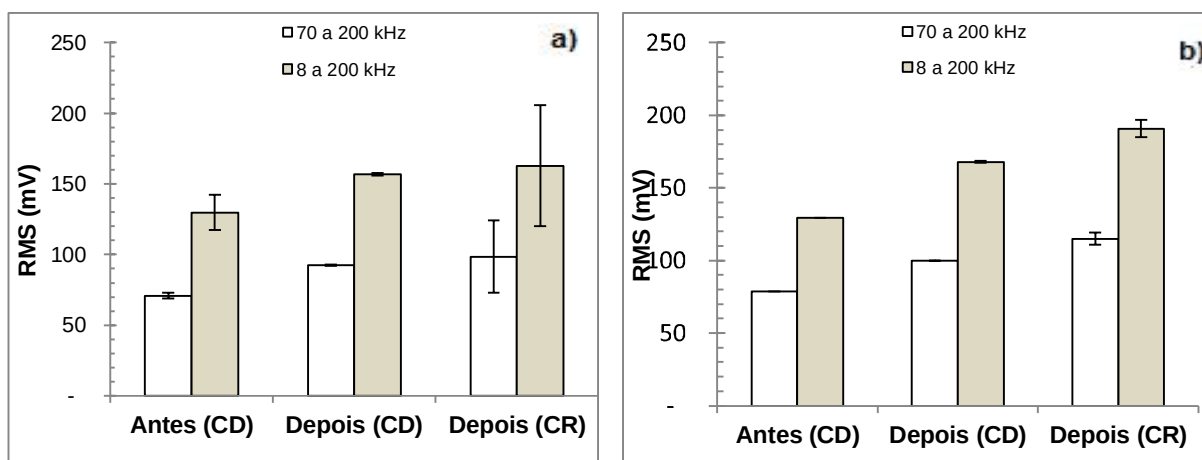
Figura 6. 22 - Valor RMS em diferentes profundidades de captação do ruído para o aço GNO



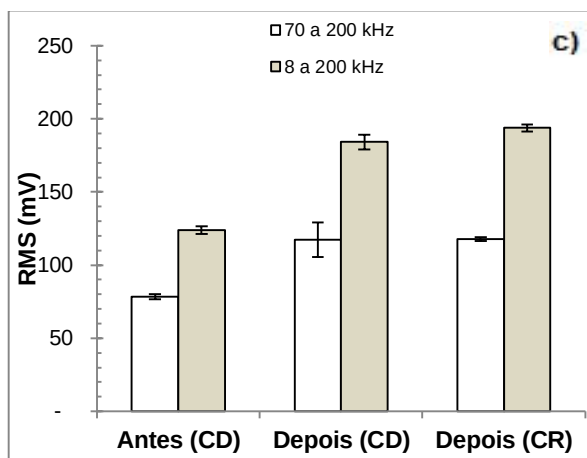
Deformado em 1,5% (a); 4,5% (b); 8,0% (c).

Fonte: Produzido pela autora

Figura 6. 23 - Valor RMS em diferentes profundidades de captação do ruído para o aço GO



Continuação Figura 6. 24 - Valor RMS em diferentes profundidades de captação do ruído para o aço GO



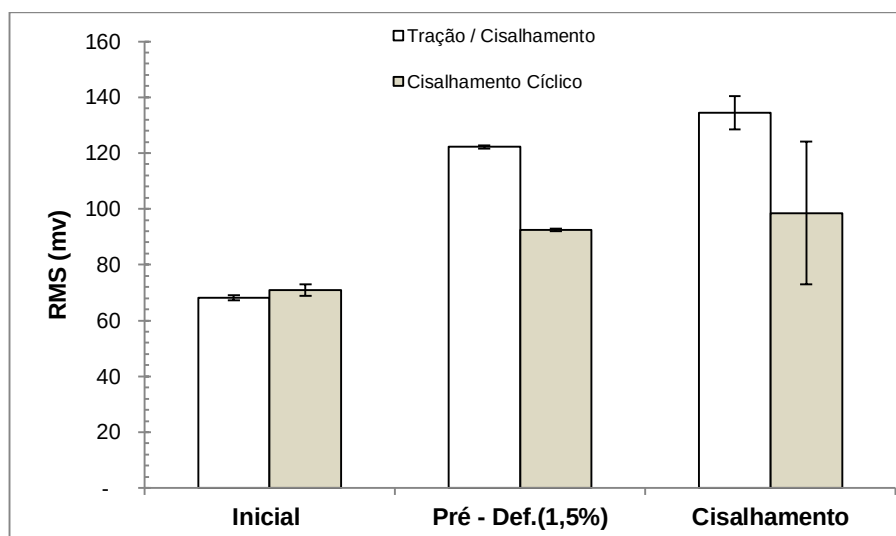
Deformado em 1,5% (a); 4,5% (b); 8,0% (c).

Fonte: Produzido pela autora.

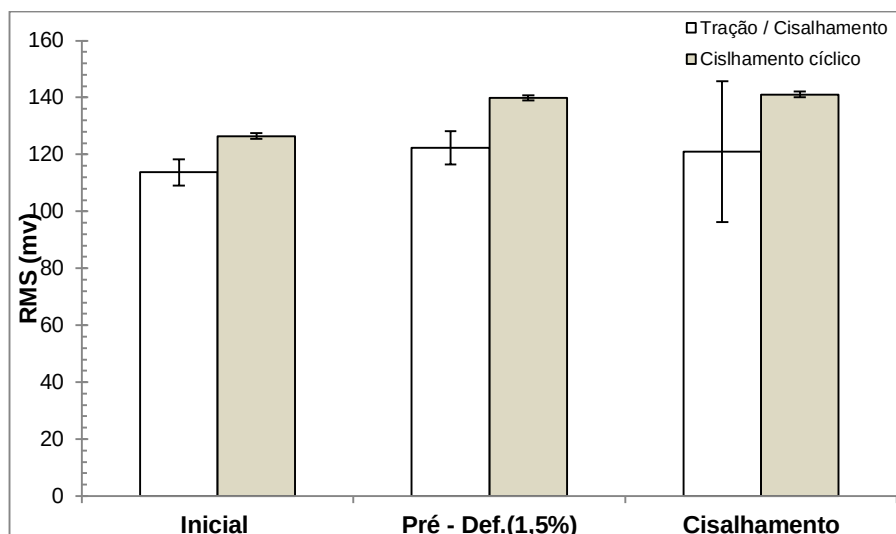
6.5.3. Efeito do modo de deformação plástica na resposta magnética dos aços GO e GNO

Nessa fase do trabalho foi investigado de que forma a variação no modo de deformação influenciou o ruído Barkhausen no par de aços elétricos. Na Figura 6.24 é apresentado um gráfico do valor RMS em função da quantidade de pré – deformação para o aço GNO, a Figura 6.25 exibe o mesmo gráfico para o aço GO.

Figura 6. 25 – Comparação entre rotas aço GNO pré - deformado em 1,5%



Fonte: Produzido pela autora

Figura 6. 26 - Comparação entre rotas aço GO pré - deformado em 1,5%

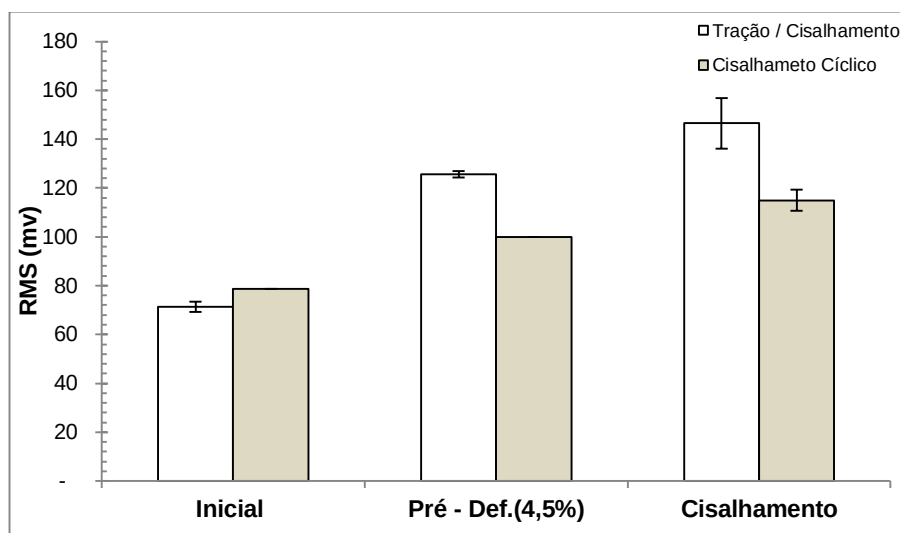
Fonte: Produzido pela autora

As primeiras colunas correspondem ao estado inicial dos materiais, não tendo experimentado nessa etapa nenhum tipo de deformação em laboratório. A coluna “branca” está associada à rota tração / cisalhamento e a coluna cinza a rota de cisalhamento cíclico. As colunas do meio estão associadas à pré - deformação, comum às duas rotas, tendo como diferença o modo de deformação, a coluna branca em tração e a cinza em cisalhamento no modo direto. As últimas colunas representam a segunda etapa das duas rotas de cisalhamento. Na pré - deformação a quantidade de deformação é a mesma nas duas rotas, tendo como variação o modo de deformação. Assim, a coluna branca representa o cisalhamento direto e enquanto a coluna cinza identifica o cisalhamento reverso. Essa interpretação é utilizada para todos os gráficos que comparam as rotas de processamento dos dois materiais.

Para os dois materiais as duas etapas de pré - deformação bem como a etapa seguinte de cisalhamento levou ao aumento no valor do ruído. Nas condições apresentadas nas Figuras 6.24 e 6.25 a etapa que mais contribuiu para o aumento do sinal foi a pré - deformação em ambas as rotas. O ruído após o cisalhamento aumentou em intensidade menor para os dois materiais. Nota-se que o aço GO apresentou maior valor do ruído inicial em relação ao aço GNO, e durante os estágios de deformação o valor RMS do GO apresentou menor elevação do que o GNO, sendo o valor RMS deste último material mais sensível à deformação plástica.

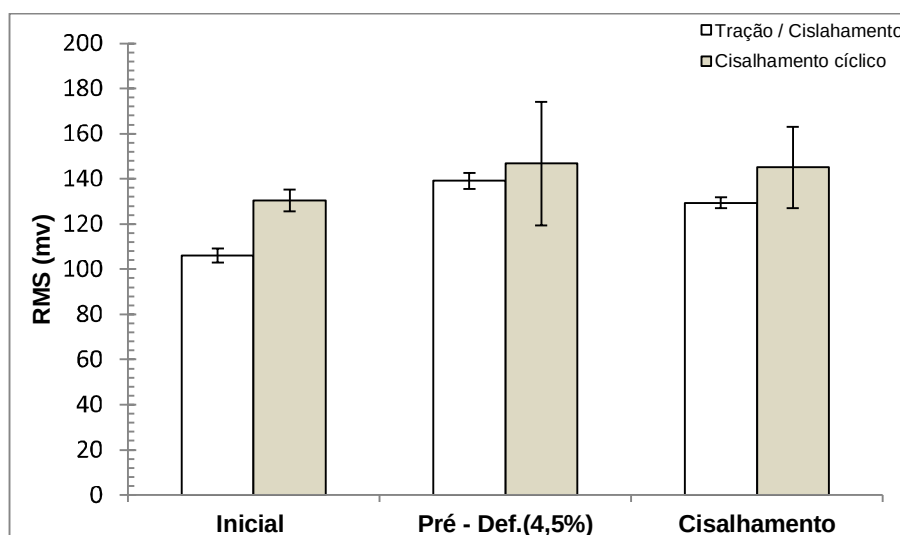
Nas Figuras 6.26 e 6.27 são apresentados os gráficos do valor RMS para pré – deformação de 4,5%, para os aços GNO e GO respectivamente, nas duas rotas de processamento.

Figura 6. 27 - Comparação entre rotas aço GNO pré - deformado em 4,5%



Fonte: Produzido pela autora

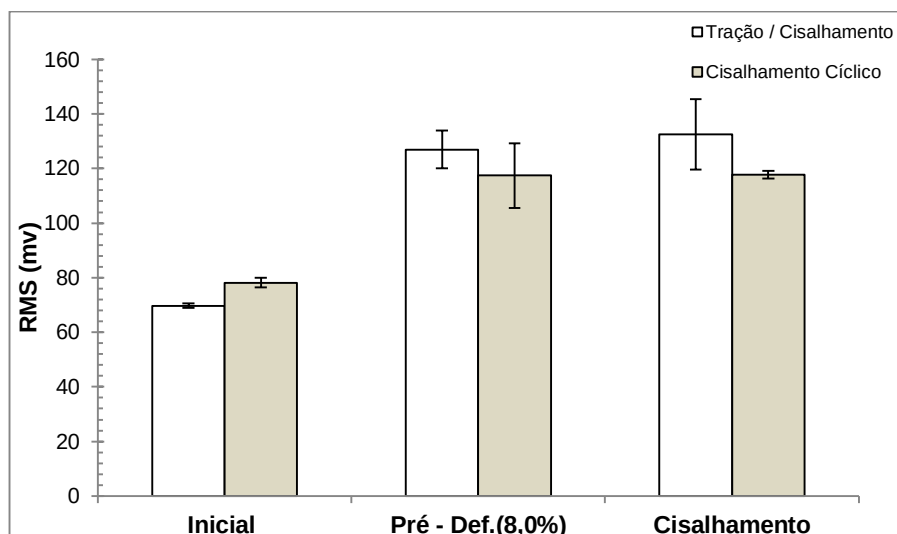
Figura 6. 28 - Comparação entre rotas aço GO pré - deformado em 4,5%



Fonte: Produzido pela autora

Nas Figuras 6.28 e 6.29 são apresentados para o aço GNO e GO, nessa devida ordem, gráficos do valor RMS para pré – deformação de 8,0%, nas duas rotas de processamento, ou seja, tração/cisalhamento e cisalhamento cíclico.

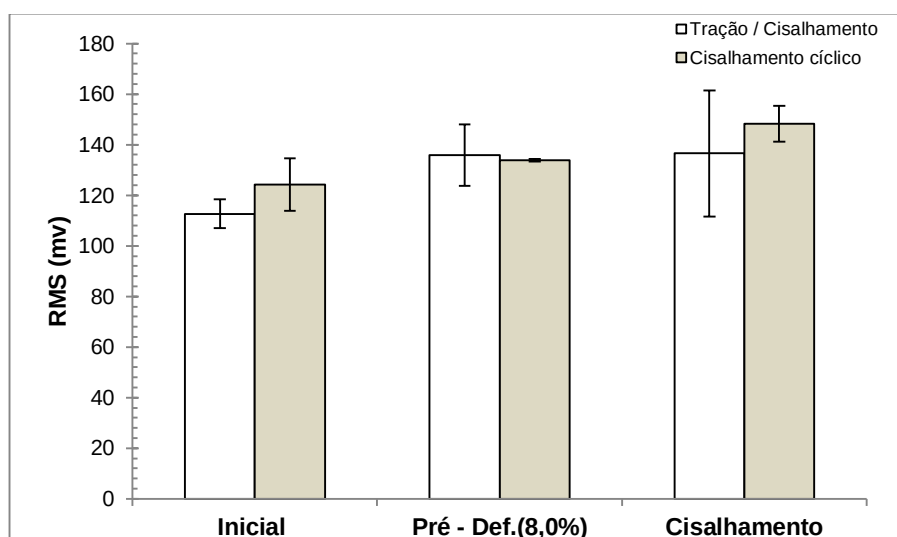
Figura 6. 29 - Comparação entre rotas aço GNO pré - deformado em 8,0%



Fonte: Produzido pela autora

O comportamento observado para as duas quantidades de pré – deformação, 4,5% e 8,0%, foi semelhante ao comportamento notado na condição de pré – deformação de 1,5%. Tendo como única diferença a maior magnitude do aumento do sinal de acordo com o acréscimo da quantidade de deformação plástica durante a pré-deformação do material.

Figura 6. 30 - Comparação entre rotas aço GO pré - deformado em 8,0%



Fonte: Produzido pelo autora.

Na Figura 6.30 são mostrados os gráficos PEAK e PEAKPOS, para o aço GNO comparando esses valores para as duas rotas de processamento adotadas no

trabalho. Para o GO esses gráficos são exibidos na Figura 6.31.

Os valores de PEAK e PEAKPOS associados ao valor “1” do eixo x correspondem à condição do estado inicial dos dois materiais. Já a posição “2” está relacionada à pré – deformação, em tração para a rota tração / cisalhamento, cisalhamento direto, para a rota de cisalhamento cíclico. Por fim, a posição “3” corresponde ao cisalhamento direto para a rota que envolve tração e cisalhamento em modo direto para a rota de cisalhamento cíclico.

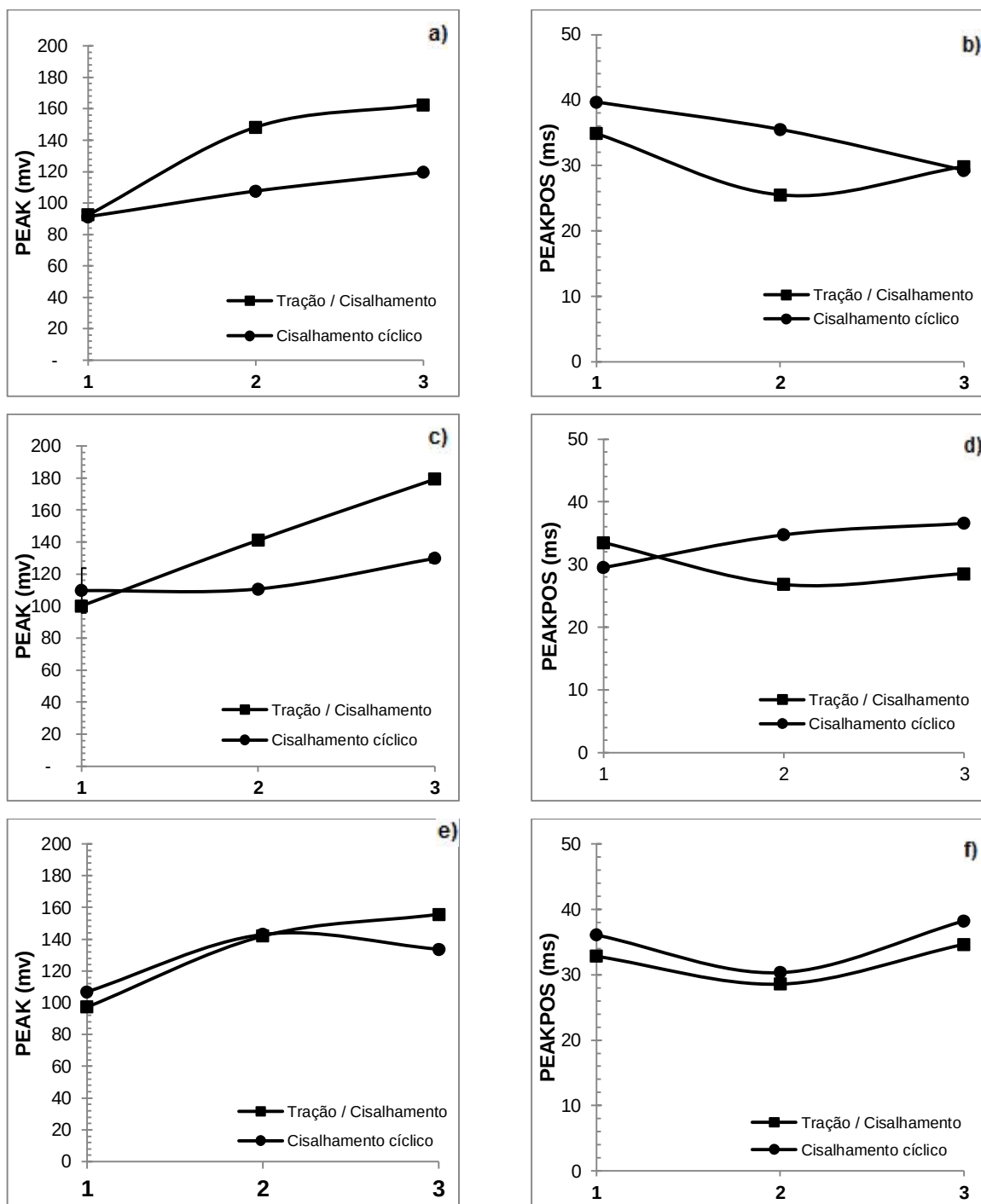
Analisando a influência do modo de deformação no valor e na posição de pico, para o aço GNO, pode-se verificar que a rota tração / cisalhamento ocasionou uma geração de valores de pico maiores, bem como os maiores deslocamentos em sua posição, quando comparado com a rota de cisalhamento cíclico. Esse comportamento foi observado para os três valores de pré – deformações avaliadas nestas figuras.

Essa resposta do GNO quanto aos valores PEAK e PEAKPOS confirmam os resultados obtidos pelo valor RMS, quando se compara o efeito das rotas de processamento no ruído magnético. Valores maiores de pico e de deslocamentos em sua posição indicam alterações na microestrutura, relacionadas ao modo e à quantidade de deformação plástica.

Como indicado no RMS, essas variações estão relacionadas com a criação de novos sítios de aprisionamento, assim como a interação entre eles, pois com a formação de novas barreiras à movimentação dos domínios, os saltos Barkhausen se tornam maiores, ocasionando o aumento do valor do pico e a deslocamentos maiores na posição dos mesmos.

Para o aço GO observa-se que o comportamento foi, de modo geral, o oposto, ou seja, a condição de processamento que apresentou maiores valores de pico bem como maiores deslocamentos na posição de pico foi a rota de cisalhamento cíclico. Essa resposta dos valores PEAK e PEAKPOS, também confirmam os resultados do valor RMS. A mobilização de novos sítios de aprisionamento causam maiores impedimentos ao avanço das paredes de domínio.

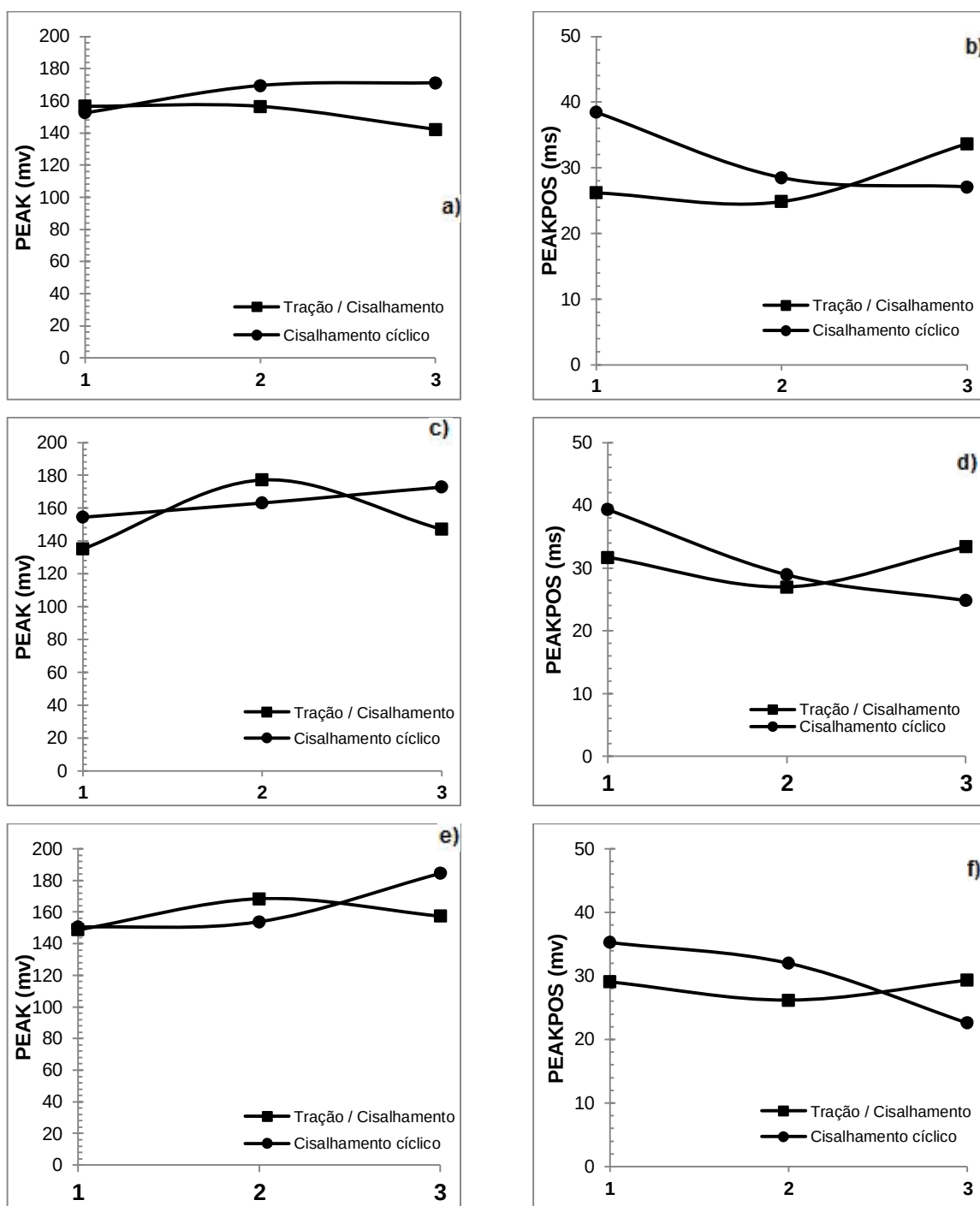
Figura 6. 31 - Comparação entre valor e posição de pico para o aço GNO nas duas rotas



Pré - deformado em 1,5% (a) e (b); 4,5% (c) e (d); 8,0% (e) e (f).

Fonte: Produzido pela autora

Figura 6. 32 - Comparação entre valor e posição de pico para o aço GO nas duas rotas

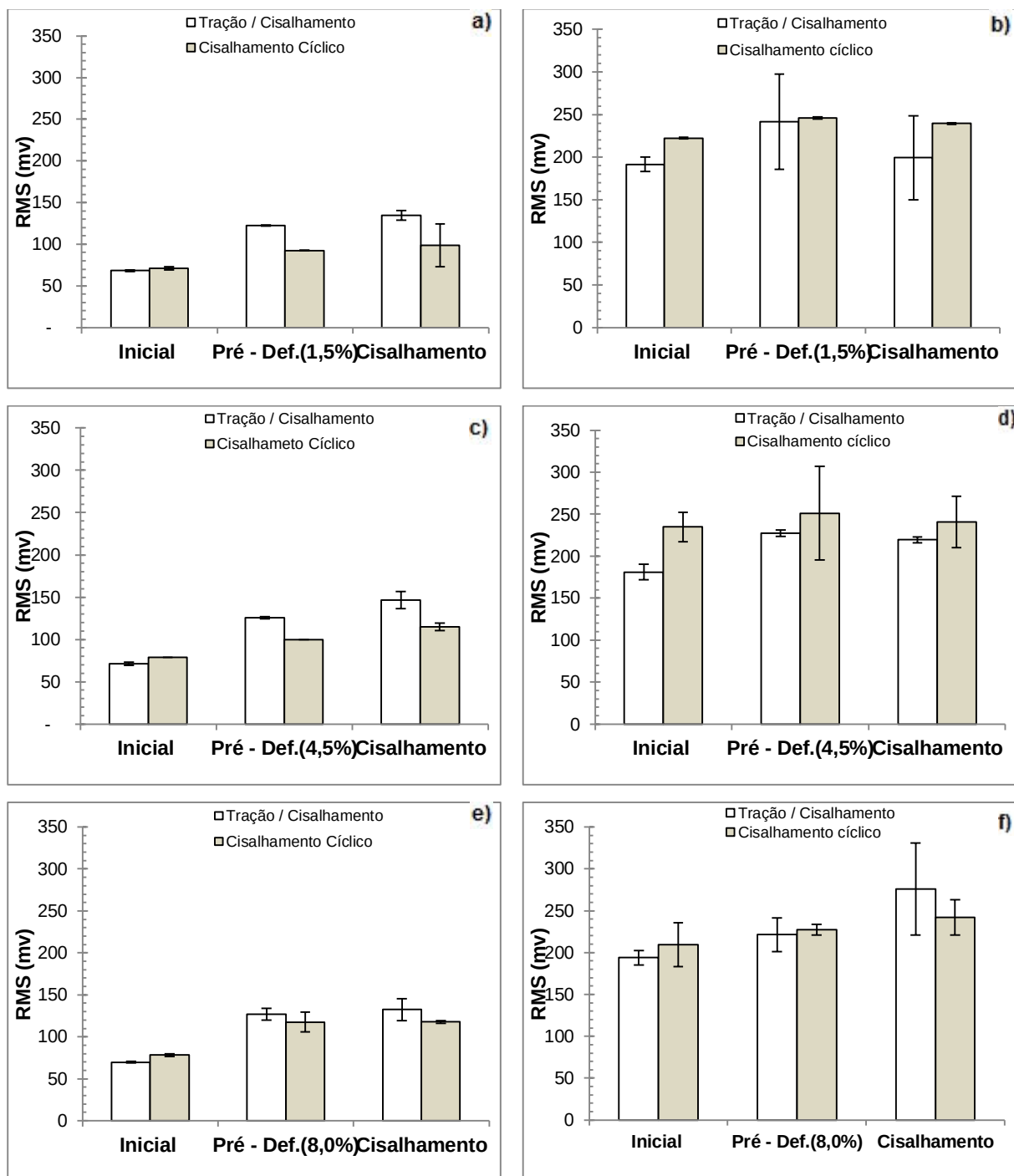


Pré - deformado em 1,5% (a) e (b); 4,5% (c) e (d); 8,0% (e) e (f).

Fonte: Produzido pela autora.

Na Figura 6.32, os gráficos apresentados na esquerda estão os gráficos do valor RMS apresentados nas Figuras 6.24, 6.26 e 6.28, alocados nesta figura para facilitar a comparação entre as duas frequências de penetração. O mesmo ocorre na Figura 6.33, os gráficos da esquerda são os já apresentados nas Figuras 6.25, 6.27 e 6.29.

Figura 6. 33 - Valor RMS em diferentes profundidades de captação do RMB variando o modo de deformação para o aço GNO



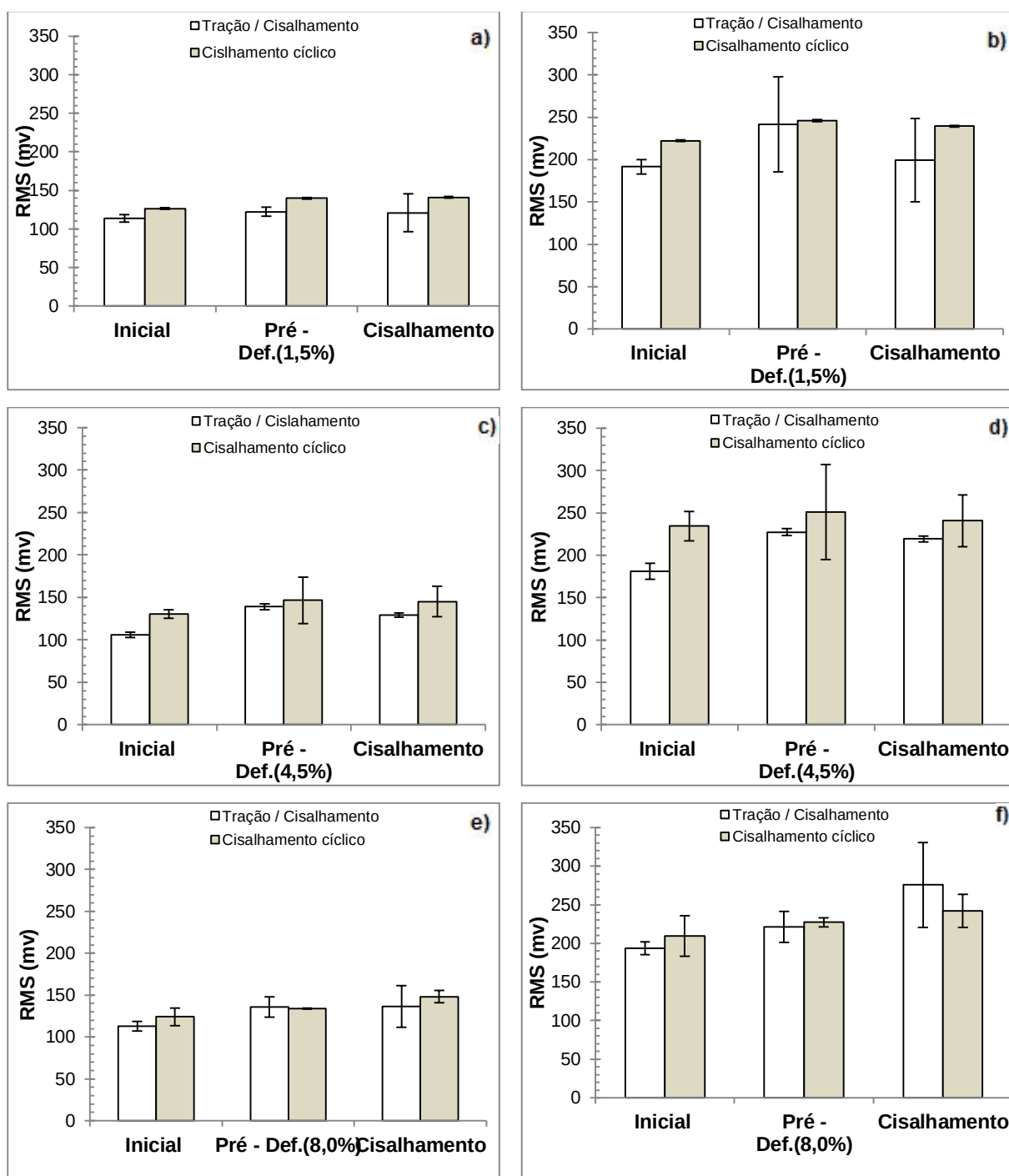
Deformado em 1,5% (a) e (b); 4,5% (c) e (d); 8,0% (e) e (f).

Fonte: Produzido pela autora

Conforme observado anteriormente, uma frequência de maior profundidade de aquisição de dados leva a um valor do ruído maior, o que pode ser observado para todo o conjunto de gráficos. Com uma maior profundidade de captação do RMB uma

maior quantidade de domínios magnéticos tende a se movimentar, elevando o valor RMS. Pode ser observado que o modo de deformação também contribuiu para o aumento do sinal.

Figura 6. 34 - Valor RMS em diferentes profundidades de captação do RMB variando o modo de deformação para o aço GO



Deformado em 1,5% (a) e (b); 4,5% (c) e (d); 8,0% (e) e (f).

Fonte: Produzido pela autora

7. Conclusão

- De maneira geral, para os dois materiais, a combinação dos esforços de tração / cisalhamento e cisalhamento direto / cisalhamento reverso acarretou em um decaimento das propriedades magnéticas. Isso foi identificado a partir da variação do ruído Barkausen, representado pelo valor RMS, que aumentou, assim como pelos outros parâmetros, PEAK e PEAKPOS, que confirmaram essa tendência de comportamento.
- O aumento da quantidade de pré - deformação não ocasionou aumentos significativos no ruído, quando comparado com o estado inicial. O efeito desse aumento foi notado na etapa seguinte do processamento. Os corpos de prova com maiores pré – deformações apresentaram maior valor RMS para o cisalhamento direto, na rota tração / cisalhamento, e cisalhamento reverso, na rota do cisalhamento cíclico. Essa variação foi observada em magnitude menor para o aço GO.
- Considerando o modo de deformação, a resposta magnética do aço GNO foi mais afetada pela rota tração / cisalhamento, sendo está, entre as analisadas, a que causou maior deterioração das propriedades magnéticas nesse material. Já para o aço GO, a resposta magnética desse material se mostrou mais sensível à rota de cisalhamento cíclico, tendo seu desempenho reduzido de forma mais significativo para essa rota.
- Em todas as condições de deformação analisadas no trabalho, uma maior frequência de penetração do campo magnético levou a um aumento do valor do ruído, o que indicou queda no rendimento magnético do material.

Referências bibliográficas

ASTUDILLO, M. R. N.; NÚÑEZ, N.; PUMAREGA, I. L. ; TORRES, D. T.; RUZZANTE, J. Magneto – acoustic emission and Barkhausen noise in A508 class II steel. In: 30th European Conference on Acoustic Emission testing &International Conference on Acoustic Emission, 2012, Granada. **Proceedings...**Granada, 2012. 10p.

BLAOW, M. ; EVANS, J. T. ; SHAW, B. A. The effect of microstructure and applied stress on magnetic Barkhausen emission in induction hardened steel. **Journal of Materials Science**. v.42, p. 4364 - 4371, 2007.

BLAOW, M.M. ; SHAW, B. A. Magnetic Barkhausen noise profile analisys: Effect of excitation field strength and detection coil sensitivity in case carburized steel. **Materials Sciences and Application**, v. 5, p. 258 – 266, 2014.

BOHN, F. **Propriedades estatísticas do ruído Barkhausen em materiais magnéticos artificialmente estruturados**. 2009. 242p. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

BOTELHO, R. A. **Laminações assimétricas e propriedades de aços elétricos GNO com 3% de silício**. 2012.134p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma Introdução**. 5ed. São Paulo: LTC, 2002. 623p.

CALLISTER JR, W.D.;RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering and introduction**. 8ed. New York: John Wiley & Sons, 2010. 1000p.

CAMPOS, A. A. **Desenvolvimento de escória sintética sinterizada para a produção de aços elétricos de grão orientado (GO)**. 2009, 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Feral de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

CAMPOS, M.F.; YONAMINE, T; FUKUHARA, M; MISSELL, F. P. Aços elétricos semiprocessados para motores elétricos. **Metalurgia & Materiais**, Brasil, v. 62, n. 566, p. 213-217, maio.2006.

CAPÓ - SÁNCHEZ, J.; PÉREZ - BENITEZ, J. A.; PADOVESE, L. R.; SERNA - GIRALDO, C. Dependence of magnetic Barkhausen emission with carbon content in commercial Steels. **Journal of Materials Scienci**, v. 39, n.4, p. 1367 - 1370, 2004.

CARDOSO, R. F. A. **Aços elétricos de alto silício por imersão a quente**: Análise do processo e da microestrutura. 2010, 243p.Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2010.

CESAR, M.G.M.M. **Efeito do estiramento da tira durante o recozimento e descarbonetação nas estruturas primária e secundária e nas propriedades magnéticas de um aço 3% Si**. 2012. 145p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais- REDEMAT, Ouro Preto, 2012.

CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2 ed. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. 544p.

CHUKWUCHEKWA, N. **Investigation of Magnetic Properties and Barkhausen Noise of Eletrical Steel**. PhD Thesis. Wolfson Centre for Magnetism Cardiff School of Engineering Cardiff University, Wales, United Kingdom, 2011.

DEVAUX, S.; DUQUENNOY, M.; GUALANDRI, J.; OURAK, M. The evaluation of surface residual stress in aeronautic bearings using the Barkhausen noise effect. **NDT&E International**, v. 37, p. 9 - 17, 2004.

DIAS, A. R. P. **Avaliação de transformações microestruturais em um aço inoxidável superduplex UNS S32760 sob diferentes condições de resfriamento e uso da técnica do ruído Barkhausen como ferramenta de inspeção**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

DREHMER, A. **Determinação da espessura de camadas duras em aços por técnicas magnéticas**. 2013. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologias) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.

DURIN, G. ; ZAPPERI, S. The Barkhausen effect. In: _____BERTOTTI, G. ; Mayergoyz, I.(Ed.). The Science of Hysteresis. **Elsevier**, VII, p.181 – 267, 2006.

FARIAS, A. R. **Caracterização do Ruído Magnético Barkhausen em Materiais Estruturais Utilizando Transformada Wavelet**. 2005.102p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2005.

FUKUHARA, M. **Subdivisão das perdas histeréticas em aços elétricos deformados e recozidos**. 2010. 106p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Instituto Luiz Alberto Coimbra, Rio de Janeiro, 2010.

FUCHS, H. C. **Estudo do tamanho de grão em amostras de ferro sinterizadas em descarga elétrica de cátodo oco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

GIROTO, E. R. **O efeito potencial de oxigênio na oxidação subsuperficial e suas influências nas propriedades magnéticas de aços elétricos após o recozimento final**. 2010. 71p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

GRIJALBA, F. A. F. **Desenvolvimento de ensaio não destrutivo baseado no ruído magnético Barkhausen para caracterização de tensões elásticas e deformações plásticas em aços**. 2010. 161p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

GÜR, C. H.; ÇAM, I. Comparison of magnetic barkhausen noise and sound velocity measurements for characterization of steel microstructure. **Materials Characterization**, v.58, 5ed., p.447 – 454, 2006.

JAGADISH, C. ; CLAPHAM, L. ; ATHERTON, D. L. Orientation effects of anisotropy stress, excitation, bias and residual fields on Barkhausen noise generation in pipeline steel. **Journal of Physics D: Applied Physics**. v. 23, p. 443 – 448, 1990.

JILIS, D. C. ; LI, L. A new approach to modeling the magnetomechanical effect. **Journal of Physics D: Applied Physics**. v. 95, p. 7058 – 7060, 2004.

KIM, D. W. ; KWON, D. Quantification of the Barkhausen noise method for the evaluation of time - dependent degradation. **Journal of magnetism and magnetic materials**. v.257, p. 175 – 183, 2003.

KOVAC, F. ; DZUBINSKY, M. ; SIDOR, Y. Columnar grain growth in non – oriented electrical steels. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 269, p. 333 – 340, 2004.

KRAUSE, T. W. ; SAMIMI, A. ; WEETMAN, P. ; CLAPHAM, L. Nondestructive characterization of steel using magnetic Barkhausen noise measurements. In: International Workshop on Smart Materials & Structure, SHM and NDT for the energy industry. Canadá, NDT, 2013. Workshop. Disponível em <http://www.ndt.net/article/ndt-canada2013/presentations/38_Krause.pdf>. Acesso em 15 dez. 2014.

LANDGRAF, F. J. G. **Propriedades Magnéticas de aços para fins elétricos**. In: _____. Aços: perspectivas para os próximos 10 anos. Rio de Janeiro, 2002, p. 109-128.

LANDGRAF, F. J. G. ; TAKANOHASHI, R. ; CAMPOS, M. F. **Tamanho de grão e textura dos aços elétricos de grão não - orientado**. In: _____. TSCHIPTCHIN, A. P. ; PADILHA, A. F. ; SCHON, C. G. ; Schon; LANDGRAF, F. J. G.; Goel LDENSTEIN, H; FALLEIROS, I. G. S.; LIMA, N. B. (Org)NB Lima. Textura e Relações de Orientação. 2ed. São Paulo: IPEN, 2003, p. 212-246.

LINDGREN, M. ; LEPISTO, T. On the stress vs. Barhausen noise relation in a duplex stainless steel. **NDT & E International**. v. 37, p. 403 - 410, 2004.

LITTMAN, M. Iron and silicon – iron alloys. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 7, n. 1, p. 48-60, março. 1971.

LOPES, W. **Estudo do encruamento dos aços AISI 304 e AISI 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples**. 2009. 187p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

LOSS, H. B. **Utilização de pós do desempoeiramento no ciclo produtivo da aciaria**. 2010, 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia industrial) – Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, 2010.

MARRA, K. M.; BUONO, V. T. Variação das perdas magnéticas durante o envelhecimento de um aço elétrico. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.3, n.1, p.36 – 39, jul/set. 2006.

MOSES, A. J. Electrical steel; past, presente and future developments. **IEE PROCEEDINGS**, v.137, p. 233 – 245, 1990

NEGRI, Guilherme M. R. **Estudo de caso de envelhecimento magnético em aços elétricos de grão não orientado de baixa eficiência**. 2011. 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

OLIVEIRA JR, J. R. **Estudo do envelhecimento magnético em aços silício de grão não orientado 2% Si**. 2014. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

Palestra CSN. Aços elétricos. Disponível em <pt.slideshare.net/ASMachado/palestra-germano> . Acesso em 10 jun.2014.

PINHO, L. C. A. B. **Materiais magnéticos e suas aplicações**. 2009. 83p. Dissertação (Mestrado em Engenharia eletrotécnica e de Computadores Major Energia) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.

RANJAN, R. ; JILES, D. C. ; RASTOGI, P. K. Magnetic properties of decarburized steels: An investigation of the effects of grain size and carbon content. **IEEE Transactions on magnetics**, v. 23, p.1869 – 1987, 1987.

REZENDE, J.E. **Evolução da microestrutura e textura com a temperatura de acabamento de um aço GNO com 1,3%Si**. 2003. 73p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) Rede Temática em Engenharia de Materiais- REDEMAT, Ouro Preto, 2003.

ROCHA, M. A. ; MEZA, R. A. **Modelagem de curvas de magnetização para solução iterativa de circuitos magnéticos não lineares**. 2005. 119p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Industrial Elétrica – Eletrotécnica) Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2005.

SANTOS, H. O. **Estudo de orientações cristalográficas de aços ao silício utilizando técnicas de difração de raios X, difração de elétrons e método etch pit**. 1999. 82p. Dissertação (Mestrado em Ciência na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1999.

SANTOS, J.P. **Influência do ângulo de corte e da anisotropia nas propriedades magnéticas dos aços elétricos: o efeito da textura**. 2005. 137p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005).

SILVA JR, S. F.; MARQUES, P.V. **Ensaaios não destrutivos**. Belo Horizonte, 2006, 96p. Material didático - Universidade Federal de Minas Gerais.

SILVA JR, S. F. **Determinação de tensões em materiais estruturais pelo ensaio magnetoelástico**. 2005. 240p. Tese (Doutorado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear - Reatores) – Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, São Paulo, 2005.

SIPAHI, L. B. ; JILES, D. C. CHANDLER, D. Comprehensive analysis of Barkhausen emission spectra using pulse height analysis, frequency spectrum, and pulse wave form analysis. *Journal of Applied Physics*, v. 73, p. 5623 – 5625, 1993.

STEFANITA, C. G. **From Bulk to Nano** - The many sides of magnetism. Springer, 170p. 2008.

STEWART, D. M.; STEVENS, K. J.; KAISER, A.B. Magnetic barkhausen noise analysis of stress in steel. **Current Applied Physics**, v. 4, p. 308 - 311, 2004.

SIWIK, D. **Estudo do uso do ruído Micromagnético Barkhausen na avaliação da resistência à corrosão em um aço Superduplex**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SORSA, A. **Prediction os material properties based on non – destructive Barkahusen noise measurements**. Tese (Doutorado em Tecnologia e Ciências Naturais) – Universidade de Oulu, Oulu, 2013.

SULLIVAN, D.O. COTTERELL, M.; TANNER, D.A.;MESZAROS, I. Characterization of ferritic stainless steel by Barkhausen techniques. **NDT&International**, v 37, p.489-496, 2004.

TAKASHIMA, Minoru, MORITO, Nobuyuki, HONDA, Atsuhito, MAEDA, Chizuko. Nonoriented electrical steel sheet with low iron loss for high-efficiency motor cores. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 35, 557-561, 1999.

TOLEDO, T. F. **Siliação de aço silício**. 2007. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais- REDEMAT, Ouro Preto, 2007.

YUEHUANG, X.; GONGTIAN, S.; YING, G.; JING, L.; YUWU, Y.; FENG MU, D. An investigation on magnetoacoustic emission of ferromagnetic with 180° magnetic domain walls. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, North Holland, v.127, 169 – 180, jan. 1993.