



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS

JOVENIANO VIEIRA DE LIMA JÚNIOR

AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DO AÇO ASTM A516 GRAU 60 ATRAVÉS DE
TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS: RUÍDO MAGNÉTICO BARKHAUSEN (RMB) E
CORRENTES PARASITAS (CP).

FORTALEZA-CE

2014

JOVENIANO VIEIRA DE LIMA JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MICROESTRUTURAL DO AÇO ASTM
A516 GRAU 60, ATRAVÉS DE TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS: RUÍDO
MAGNÉTICO BARKHAUSEN (RMB) E CORRENTES PARASITAS (CP).**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais. Área de concentração: Propriedades físicas e mecânicas dos materiais. Linha de pesquisa: Ensaios Não Destrutivos.

Orientador: Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura.

FORTALEZA

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- L698a Lima Júnior, Joveniano Vieira de.
Avaliação microestrutural do aço ASTM A516 grau 60 através de técnicas não destrutivas: ruído magnético Barkhausen (MB) e correntes parasitas (CP) / Joveniano Vieira de Lima Júnior. – 2014.
122 f. : il. color. , enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2014.
Área de Concentração: Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais.
Orientação: Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura.

1. Ciência dos materiais. 2. Processamento de sinais. 3. Ensaio não destrutivo. I. Título.



Universidade Federal do Ceará
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais

PARECER DA COMISSÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JOVENIANO VIEIRA DE LIMA JÚNIOR

Avaliação microestrutural do aço ASTM A516 grau 60, através de técnicas não destrutivas: ruído magnético Barkhausen (RMB) e correntes parasitas (CP)

A Comissão de Dissertação de Mestrado composta pelos professores **Elineudo Pinho de Moura**, Presidente e Orientador, da Universidade Federal do Ceará; **Igor Frota de Vasconcelos**, da Universidade Federal do Ceará e **José Pimentel de Lima**, da Universidade Federal do Piauí, considera o candidato:

APROVADO

NÃO APROVADO

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, em 18 de julho de 2014.

Prof. Elineudo Pinho de Moura
Presidente e Orientador

Prof. Igor Frota de Vasconcelos
Membro

Prof. José Pimentel de Lima
Membro

A Deus.

A minha mãe, tias, amigos e irmãos.

AGRADECIMENTO

A Deus pela proteção e segurança.

À minha mãe Iracy pelo amor que sempre me destes.

À minha tia Raimunda pela oportunidade de estudar na UFC.

À minha esposa Dayana pelo amor, companheirismo, solidariedade e paciência neste período enriquecedor de minha vida.

À minha avó Alzira pelo amor e atenção oferecidos a mim.

Ao meu padrasto Francisco Demerval ou “Chiquinho”.

Ao Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora José Pimentel de Lima e Igor Frota de Vasconcelos pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao professore Marcelo José pelos conselhos enriquecedores.

Aos colegas do LADIN-USP, em especial ao prof. Linilson, por ceder o equipamento para captura dos sinais.

Aos colegas e amigos da turma de mestrado, Celso Pires, Jarbas Camurça, Dimitry Pessoa, Luiz Paulo, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

Aos meus amigos Raul, Gabriel, Milton e Hamilton Victor pelo companheirismo e solidariedade nos momentos difíceis.

À minha amiga Regina, à minha cunhada Leila e à minha sogra Maria Leonardo pelo afeto e atenção.

À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

À Universidade Federal do Ceará por todos esses anos de conhecimento adquiridos na graduação e no mestrado.

“A paz é a única forma de nos sentirmos realmente humanos.”

Albert Einstein

RESUMO

Neste trabalho, treze amostras de aço ASTM A516 Gr. 60, que é um tipo de aço carbono muito utilizado na construção de tubos de pressão e caldeiras pela indústria, foram selecionados para uma avaliação do comportamento microestrutural de cada amostra após um processo de tratamento termomecânico. Foram utilizados os ensaios não destrutivos baseado no ruído magnético de Barkhausen (RMB) e correntes parasitas (CP), duas técnicas eletromagnéticas sensíveis às variações na microestrutura das amostras que se pretende avaliar. As amostras foram divididas em grupos e cada grupo passou por um tratamento diferente dos demais. Dois grupos de oito amostras foram laminados a frio com redução de espessura de 1, 3, 5 e 7% sendo que um dos grupos foi normalizado. Uma amostra ficou como recebido da fábrica, amostra de referência, e o restante foi normalizado e em seguida foi feito um recozimento a 750°C. Em seguida, todos os grupos foram caracterizados metalograficamente através de um microscópio óptico para definir o tamanho médio de grãos. Após esta etapa foram coletados sinais de RMB e CP que, em seguida, foram avaliados por meio de técnicas de processamento de sinais e cálculo de parâmetros estatísticos. Para os sinais de RMB buscou-se a posição e amplitude máxima de pico, o sinal de energia, *rms*, assimetria e a curtose, todas no domínio do tempo. Já para os sinais de CP buscou-se verificar as variações de amplitude e ângulo de fase para diferentes frequências de excitação da sonda. Os dados foram confrontados com os obtidos sobre a amostra de referência obtendo-se resultados semelhantes aos observados na literatura.

Palavras-chave: Ensaios não destrutivos. Tratamento termomecânico. Processamento de sinais.

ABSTRACT

In this study thirteen samples of ASTM A516 Gr 60, which is a type of carbon steel widely used in the construction of pressure pipes for industrial boilers were selected for microstructural evaluation of the behavior of each sample after a process of thermomechanical treatment. The methods used for this test were nondestructive test: Magnetic Barkhausen Noise (MBN) and Eddy Current (EC) which are electromagnetic techniques with great dependence on the microstructural characteristics of the samples were assessed. The samples were divided into groups and each group underwent a different treatment from others. Two groups of eight samples were cold rolled with a thickness reduction of 1, 3, 5 and 7% and one of the groups was normalized. A sample was as received from the factory, reference sample and the remainder was normalized and then annealing was done at 750 °C. Then all groups were metallographically characterized using an optical microscope to determine the average grain size. After this step signals MBN and EC were collected. The signals were evaluated using signal processing techniques and statistical functions, thereby determining values that correspond to the reflection of thermomechanical treatments on the microstructures. For signs of MBN sought the position and maximum peak amplitude of the signal energy, rms, skewness, kurtosis directed only to the time domain. As for the signs of EC, we sought variations or phase angle and amplitude for different excitation frequencies of the probe. Data were compared with the reference sample, yielding results as expected in the literature.

Keywords: Non destructive testing. Thermomechanical treatment. Signal processing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Domínios magnéticos com direções de magnetização aleatórias	18
Figura 2 – Solenoide de comprimento L	20
Figura 3 – Divisão de um monodomínio magnético para minimizar a energia	21
Figura 4 – Estrutura de uma parede de domínio de 180°	22
Figura 5 – Processo de magnetização de monodomínio sob a ação de um campo externo	24
Figura 6 – Variação da energia de uma parede de domínio em função da posição em um cristal.....	25
Figura 7 – Passagem de uma parede de domínio por uma inclusão	26
Figura 8 – Curva de histerese para amostra inicialmente desmagnetizada	28
Figura 9 – Direções de magnetização para o ferro metálico e sua dependência com a intensidade da indução magnética H para atingir a saturação	30
Figura 10 – Energia acumulado	32
Figura 11 – Energia dissipada	32
Figura 12 – Indução por meio de ima permanente	33
Figura 13 – Modelo de um circuito indutor e resistivo para a geração de correntes parasitas	36
Figura 14 – Plano de impedância Z com suas componentes: horizontal (real) e vertical (imaginária) normalizada.....	37
Figura 15 – Dois valores para a profundidade de penetração padrão variando a frequência.....	39
Figura 16 – Profundidade padrão de penetração em função da frequência.....	40
Figura 17 – Saltos da curva de magnetização característico do efeito Barkhausen.....	42
Figura 18 – Curva de histerese com as regiões de maior incidência de RMB	42
Figura 19 – Reorientação dos domínios magnéticos após sofre tensão de tração e compressão.....	44
Figura 20 – Variação da energia E_w da parede em função da posição x. a) antes da deformação plástica, b) depois da deformação plástica.....	45
Figura 21 – Eventos de Barkhausen na direção de laminação	47
Figura 22 – Modelo simplificado para medição do ruído de Barkhausen	48
Figura 23 – Sinal de RMB (branco) e da corrente de excitação (vermelho)	49
Figura 24 – ilustração do sinal temporal de um RMB_{rms} após laminação e sem tratamento térmico para um intervalo de tempo de 0,1s (verde), uma TH (vermelho) do sinal de RMB_{rms} e seus valores de máximo (azul) e mínimo (preto).....	52
Figura 25 – RMB em função da corrente de excitação sobreposto ao envelope do sinal.....	53
Figura 26 – Sinal de RMB envelopado para uma amostra de aço ASTM A516 laminado e sem tratamento térmico de recristalização	54
Figura 27 – Histograma para um número de eventos dentro de uma distribuição de probabilidade para um sinal de RMB na direção de laminação de um aço ASTM A516.....	55

Figura 28 – Micrografias superficiais de algumas amostras.....	61
Figura 29 – Ilustração das partes que compõem o Barktech	63
Figura 30 – Interface do equipamento Barktech	64
Figura 31 – Desenho esquemático dos ângulos em relação à direção de laminação para uma amostra....	65
Figura 32 – Sonda quatro pontos para determinar a condutividade elétrica	66
Figura 33 – Envolvimento de RMB em função da corrente elétrica na direção 0° com a direção de laminação	69
Figura 34 – Sinal de RMB região inicial do campo coercivo.....	71
Figura 35 – Sinal de RMB região final do campo coercivo	71
Figura 36 – Relação entre o sinal de RMB com redução por laminação na direção 0°.....	72
Figura 37 – Relação da posição de pico com a redução de espessura na direção 0°	72
Figura 38 – Envolvimento do sinal de RMB na direção de 30° com a laminação	74
Figura 39 – Relação entre o sinal de RMB com redução por laminação na direção 30°.....	74
Figura 40 – Relação entre a posição de pico e a redução de espessura na direção 30°.....	75
Figura 41 – Dependência entre o sinal de RMB com redução por laminação na direção 60°	76
Figura 42 – Relação entre o sinal de RMB e a redução por laminação na direção 60°.....	76
Figura 43 – Relação entre a posição de pico e a redução de espessura na direção 60°.....	77
Figura 44 – Envolvimento do sinal de RMB na direção de 90° com a laminação.....	77
Figura 45 – Relação entre a amplitude de pico e a redução por laminação na direção 90°.....	78
Figura 46 – Relação entre a posição de pico e a laminação na direção 90°	78
Figura 47 – Amplitude de pico para todas as amostras como função do grau de laminação.....	79
Figura 48 - Sinal de RMB para amostra de 7% ST em função do ângulo de magnetização em relação à direção de laminação.....	81
Figura 49 – Envolvimento do RMB para as amostras sem laminação, apenas com tratamento térmico, normalização e recozimento.....	81
Figura 50 – Relação entre amplitude do sinal RMB e número de horas de tratamento térmico.....	82
Figura 51 – Sobreposição dos ciclos de histerese de todas as amostras.....	83
Figura 52 – Curvas de histerese das amostras laminadas e normalizadas.....	84
Figura 53 – Curvas de histerese das amostras laminadas.....	85
Figura 54 – Curva de histerese amostras normalizadas e com crescimento de grãos.....	86
Figura 55 – Intensidade do $RMB_{energia}$ para as direções de 0° e 90° com a direção de laminação	87
Figura 56 – Intensidade do $RMB_{energia}$ para as direções de 0° e 90° com a direção de laminação seguida de tratamento térmico (normalização).....	88
Figura 57 – Constante de anisotropia para amostras laminadas, com e sem tratamento térmico.....	89
Figura 58 – Relação entre RMB_{rms} e o grau de laminação para amostras laminadas e sem tratamento	

térmico.....	90
Figura 59 – Relação entre RMB_{rms} e o grau de laminação para amostras laminadas e normalizadas.....	90
Figura 60 – Valores da distribuição de probabilidade de eventos para amostra laminada na direção 90° com a laminação	92
Figura 61 – Valores da distribuição de probabilidade de eventos para amostra laminada na direção 0° com a laminação.....	93
Figura 62 – Distribuição de probabilidade de eventos para amostra laminada e normalizada na direção 90° com a laminação	95
Figura 63 – Distribuição de probabilidade de eventos para as amostras sem laminação.....	95
Figura 64 – Distribuição de probabilidade de eventos para as amostras sem laminação.....	96
Figura 65 – Distribuição dos picos de RMB para amostras laminadas ST na mesma direção e perpendicular a direção de laminação respectivamente.....	97
Figura 66 – Distribuição dos picos de RMB para amostras laminadas CT na mesma direção e perpendicular a direção de laminação.....	98
Figura 67 – Influência da laminação sobre da impedância para uma frequência de 1 kHz.....	100
Figura 68 – Influência da laminação sobre da impedância para uma frequência de 10 kHz.....	100
Figura 69 – Influência da laminação sobre da impedância para uma frequência de 100 kHz.....	101
Figura 70 - Influência da laminação sobre a impedância para uma frequência de 1kHz. Amostras também tratada termicamente	101
Figura 71 – Influência da laminação sobre a impedância para uma frequência de 10 kHz (Amostras também tratada termicamente).....	102
Figura 72 – Influência da laminação sobre a impedância para uma frequência de 100 kHz. (Amostra também tratada termicamente).....	102
Figura 73 – Impedância em função do diâmetro médio de grão (freq. excitação = 1kHz).....	104
Figura 74 – Impedância em função do diâmetro médio do grão (freq. excitação = 10kHz).....	104
Figura 75 – Impedância em função do diâmetro médio do grão (freq. excitação = 100 kHz).....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre os materiais magnéticos e a permeabilidade magnética	20
Tabela 2 – composição química do aço A516 grau 60°	59
Tabela 3 – Resultado encontrado com o método de planimétrico Joffries (ASTM E112-10), (ST = sem tratamento térmico, CT = com tratamento térmico)	60
Tabela 4 – Valores de estatístico para a distribuição de eventos de Barkhausen	91
Tabela 5 – Valores de estatístico para a distribuição de eventos de Barkhausen	94
Tabela 6 – Estatístico para a distribuição de eventos de Barkhausen	96
Tabela 7 – Valores da resistividade e permeabilidade	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RMB	Ruído Magnético de Barkhausen
CP	Correntes Parasitas
CENDE	Centro de Ensaio Não Destrutivo
LADIN	Laboratório de Dinâmica e Instrumentação
USP	Universidade de São Paulo
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

% - Porcentagem;

°C - grau Celsius;

i - Corrente elétrica em ampère (Ampère)

\vec{B} - Densidade de campo magnético (tesla)

\vec{l} - comprimento do fio (metros).

L - indutância da sonda

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

N - Número de espiras

n - número de pontos do sinal.

N_p - número de espira da sonda de excitação

$d\vec{A}$ - Elemento diferencia de área.

χ - Susceptibilidade magnética

M - Magnetização de saturação

C - Constante de Curie

T - Temperatura

θ - Ponto de Curie.

μ - Permeabilidade magnética.

\vec{E} - Intensidade do campo elétrico

ε - Potencial elétrico.

V - Potência do sinal

H - força magnetizante (ampère/metro)

\vec{j} - Densidade de corrente (A/m²)

t - tempo (segundo)

γ - densidade de carga (C/m³)

ρ - resistividade elétrica

E_t - Energia de troca

E_s - Energia magnetostática

E_c - Energia magnetocristalina

E_m - Energia magnetoestrictiva

E_e - Energia de entropia

E_{total} - Energia total do sistema

ϵ - permissividade do ar (F/m)

σ - condutividade elétrica (Ω^{-1}).

\vec{A} - Potencial magnético

\vec{J}_s - Densidade de corrente aplicada

f - Frequência de oscilação

q - carga elétrica (coulomb);

v - velocidade (metro/segundo)

ζ - parâmetro de troca

S^2 - produto interno entre dois spins \vec{S}_i vizinhos

ϕ^2 - expansão do cosseno

k - constante anisotrópica

δ - largura da parede de domínio magnético

R_A - resistência elétrica da amostra

a - comprimento da amostra

d - largura da amostra

w - espessura da amostra

s - espaçamento entre os pontos de medida de condutividade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Apresentação e justificativa	13
1.2. Objetivo geral	14
1.3. Objetivos específicos	14
1.4. Organização dos capítulos	15
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
2.1. Princípios básicos do magnetismo	16
2.1.1. Natureza do eletromagnetismo e do magnetismo de materiais magnéticos.....	16
2.1.2. Domínios magnéticos e paredes de domínio	21
2.2. Processos de magnetização	23
2.2.1. Efeito de Barkhausen	26
2.2.2. Curva de magnetização	27
2.2.3. Anisotropia magnética	29
2.2.3.1. Anisotropia magnetocristalina	29
2.2.3.2. Anisotropia magnetostrictiva ou magnetoelástica	31
2.2.3.3. Anisotropia magnetostática	31
2.3. Perdas magnéticas	32
2.4. Correntes parasitas ou correntes de Foucault	33
2.4.1. Princípios fundamentais.....	35
2.4.2. Efeito película ou skin effect.....	38
3. REVISÃO DE LITERATURA	41
3.1. Ensaio não destrutivo	41
3.1.1 A técnica do RMB e a microestrutura	41
3.1.1.1 Tensões mecânicas e o sinal de RMB	43
3.1.1.2 Deformações elásticas e plásticas.....	44
3.1.1.3 Tratamento térmico	46
3.1.2 Composição química e as transformações de fase	47
3.1.3 Sistema teórico para a medição do RMB	48
3.1.4 Processamento dos sinais de RMB	49
3.2 Técnica de correntes parasitas e o tratamento térmico	56
3.3 Correntes parasitas e a composição química	57
3.4 Correntes parasitas e as tensões mecânicas	57

3.4.1 Efeito Lift-off	58
4. MATERIAIS E MÉTODOS	59
4.1 Amostras e preparação das amostras	59
4.2 Equipamentos experimentais utilizados	63
5. RESULTADOS	69
5.1 Efeito da laminação sobre o envelopamento do sinal de RMB	69
5.2 Análise da curva de histerese magnética	83
5.3 Influência da laminação a frio sobre a energia do sinal de RMB	87
5.4 Influência da laminação sobre RMB_{rms}	89
5.5 Análise por meio de assimetria e curtose na direção de laminação	91
5.6 Efeitos da laminação e do crescimento de grãos sobre as correntes parasitas	99
5.7 Influência do diâmetro médio de grão e da laminação	103
6. CONCLUSÃO	107
6.1. Trabalhos futuros	110
REFERÊNCIA	111

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação e justificativa

Em 1919, o físico alemão Heinrich Barkhausen observou que materiais ferromagnéticos submetidos a campos magnéticos variáveis emitiam ruídos. Essa descoberta revelou indícios de que esses materiais seriam compostos por pequenas regiões, e a interação entre elas responsável por algumas de suas propriedades magnéticas. Atualmente sabe-se que a microestrutura dos materiais ferromagnéticos é composta por domínios magnéticos que são microrregiões com magnetização de saturação e direção de magnetização diferentes. Nesses tipos de materiais, caso um campo magnético externo não seja aplicado, tem-se um campo resultante praticamente nulo. Contudo, devido à exposição ao campo magnético, ocorre um ajuste gradual dos momentos magnéticos de cada domínio à direção do campo aplicado, tornando o material magnetizado após certo intervalo de tempo. Entre dois domínios adjacentes existe uma região chamada de parede de domínio. Quando um campo externo variável é aplicado, a magnetização de cada domínio se ajusta à direção do campo, forçando as paredes de domínios com menor energia magnetoestática a um deslocamento na direção de magnetização. Se não houver obstáculo o deslocamento ocorre de forma contínua. O surgimento de defeitos, impurezas ou fatores externos, tais como deformações ou envelhecimento dificultam esse movimento, podendo até mesmo aprisioná-lo se o campo não for suficientemente forte para superar tais obstáculos. Quando a parede se desloca transpondo os obstáculos através de saltos discretos o campo interno gerado torna-se, naquela região, descontínuo. O sinal da variação de magnetização é capturado por uma bobina leitora posicionada sobre a amostra submetida ao campo magnético aplicado. A partir desse sinal é possível determinar as mudanças ocorridas nas propriedades microestruturais do material e, com isso, avaliar as transformações sofridas pelo material quando submetidos a diferentes condições.

As alterações microestruturais são identificadas pelas variações na intensidade e frequência dos pulsos magnéticos captados pela bobina sensora. A partir delas é possível monitorar de forma não destrutiva propriedades magnéticas do material. Esses pulsos são chamados Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) e por causa da sua grande sensibilidade a pequenas variações magnéticas internas, têm sido utilizados na caracterização e avaliação microestruturais por diversos centros de pesquisa e também pela indústria.

Existe atualmente uma grande dificuldade em mapear mudanças em microrregiões de aços que sofreram processos de laminação, fadiga, deformações ou mesmo tratamentos térmicos e que produzam resultados rápidos e satisfatórios. Soma-se ainda outra dificuldade da obtenção de características intrínsecas do material para avaliação prévia de seu comportamento quando colocado em ambientes hostis sem a necessidade de empregar técnicas danosas ao material.

Por isso, o emprego do RMB como alternativa para avaliação microestrutural pela sua simplicidade, eficiência, custo baixo e pela a capacidade de ser utilizado na caracterização de materiais, representa uma poderosa ferramenta experimental com grande potencial de crescimento. O Centro de Ensaio Não Destrutivo (CENDE) da Universidade Federal do Ceará – UFC, a exemplo de outros centros de pesquisas como Laboratório de Dinâmica e Instrumentação (LADIN) da Universidade de São Paulo – USP, que também utilizam esta técnica, busca desenvolver e aprimorá-la para melhor aplicação na indústria e também em centros de pesquisas. Além disso, como o CENDE conta também com uma larga experiência na avaliação por meio da técnica não destrutiva de correntes parasitas (CP), técnica largamente utilizada em outros centros de pesquisa, e pelo fato das técnicas CP e RMB obedecerem a princípios físicos semelhantes, optou-se por utilizá-la como ferramenta comparativa entre os resultados encontrados.

1.2 Objetivo geral

Neste trabalho, busca-se avaliar experimentalmente as alterações microestruturais do aço A516 grau 60 após tratamento termomecânico, utilizando técnicas não destrutivas Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) e de Correntes Parasitas (CP).

1.3 Objetivos específicos

- Avaliar as alterações microestruturais para cada nível de redução de espessura após o tratamento termomecânico por meio da análise dos sinais de RMB e CP.
- Comparar quantitativamente as diferenças entre as amostras laminadas com e sem tratamento térmico através dos sinais de RMB, curva de histerese e corrente parasitas.
- Relacionar as variações de anisotropia com os diferentes níveis de laminação.

- Confrontar os resultados dos sinais de RMB com os de correntes parasitas.
- Correlacionar às diferentes direções do campo de magnetização em relação à direção de laminação com o aumento de anisotropia.

1.4 Organização dos capítulos

O capítulo 2 apresenta uma fundamentação teórica básica sobre os princípios físicos por trás desta pesquisa. O capítulo 3 mostra uma revisão de literatura sobre as principais descobertas e aplicações das técnicas de RMB e CP em materiais ferromagnéticos e materiais condutores. O capítulo 4 apresenta os materiais e a metodologia necessária para que se obtenham resultados mais claros e precisos. O capítulo 5 mostra todos os resultados encontrados. Sendo todos apresentados por meio de figuras, diagramas e gráficos. O capítulo 6 mostra a conclusão e trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo tem como objetivo proporcionar informações básicas sobre os princípios do magnetismo e dos processos de magnetização. Desta forma, o leitor terá as ferramentas necessárias para compreender os mecanismos que levaram ao surgimento das técnicas não destrutivas baseadas em princípios magnéticos. Além disso, poderá conhecer suas aplicações práticas na avaliação e/ou análise de microestruturas de materiais ferromagnéticos. Para informações adicionais ver referências [1, 2, 3, 4, 5, 11, 25] do trabalho.

2.1 Princípios básicos do magnetismo

Na natureza existem materiais que respondem de forma diferente quando submetidas a um campo magnético. As três classes mais conhecidas são os diamagnéticos, os paramagnéticos e os ferromagnéticos. Os diamagnéticos têm o comportamento de repulsão, enquanto os paramagnéticos são atraídos, e os ferromagnéticos são fortemente atraídos. Por que isso ocorre? Os próximos tópicos esclarecerão os motivos.

2.1.1 Natureza do eletromagnetismo e do magnetismo de materiais magnéticos

Classicamente sabe-se que cargas elétricas têm a propriedade de atrair ou repelir outras cargas através da ação de um campo elétrico. Contudo, quando estas cargas entram em movimento, além do campo elétrico, surge também o campo magnético que atuará em outras cargas elétricas em movimento [1]. Em resumo, carga elétrica afeta outra carga elétrica e cargas elétricas em movimento afetam apenas outras cargas elétricas em movimento.

Cargas elétricas $\xleftrightarrow{\text{campo elétrico}}$ Cargas elétricas

Cargas elétricas em movimento $\xleftrightarrow{\text{campo magnético}}$ Cargas elétricas em movimento

A força de Lorentz que atua sobre a carga q (Coulomb) com velocidade \vec{v} (m/s) é conhecida como força magnética, sendo descrita por:

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

No caso de uma corrente elétrica em um fio condutor, tem-se que:

$$\vec{F} = i \vec{l} \times \vec{B}, \quad (2)$$

onde i é a corrente elétrica em ampère (A), \vec{B} é o campo magnético medido em tesla (T) e \vec{l} é um comprimento do fio (metros). Essa força atua variando a direção e o sentido das cargas ou correntes elétricas.

Quando um campo magnético variável no tempo encontra um material condutor fechado induz o aparecimento de corrente elétrica. Essas correntes aparecem como resposta natural o aumento de energia magnética sobre o circuito, e tem como característica fundamental a ação de limitar esse campo indutor. Dessa forma, mesmo aumentando a taxa de variação do campo sempre ocorrerá um aparecimento de correntes induzidas cada vez mais intensas, proporcionais ao aumento do campo indutor. Essas correntes geram campo magnético induzido com sentido oposto ao campo aplicado. Quando somados esses dois campos, tem-se uma resultante entre esses dois campos com valor menor do que campo magnetizante. As correntes geradas são conhecidas como correntes de Foucault e são as responsáveis pelo potencial elétrico induzido. Essa ideia é descrita matematicamente pela indução magnética ou Lei de Faraday, dada por:

$$\varepsilon = -N \frac{d\varphi}{dt}, \quad (3)$$

onde $d\varphi/dt$ é a taxa de variação do fluxo magnético com o tempo, N o número de espiras e ε potencial elétrico. O sinal negativo representa uma resposta natural a variações do fluxo. O fluxo magnético é descrito pela equação:

$$\varphi = \int \vec{B} d\vec{A}, \quad (4)$$

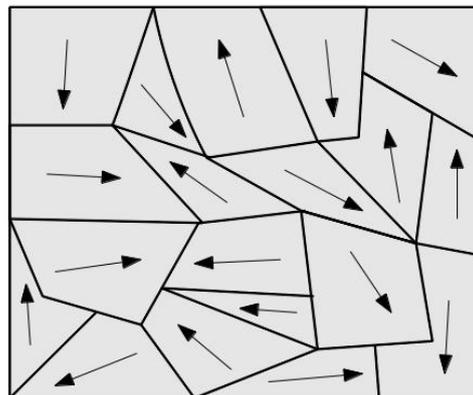
que é a integral ao longo de uma superfície considerada entre o produto escalar de \vec{B} por um elemento diferencial de área $d\vec{A}$. A partir da união de (3) e (4), chega-se a:

$$\vec{B} = \frac{1}{NA} \int \epsilon dt \quad (5)$$

Nas equações (1), (2), (4) e (5) foi desconsiderado a origem do campo magnético B , que pode ser de um eletroímã ou um ímã permanente.

Quando um campo magnético atua em alguns materiais com propriedades magnéticas surge um campo interno ou molecular que também pode ser descrito pela equação 5. Nesses materiais na camada de valência existem elétrons desemparelhados, originando momentos magnéticos permanentes. Essas camadas são normalmente a 3d (grupo do ferro) e 4f (terras-raras) [2]. Esses momentos magnéticos formam regiões magnéticas ou domínios magnéticos, cada um com direção de magnetização independente e magneticamente saturada. Contudo, essas direções não são aleatórias, a rede cristalina impõe a adoção de direções que tornem a energia magnética total menor possível, de forma que a resultante dos momentos magnéticos tornar-se praticamente nula. A Figura 1 ilustra estas regiões. Mais detalhe no tópico 2.1.2.

Figura 1: Domínios magnéticos com direções de magnetização aleatórias.



Fonte: [3]

Quando se aplica um campo magnético nestes materiais os momentos se ajustam à direção do campo. O tipo de comportamento causado por esse campo representa uma das metodologias adotadas para diferenciar os tipos de materiais magnéticos.

Os paramagnéticos respondem tornando-se magnéticos, mas para isso, há necessidade de um campo muito intenso. Além disso, a temperatura deve ser baixa se comparada à temperatura ambiente. Já os ferromagnéticos, tornam-se magnetizados facilmente e em qualquer temperatura, desde que esteja abaixo do ponto de Curie, pois acima desta temperatura o material torna-se paramagnético. Existe um parâmetro matemático que define o quão rápido um material alcance a saturação magnética. Ela é conhecida como susceptibilidade magnética χ , dedutível a partir da lei de Curie-Weiss.

$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{C}{T - \theta}, \quad (6)$$

onde M é a magnetização de saturação, H é o campo magnetizante cuja unidade é A/m, C é a constante de Curie, T temperatura e θ ponto de Curie. No caso de materiais paramagnéticos θ é igual a zero. Quando um material dito diamagnético é submetido a um campo, a indução ocorre em sentido contrário ao campo aplicado, ou seja, são repelidos pelas cargas em movimento. Isso se justifica pela a tendência que esses materiais têm de agrupar spins opostos. São exemplos de diamagnéticos: água e ar.

Outra propriedade importante é a taxa de amplificação do campo aplicado ou a facilidade com que o campo atravessa um material [4]. Em alguns materiais essa amplificação é muito alta. Por exemplo, dizer que um núcleo de transformador tem permeabilidade 5000 é dizer que ele amplifica 5000 vezes o campo aplicado [4]. Essa propriedade é a permeabilidade magnética μ que vale $4\pi \cdot 10^{-7}$ henry/m para o ar.

$$\mu = \frac{B}{H}, \quad (7)$$

onde H igual ao campo magnetizante (A/m) e B ao campo induzido ou magnético cuja unidade no SI é o tesla (T).

A susceptibilidade e a permeabilidade magnética representam a descrição do comportamento dos domínios magnéticos e a partir delas é possível diferenciar os materiais como mostrado pela Tabela 1:

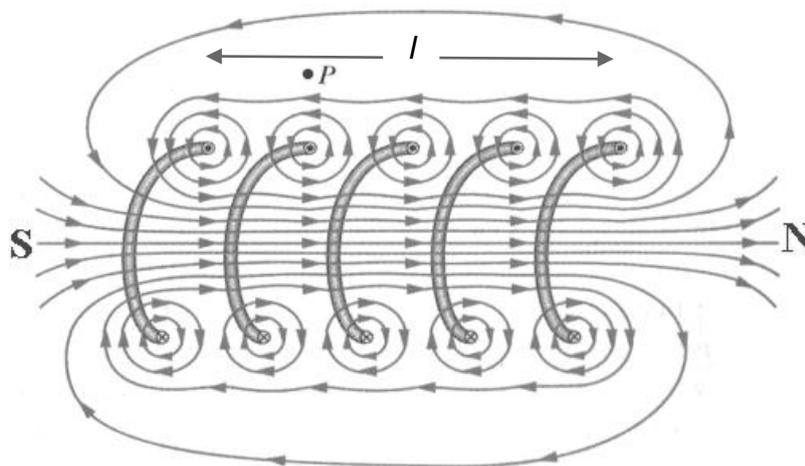
Tabela 1: Relação entre os materiais magnéticos e a permeabilidade magnética

Material	Susceptibilidade	Permeabilidade
Ferromagnético	$\gg 0$	$\gg 1$
Paramagnético	> 0	> 1
Diamagnético	< 0	< 1

O campo magnetizante pode ser originado de ímãs permanentes ou de condutores de corrente elétrica. Para um solenoide com N espiras e comprimento l , atravessado por uma corrente i , o valor de H é descrito por:

$$H = \frac{Ni}{l} \quad (8)$$

A Figura 2 ilustra as linhas de campo do solenoide quando percorrido por corrente elétrica.

Figura 2: Solenoide de comprimento l 

Fonte: adaptada de [1]

As linhas que entram do polo sul (S) em direção ao polo norte (N) são as chamadas linhas de campo magnético. São úteis para ilustrar o campo magnético no espaço.

2.1.2 Domínios magnéticos e paredes de domínio

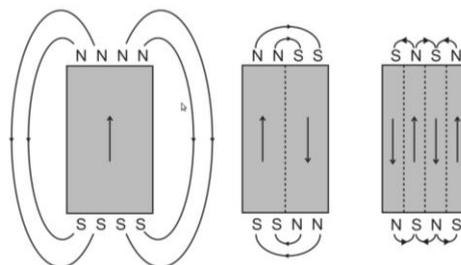
O que torna um material magnético são os números de spins desemparelhados na configuração eletrônica. Então, por que os materiais ferromagnéticos abaixo da temperatura de Curie não são todos ímãs permanentes? Para responder a esta pergunta o físico francês Pierre Weiss propôs, em 1907, a existência de domínios magnéticos, que são microrregiões com características de ímãs permanentes, todos orientados de tal forma a manter o campo resultante praticamente igual a zero.

Nos ferromagnéticos existem cinco tipos de energias que são afetadas pelos domínios magnéticos: as energias de troca (E_t) originada pelo alinhamento paralelo dos dipolos atômicos, energia magnetostática (E_s) associada à redução da intensidade do campo magnético interno, a energia magnetocristalina (E_c) originada pelo surgimento das direções preferenciais de magnetização, magnetoestrictiva (E_m) associada às deformações originadas pelos campos externos aplicado na direção de magnetização e a energia de entropia (E_e) devido a heterogeneidades do material pela presença de defeitos, discordâncias, lacunas, impurezas, etc. A soma dessas energias é a energia total do sistema (E_{total}), conforme Equação 9. As energias E_s , E_c e E_m são dependentes da textura sendo chamadas de energias anisotrópicas.

$$E_{total} = E_t + E_s + E_c + E_m + E_e \quad (9)$$

Os domínios são criados para reduzir a energia magnetostática. Todavia, a formação de domínios não é indefinida, encerrando quando a energia mínima for alcançada. Isso porque na criação de interfaces ocorre um aumento das energias anisotrópicas e de troca [2]. A Figura 3 mostra a divisão de um monodomínio em quatro domínios com diferentes direções de magnetização.

Figura 3: Divisão de um monodomínio magnético para minimizar a energia.

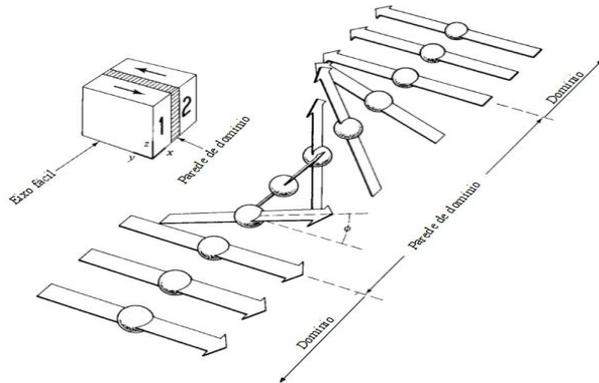


Fonte: [2].

Na região entre dois domínios adjacente e com direção de magnetização relacionada por um ângulo existe uma interface limitada chamada de parede de domínio. Caso a parede gire fora do plano de magnetização dos domínios vizinhos recebe o nome de parede de Bloch. Caso os momentos magnéticos girem no mesmo plano é chamada de parede de Néel. A largura desta parede é determinada pela relação entre duas formas de energias: a anisotrópica magnetocristalina e a interação de troca entre spins de átomos vizinhos. Estas energias são dependentes do número de átomos que constituem a parede e seus spins. Quanto maior o valor da primeira energia mais larga é a parede, enquanto a segunda é reduzida para valor menor.

Existem diferentes tipos de paredes de domínio magnético. O que as diferenciam é o ângulo de interface entre os momentos de domínios vizinhos, sendo as de 90° e 180° mais comuns. A figura 3 ilustra uma parede de 180° separando dois domínios adjacentes.

Figura 4: Estrutura de uma parede de domínio de 180° .



Fonte: adaptado [3].

A energia média entre dois spins relacionados por um pequeno ângulo entre átomos vizinhos para uma parede de domínio pode ser dada pela equação 10. Para uma cadeia unidimensional de $n+1$ átomo a soma para n pares de átomos vizinhos, tem-se:

$$E_{tr}^{par} = \zeta S^2 \sum_{i=1}^n \phi_i^2 \quad (10)$$

Nesta equação ζ representa o parâmetro de troca, S^2 o produto interno entre dois spins \vec{S}_i vizinhos e ϕ^2 a expansão do cosseno¹ do ângulo entre dois spins vizinhos. Para uma parede de 180° composta por n átomos o ângulo médio para cada spin é de π/n , correspondendo a uma energia anisotrópica alta porque haverá mais spins desalinhados em relação à direção de magnetização [3]. Assim, para uma parede de 180° constituída por n átomos, por exemplo, a energia de troca é dada por $E_{tr}^{par} = \zeta S^2 \frac{\pi^2}{n}$. Já a equação 11 mostra que, se a separação entre dois átomos adjacentes tem um valor determinado, por exemplo, um valor algébrico a , e considerando k como uma constante anisotrópica, pode-se encontrar a largura da parede δ .

$$\delta = \frac{\pi \cdot S}{\sqrt{a}} \sqrt{\frac{\zeta}{k}} \quad (11)$$

A constante k representa as propriedades físicas do material e seu valor é mínimo na direção de fácil magnetização e máximo na direção de difícil magnetização.

Assim é fácil perceber que a espessura da parede é proporcional à razão entre o parâmetro de troca e a constante anisotrópica [2].

Quando se aplica um campo magnético sobre domínios magnéticos eles se ajustam a direção do campo aplicado, iniciando o processo de magnetização.

2.2 Processos de magnetização

Processos de magnetização são respostas da estrutura de materiais ferromagnéticos à aplicação de um campo magnético externo, podendo ocorrer por movimentação das paredes de domínio e/ou por rotação da direção de magnetização dos domínios e, conforme a intensidade e direção do campo, esses processos podem ser reversíveis ou irreversíveis [5].

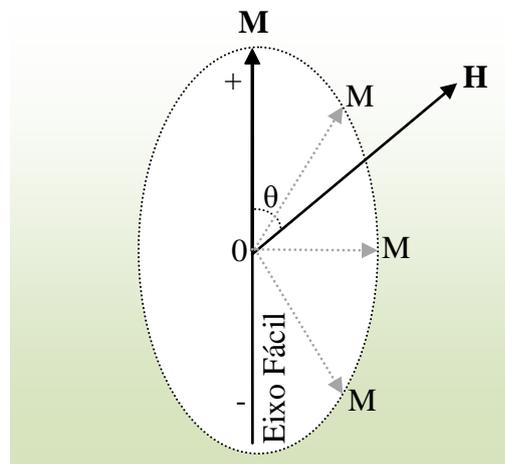
Para um campo externo aplicado em estruturas monodomínio seus momentos magnéticos tendem a girar na direção do campo, desviando da direção de fácil magnetização por um ângulo θ . Em regiões de campo de anisotropia elevado, quando a intensidade do campo de magnetização não consegue desviar a direção de magnetização para um ângulo

¹ A expansão do cosseno é: $\cos \phi = 1 - \frac{\phi^2}{2} + \frac{\phi^4}{24} - \dots$

superior a 90° , o processo torna-se reversível. Nesse caso a magnetização retorna ao sentido original. Caso o campo seja intenso o suficiente para rotacionar a um ângulo superior a 90° , mesmo com a redução do campo, a direção de magnetização não retornará ao seu estado inicial, sendo por isso irreversível [2].

A figura 5 ilustra o processo de rotação de M pela ação de um campo externo H . Observe que a posição final de M depende da direção e intensidade do campo H e também da direção de M em relação ao eixo fácil que nesta ilustração tem o mesmo sentido. Essa última dependência é consequência da energia de anisotropia magnetocristalina.

Figura 5: Processo de magnetização de monodomínio sob a ação de um campo externo.



Fonte: Adaptada de [2] e [3]

Caso o campo atue em material multidomínio o processo não ocorrerá por rotação da direção de magnetização e sim por movimento de parede de domínio. No deslocamento de paredes de domínios podem também ocorrer processos reversíveis e irreversíveis de magnetização.

Na magnetização pelo movimento de paredes de domínio ocorre um aumento da magnetização e esse valor pode ser visualizado matematicamente pela equação 12 [2] e [5]:

$$\Delta M_x = 2M_x \Delta_x \quad (12)$$

A partir de 12, pode-se chegar à variação da energia magnética:

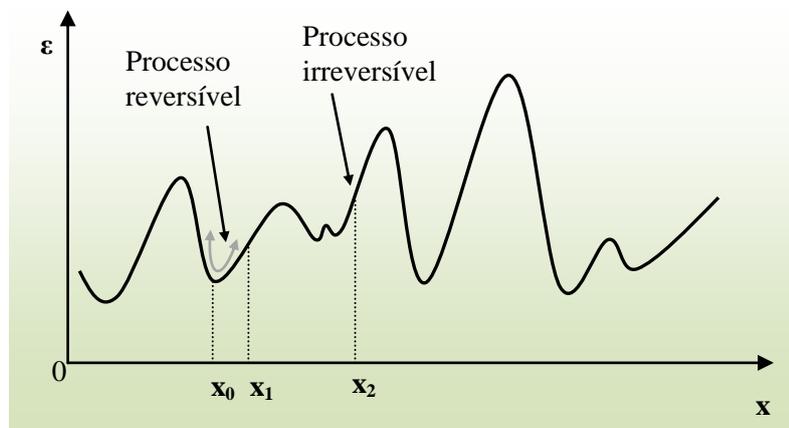
$$\Delta \varepsilon = -2\mu_0 M_x \Delta_x H \cos \theta \quad (13)$$

e com isso, determinar a pressão da parede de domínio sobre os obstáculos no limite em que a área Δ_x tende à zero,

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = -2 \cdot \mu_0 \cdot M_x \cdot H \cdot \cos \theta \quad (14)$$

Ao se deslocarem devido ao aumento da pressão ocasionado pela ação do campo externo as paredes de domínio podem encontrar regiões que dificultam sua passagem. Caso a parede não tenha energia suficiente para superá-las, ficará aprisionada. Esses locais são chamados de centros de ancoragem ou *pinning* [2] e [5]. Dependendo da intensidade do campo externo, as paredes podem apresentar dois comportamentos diferentes, que podem ser utilizados para determinar/avaliar se o processo de magnetização é reversível ou irreversível. Quando apenas a borda da parede fica aprisionada e sua superfície pode se mover livremente, possibilitando que a parede se deforme como uma membrana e preencha toda a região de aprisionamento, aumentando assim sua área e conseqüentemente sua energia magnética, tem-se um processo reversível porque a parede pode retornar a sua posição original com a diminuição do campo. Para o caso em que a energia externa aumente suficientemente a energia da parede, fazendo com que toda a parede salte o obstáculo, tem-se um processo irreversível [2]. A figura 6 ilustra mais facilmente o deslocamento irreversível de uma parede de 180° de um ponto x_0 a x_2 a partir da variação de sua energia.

Figura 6: Variação da energia de uma parede de domínio em função da posição em um cristal.

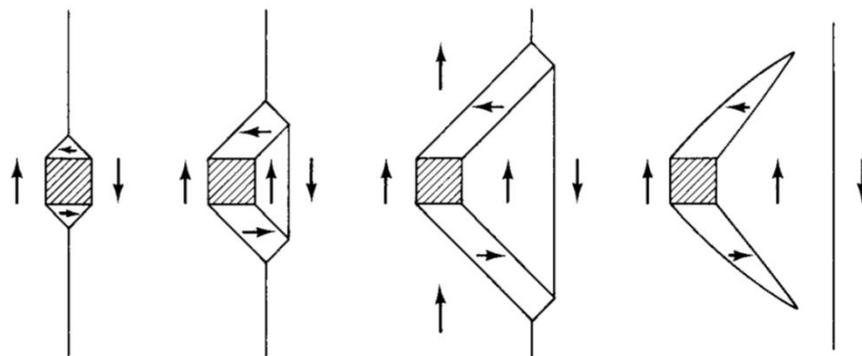


Fonte: adaptada de [2]

Na figura 6, x_0 é um ponto de mínimo local da energia, caso o campo externo não forneça energia suficiente para a parede atingir o ponto de inflexão² x_1 , oscilará em torno do ponto x_0 , sendo assim um processo reversível. Contudo, se em x_1 o gradiente da energia atingir um máximo local, uma nova elevação do campo deslocará a parede para x_2 . Cessando o campo externo em x_2 a parede não retornará ao ponto x_0 , acomodando-se no ponto de mínimo mais próximo, sendo por tanto, um processo irreversível. Os saltos de x_1 para x_2 são conhecidos como efeito Barkhausen e podem ser detectadas por meio de bobina sensível às pequenas variações no fluxo magnético. Os sinais de tensões capturados são chamados ruído magnético de Barkhausen (RMB).

Os maiores responsáveis pelo efeito de Barkhausen são os domínios de fechamento. Esse tipo de domínio tem a direção de magnetização perpendicular aos outros domínios, tendo na região de campo coercivo sua maior concentração. A Figura 7 ilustra o encontro de uma parede de domínio com uma inclusão sem propriedades magnéticas.

Figura 7: Passagem de uma parede de domínio por uma inclusão



Fonte: [3]

Observe que quando a parede encontra a inclusão o domínio de fechamento engloba toda a sua área. À medida que a intensidade do campo aumenta a parede se move por um processo de descolamento dos domínios, porém deixando domínios com direções perpendiculares ligados a inclusão. Todo esse processo é irreversível e, por isso, numa desmagnetização as paredes não retornam pelos mesmos caminhos, gerando uma histerese magnética.

² Ponto de inflexão: ponto onde a função muda de concavidade

2.2.1 Efeito de Barkhausen

O Efeito de Barkhausen é uma homenagem ao seu descobridor H. Barkhausen, que em 1919, observou que materiais ferromagnéticos submetidos a campos magnéticos variados emitiam ruídos sonoros e que os sons variavam de material para material a partir da utilização das mesmas frequências e/ou amplitudes. A origem destes ruídos foi associada a pequenas variações na densidade do fluxo magnético, e em consequência das mudanças descontínuas na direção de magnetização e movimentação de paredes de domínios, principalmente as de 180° [3].

Estas variações podem ser observadas ao longo da curva de histerese, surgindo como pequenos incrementos, com intensidade que aumenta nas regiões próximas ao campo coercitivo do material em análise [4].

2.2.2 Curva de magnetização

O ciclo de magnetização é uma forma de mostrar o comportamento dos materiais ferromagnéticos sobre ação de campo magnético externo para temperaturas abaixo do ponto de Curie. Essa curva é construída em um plano cartesiano onde o eixo horizontal representa o campo magnetizante, H , e o eixo vertical o campo induzido ou campo molecular B .

O campo B é um campo interno do material, sendo resultado do ordenamento dos domínios magnéticos na direção do campo H aplicado, estando a origem do campo H associada à existência de eletroímã ou ímãs permanentes.

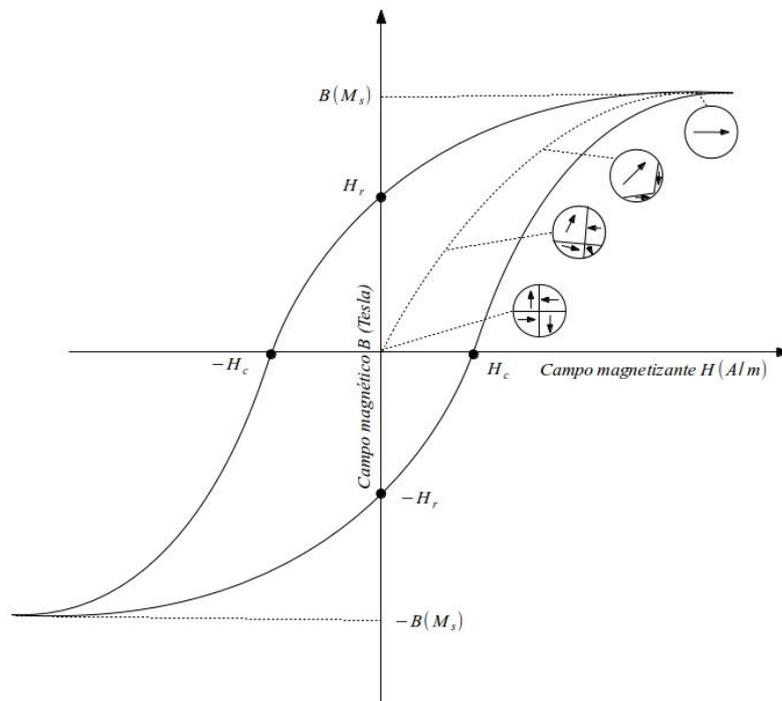
Quando o campo H é aplicado sobre um material ferromagnético inicia-se o processo de magnetização do material. Como citado no tópico 2.1.2, os domínios ou seus componentes magnéticos orientados nas seis direções possíveis de fácil magnetização crescem em detrimento dos demais, cessando quando o material atingir a saturação, ou seja, quando a amostra for um único domínio alinhado com o campo. Se o campo for removido, devido às perdas por histerese, os domínios não se ajustam na direção original, permanecendo o material magnetizado [6]. Desta forma o material passa a ter propriedades magnéticas mesmo na ausência do campo externo.

A partir de um valor de H o material torna-se magneticamente saturado e o respectivo valor no eixo vertical corresponde à magnetização de saturação M_s . Invertendo o sentido do campo H a partir de $H_{m\acute{a}x}$ até zero, o caminho percorrido pela curva de

magnetização não é o mesmo. Surge uma curva mais larga que representa as perdas energéticas. Essas perdas são originadas pelo aprisionamento das paredes de domínio, ocasionado pelo aparecimento de inclusões, precipitado, óxidos etc. e principalmente na passagem pelas fronteiras de grãos que são regiões de alta energia que propicia a nucleação ou aniquilação de domínios. Quando H se iguala a zero o material permanece magnetizado com um campo residual ou remanente H_r , e para zerá-lo é necessário inverter o campo a um valor de $-H_c$, e aplicá-lo na direção oposta ao campo remanente. H_c é chamado de campo coercitivo. Se continuar a magnetizar o material até o valor de $-H_{máx}$ e depois invertê-lo novamente para $H_{máx}$ passando antes por H_c , tem-se uma curva fechada chamada ciclo de ferro ou histerese magnética com informações sobre o comportamento do material.

A Figura 8 ilustra a curva de histerese para uma indução magnética H em relação ao campo gerado ou densidade de fluxo B para um material ferromagnético inicialmente desmagnetizado. Os valores de M_s e B são alcançados quando os domínios se ajustarem à direção de H .

Figura 8: Curva de histerese para amostra inicialmente desmagnetizada.



Fonte: Adaptado de [6]

A partir da curva de histerese é possível extrair informações sobre as características implícitas do material, como exemplo: as direções de fácil e difícil

magnetização, campo coercivo, regiões de perda de energia magnética, permeabilidade, susceptibilidade e, principalmente, as regiões de maior emissão de Barkhausen que correspondem à magnetização por movimento de paredes de 180° etc. Mais detalhes no próximo tópico.

2.2.3 Anisotropia magnética

A anisotropia magnética são regiões na qual uma propriedade física de determinado material tem valor diferente para diferentes direções do material. Por exemplo, quando a susceptibilidade magnética varia para diferentes direções dizemos que existe uma anisotropia de susceptibilidade. Existem três importantes tipos de anisotropia nos ferromagnéticos: anisotropia magnetocristalina, anisotropia magnetoelástica e anisotropia magnetoestática [7].

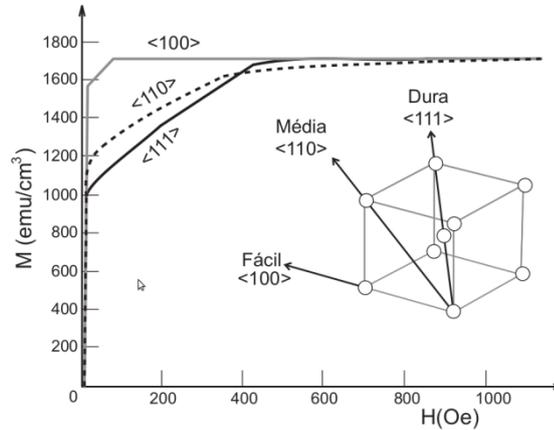
2.2.3.1 Anisotropia magnetocristalina

Em 1907, P. Weiss percebeu que materiais ferromagnéticos, mesmo na ausência de campo externo, devido a uma interação individual dos momentos magnéticos, exibiam propriedades magnéticas. A resultante de cada interação gera o chamado campo molecular que origina interações de troca direta entre spins de átomos ou íons vizinhos e faz com que, em certas regiões, os spins se ordenem paralelamente entre si, causando magnetização espontânea. No entanto, isso não ocorre ao acaso, pois a simetria da rede cristalina interfere no processo, forçando o alinhamento a ocupar a menor energia possível. Essa energia recebe o nome de energia magnetocristalina e a direção dos momentos magnéticos em que ela é mínima chama-se eixo de fácil magnetização. Por isso, para diferentes direções do material existe uma anisotropia magnetocristalina [8].

Considere uma indução magnética H aplicada ao ferro metálico à temperatura ambiente cuja direção de fácil magnetização é $[100]$. A saturação magnética ocorrerá mais facilmente ao longo desta direção. Já para o eixo de difícil magnetização ou magnetização dura $[111]$ exigirá uma quantidade maior de energia para que esse processo ocorra [2].

A Figura 9 mostra a relação entre um campo externo aplicado e as direções de fácil $[100]$, média $[110]$ e difícil $[111]$ magnetização para o ferro metálico CCC, cúbico de corpo centrado. A medida de energia magnetocristalina é determinada pela diferença entre as curvas fácil e difícil magnetização.

Figura 9: Direções de magnetização para o ferro metálico e sua dependência com a intensidade da indução magnética H para atingir a saturação.



Fonte: [2]

Pode-se também expressar a energia magnetocristalina (E_k) para um cristal cúbico simples magneticamente saturado por meio de cossenos diretores em relação ao eixo de magnetização,

$$E_{cubo} = k_{1cubo} V (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + k_{2cubo} V \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2, \quad (15)$$

onde V (m^3) é o volume do cubo, k_{1cubo} e k_{2cubo} são as constantes anisotrópicas de primeira e segunda ordem (J/m^3) e α_i são cossenos diretores³. Está equação vale para qualquer região de magnetização uniforme [8].

Para cristais uniaxiais, a energia magnetocristalina é descrita pelo seno do ângulo θ entre o eixo c e a direção de magnetização,

$$E_{uni} = k_{0uni} + k_{1uni} \text{sen}^2 \theta + k_{2uni} \text{sen}^4 \theta + k_{3uni} \text{sen}^6 \theta + \dots \quad (16)$$

Considerando apenas os primeiros termos da expansão e impondo que $k_{1uni} > k_{2uni}$ e $k_{0uni} > 0$ e $\theta = 0$, tem-se a energia mínima para determinado cristal. Por tanto, sempre

³ São os cossenos dos ângulos que a direção de fácil magnetização faz com os eixos cristalográficos

lembrando que k depende exclusivamente das propriedades anisotrópicas do material, a energia magnetocristalina,

$$E_{uni} = k_{0uni} + k_{1uni} \text{sen}^2 \theta \quad (17)$$

A energia magnetocristalina surge da interação entre o momento angular orbital com o campo cristalino, tendo o momento de spin interferindo por meio da interação spin - orbita [9]. A interação de troca entre átomos vizinhos é isotrópica, logo o aparecimento da anisotropia magnetocristalina está relacionado à interação entre o momento atômico orbital com as cargas da rede [2].

2.2.3.2 Anisotropia magnetostrictiva ou magnetoelástica

Quando um campo magnético é aplicado a um cristal ferromagnético suas dimensões sofrem modificações, ajustando-se para adquirir a menor energia de interação possível entre os momentos magnéticos. Contudo, esta energia depende da distancia e da orientação entre eles, logo qualquer mudança destes parâmetros acarretam alterações na forma do material e, conseqüentemente, nas propriedades magnéticas. A esse evento denomina-se anisotropia magnetostrictiva ou anisotropia magnetoelástica que é uma propriedade dos materiais ferromagnéticos [7]. Quando o campo magnético provoca um alongamento no material na direção de fácil magnetização ou paralela a ela será chamada, respectivamente, de magnetoestricção positiva ou negativa [8].

2.2.3.3 Anisotropia Magnetostática

Devido ao surgimento de uma interação dipolo-dipolo aparece uma energia magnetostática que divide espontaneamente grãos magnéticos maiores em grãos menores com diferentes direções dos momentos magnéticos. Essa energia é uma energia desmagnetizante com valor superior à energia magnetocristalina e torna a magnetização resultante praticamente nula [8].

2.3 Perdas Magnéticas

Quando se magnetiza um material ferromagnético até a saturação, tem-se uma energia magnetocristalina acumulada que pode ser máxima caso a direção do campo esteja na direção de difícil magnetização ou mínima, sendo na direção de fácil magnetização. Essa energia acumulada pode ser visualizada na parte superior na ascendência da curva de histerese, como se observa na Figura 10. Cessado a indução os domínios retornam as suas posições originais, devolvendo a energia recebida pelos processos reversíveis. Contudo, como se observa na Figura 11, a curva não retorna pelo mesmo caminho, existindo uma energia efetivamente dissipada [4]. Essa energia dissipada é chamada de perda magnética é definida como a área embaixo da curva, parte mais clara da Figura 11.

Figura 10: Energia acumulada

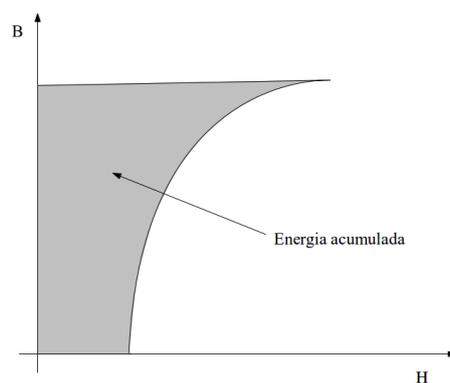
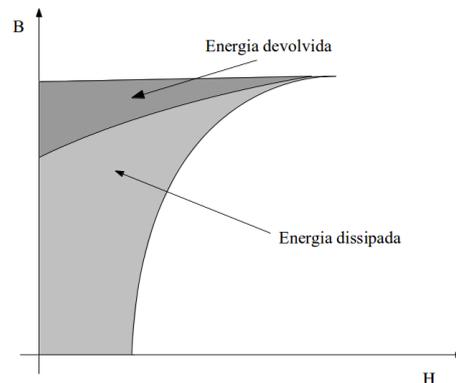


Figura 11: Energia dissipada



Fonte: [4]

Como citado anteriormente os processos de magnetização podem ser ocasionados por movimentação de paredes de domínio ou por rotação de momentos magnéticos, sendo o “joelho” da curva a região de separação dos dois processos [3]. A região abaixo do “joelho” está associada à magnetização brusca quando paredes de domínios de 180° e 90° encontram obstáculos que causam aprisionamento. O movimento de parede de 180° evidencia o comportamento anisotrópico magnetocristalino, enquanto o movimento de 90° , o comportamento anisotrópico magnetoelástico sendo ambos irreversíveis. Acima do “joelho” ocorre à rotação de domínio que é reversível, logo não há perdas de energia. Contudo, como se observa na Figura 11, há perda de energia nesta região. Atribui-se essas perdas ao movimento de paredes de 90° e ao movimento de paredes durante a aniquilação de domínios

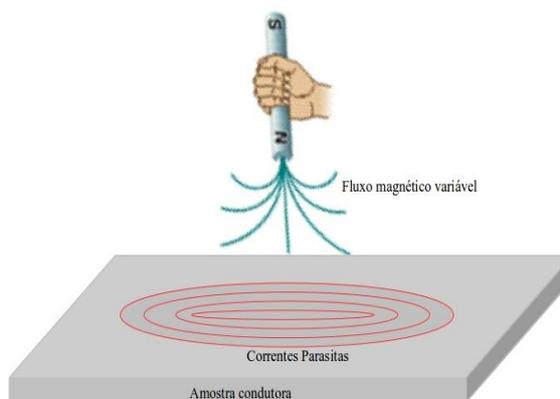
[4]. Assim, os movimentos de paredes de domínios são responsáveis por essas perdas magnéticas.

Associado ao movimento de paredes o aparecimento de correntes de Foucault e a nucleação de domínios completam os eventos que levam às perdas magnéticas.

2.4 Correntes parasitas ou correntes de Foucault

As correntes parasitas são explicadas pela lei de indução magnética que afirma que fluxos magnéticos variáveis aplicados a materiais condutores geram correntes elétricas induzidas que circulam em planos perpendiculares ao fluxo aplicado, ficando limitadas as regiões de aplicação do campo magnético. Estas correntes surgem como forma de resistência às mudanças do fluxo magnético sobre o material condutor. A figura abaixo ilustra este enunciado.

Figura 12: Indução por meio de imã permanente



Fonte: Adaptado de [10]

Michael Faraday, físico inglês nascido em 1791, percebeu que ao aproximar um ímã ou outro circuito com corrente elétrica de uma bobina conectada ao galvanômetro, uma deflexão ocorria na agulha. Ele então concluiu que as variações da indução magnética geravam uma força eletromotriz ε (*f.e.m*) como forma de resistência às variações do fluxo indutivo.

Em 1864, James Clerk Maxwell apresentou as equações que são consideradas os pilares para a compreensão dos princípios físicos das correntes parasitas, as chamadas

equações de Maxwell, são equações diferenciais que governam a variação do campo eletromagnético:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (18)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j}, \quad (19)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad (20)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \gamma, \quad (21)$$

sendo \vec{B} a densidade de fluxo magnético (T), \vec{E} , a intensidade do campo elétrico (C/m²), \vec{H} a indução magnética (A/m), \vec{j} densidade de corrente (A/m²), t o tempo em segundos e γ a densidade de carga (C/m³).

Para meios isotrópicos as relações descritas acima podem levar às equações lineares:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \quad (22)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}, \quad (23)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (24)$$

onde ϵ_0 é a permissividade do ar (F/m) e σ , condutividade elétrica (Ω^{-1}). Contudo, um comportamento não linear poderá surgir para algumas das três propriedades, embora para condutividade isso seja raro quando se trata de problemas com correntes parasitas. Para materiais magnéticos a não linearidade pode ser expressa por uma dependência da permeabilidade magnética,

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \vec{A} = -\vec{j}_s + i2\pi f \sigma \vec{A}, \quad (25)$$

onde \vec{A} é o potencial magnético, \vec{j}_s a densidade de corrente aplicada, e f a frequência de oscilação. Observe que o valor complexo descreve a densidade de corrente parasita gerado.

Em 1926, um instrumento desenvolvido por H. E. Kranz foi usado para medir espessuras de metais condutores elétricos [11].

Durante a Segunda Guerra Mundial (1939 – 1945) foram desenvolvidas técnicas sofisticadas não destrutivas utilizando correntes parasitas. Isso foi devido a uma demanda tecnológica industrial por novos meios preventivos de controle de falhas nos equipamentos [11].

A partir de 1950 foi desenvolvido um sofisticado equipamento de ensaio não destrutivo por Friedrich Förster que utilizava a variação de impedância a partir de um plano cartesiano cujos pares ordenados dependem de propriedades do material em análise e de características do circuito que contém a bobina magnetizante. Esse equipamento tornou-se a base para o desenvolvimento dos equipamentos atualmente em uso seja na indústria ou em laboratórios de pesquisas [11].

2.4.1 Princípios fundamentais

A técnica de inspeção não destrutiva por meio de correntes parasitas é sensível às propriedades físicas dos materiais inspecionados tais como: condutividade, permeabilidade, espessura da amostra, corrosão, estado de tensões, composição química, fases, tamanho de grãos, encruamento, tratamento térmico e descontinuidades, e dimensionamento representa uma importante e eficiente ferramenta para avaliações do comportamento microestrutural dos materiais.

O princípio básico para o aparecimento das correntes parasitas é a autoindutância eletromagnética. Nela uma bobina primária com uma corrente alternada, com determinada frequência e intensidade, gera um campo magnético primário alternado que ao encontrar o material em teste, seja ele ferromagnético ou não, gera uma corrente induzida alternada secundária que induz um campo magnético secundário sobre a bobina primária, diminuindo o campo magnético primário [12].

A autoindutância é uma reação que a bobina oferece como forma de diminuir a passagem da corrente na bobina. Essa reação recebe o nome de reatância indutiva X_L (ohms). Quanto maior a intensidade do campo secundário, maior será a reatância indutiva, assim mantendo o campo primário constante é possível identificar variação do campo secundário a partir das variações nas suas propriedades elétricas e magnéticas. Se a amostra não é ferromagnética e tem alta condutividade (σ) terá maior densidade de correntes secundárias o que acarreta maior interferência na bobina primária, caso contrário, com maior resistividade (ρ) a interferência será menor. Contudo, para materiais ferromagnéticos surgirá além do

campo secundário, um campo magnético interno que junto com o campo secundário irá interferir no campo primário. Para esse tipo de material, quanto maior for a permeabilidade magnética (μ) da amostra maior será a interferência no campo primário e, por isso, as medidas de correntes parasitas tornam-se mais imprecisas.

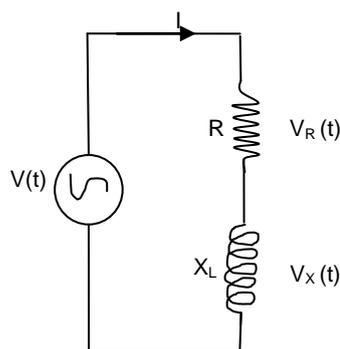
A resistência da amostra pode ser relacionada com a reatância indutiva da bobina sensora através de um plano complexo chamado plano de impedância Z (ohms). A impedância depende das propriedades elétricas que afetam a variação do fluxo magnético na bobina primária como a resistência do fio, reatância indutiva e resistência da amostra em teste:

$$Z = R + iX_L \quad (26)$$

As variáveis R e X_L representam, respectivamente, os valores da resistência e reatância indutiva tanto da bobina quanto da amostra em teste.

Para melhor compreensão observe a Figura 13 abaixo que representa um circuito elétrico resistivo e indutivo. Lembrando que os circuitos elétricos podem ser resistivos (composto de resistores), capacitivos (composto de capacitores), indutivos (composto de indutores) ou uma associação dos componentes elétricos citados anteriormente.

Figura 13: Modelo de um circuito indutor e resistivo para a geração de correntes parasitas.

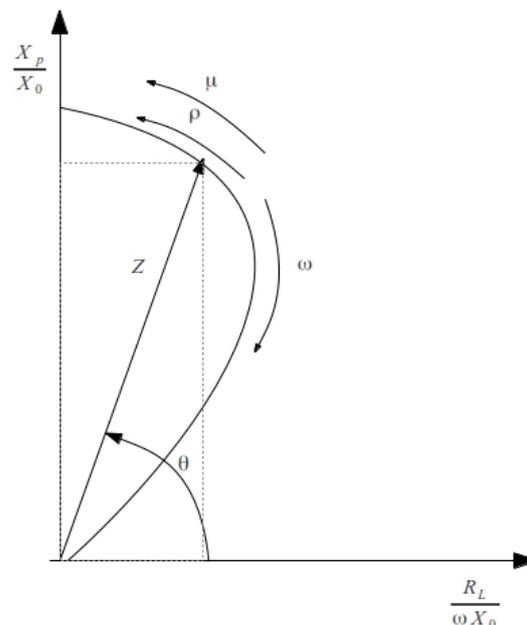


Fonte: própria autoria

As principais fontes de informações da técnica de correntes parasitas são obtidas por meio da resistividade e permeabilidade da amostra, no entanto para materiais ferromagnéticos, devido ao campo molecular e também pelo fato da permeabilidade ser mais

acentuado, as respostas à resistividade tem sinal fraco se comparado ao da permeabilidade [10, 13, 14]. Os sinais de correntes parasitas são obtidos a partir do plano de impedância Z que é um plano complexo, cujas componentes x e y representam, respectivamente, a resistência e a reatância do conjunto bobina-amostra. (vide Figura 14). Tais componentes são normalizadas por X_0 e ωX_0 de modo que as propriedades da bobina e do ar sejam desconsideradas e apenas as características da amostra são consideradas [15]. Ainda, como observado na Figura 14, para valores maiores da resistividade, ρ , e permeabilidade, μ , ocorre uma aumento do valor de impedância, enquanto a diminuição da frequência ω tem efeito contrário [16].

Figura 14: Plano de impedância Z com suas componentes: horizontal (real) e vertical (imaginária) normalizada.



Fonte: adaptado de [14] [15]

O valor de θ representa o ângulo de fase para o plano de impedância que também é influenciado pelas variações da microestrutura [16].

Cada ponto do percurso do arco é chamado de ponto operativo P , com valor relacionado às características da sonda e da amostra e o comportamento observável pela rotação do eixo do eixo z em relação às coordenadas vertical e horizontal. O ponto operante incorre a um valor mínimo ou máximo quando o eixo z está sobre o eixo vertical (ângulo $\theta =$

90°) ou horizontal (ângulo $\theta = 0^\circ$), respectivamente. A descrição matemática para o ponto operativo leva em consideração propriedades da sonda e da amostra,

$$P = \frac{\omega L}{R_A \eta_p^2}, \quad (27)$$

onde L é indutância da sonda, R_A , a resistência elétrica da amostra e η_p , número de espira da sonda de excitação. O ponto operativo é uma forma de entender o comportamento do arco de impedância. Tomemos a Equação 27 para análise, se consideramos ω , η_p e L como constantes, pois são fatores controláveis pelo ambiente, mantendo variável apenas R_A que agrega características da amostra, todo acréscimo em R_A implicará em diminuição do ponto operativo e conseqüentemente aumento de impedância.

2.4.2 Efeito película ou *skin effect*.

O efeito película é uma resposta do próprio material à indução eletromagnética e está de acordo com a lei de Lenz. Este efeito é uma resposta do campo magnético gerado pelas correntes parasitas que tem a mesma direção do campo magnetizante, porém com sentido oposto o que produz um campo resultante com intensidade menor e, por isso, as densidades de correntes parasitas não podem penetrar a grandes profundidades.

A densidade de correntes parasitas concentra-se, principalmente, perto da superfície da amostra, ou seja, próximo da bobina de excitação. Isso ocorre porque a profundidade de penetração é inversamente proporcional ao quadrado do produto da frequência de fase ω , condutividade e permeabilidade $\mu = \mu_r \mu_0$, onde é a μ_r permeabilidade relativa diferencial e μ_0 permeabilidade relativa no ar. Lembrando que a condutividade é o inverso da resistividade. As equações 28 e 29 descrevem, respectivamente, a densidade de correntes a uma profundidade x e a profundidade de penetração padrão δ [17, 18]:

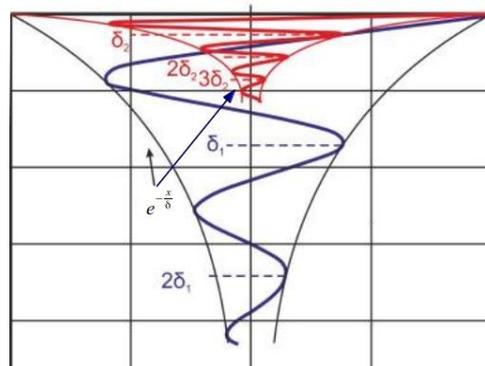
$$J(x) = J_{0,máx} e^{-\frac{x}{\delta}} \text{sen}\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right), \quad (28)$$

onde J_0 é a densidade de correntes na superfície e $\omega = 2\pi f$, e

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\omega \cdot \sigma \cdot \mu_r \cdot \mu_0}} \quad (29)$$

O comportamento das componentes da função que descreve o decaimento exponencial e o aumento da defasagem da densidade de correntes do material pode ser ilustrado pela Figura 15. Como as variáveis condutividade e permeabilidade são constantes para o mesmo material é possível alterar a profundidade de penetração padrão apenas variando a frequência de excitação. Para valores maiores da frequência, em vermelho, a profundidade padrão é menor que para frequência mais baixa, em azul.

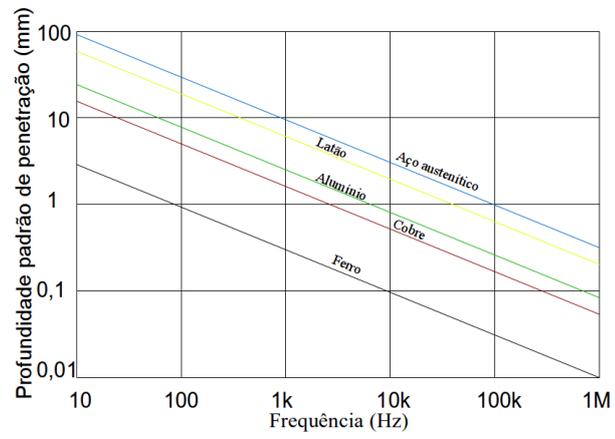
Figura 15: Dois valores para a profundidade de penetração padrão variando a frequência.



Fonte: adaptado de [10]

A profundidade de penetração padrão é definida quando a densidade de correntes, a uma profundidade x , diminui $(1/e)$ em relação à superfície, sendo $e = 2,71828182\dots$, ou seja, se reduz a 36,8%. A partir deste valor a sensibilidade do método torna-se questionável. Isso é justificado porque as respostas confiáveis da técnica dependem da densidade de corrente e a partir deste valor diminuirá rapidamente. Por exemplo, a 2δ ou $(1/e)^2$ reduz a 13,5% e a 3δ ou $(1/e)^3$ reduz a 5%.

O efeito película não se restringe apenas à limitação da técnica de correntes parasitas, ele também afeta a produção de informações obtidas através da técnica de RMB pelo mesmo motivo o campo de magnetização não consegue penetrar às regiões muito profundas o que torna a técnica limitada a poucos milímetros de profundidade. A Figura 16 mostra o valor de algumas profundidades padrão para alguns materiais.

Figura 16: Profundidade padrão de penetração em função da frequência**Fonte:** [16]

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Ensaaios não destrutivos

Ensaaios não destrutivos (ENDs) são técnicas de avaliação realizadas em materiais para verificar a existência ou não de descontinuidade, falhas ou defeitos. Existem diversos métodos de END sendo sua escolha de acordo com o tipo de informação que se deseja extrair. Ensaio visual, líquido penetrante, partículas magnéticas, ultrassom, radiografia industrial (Raios X e Gama), correntes parasitas (CP), análise de vibrações, termografia, emissão acústica, ruído magnético de Barkhausen (RMB) e estanqueidade são exemplos de ensaios não destrutivos.

Correntes parasitas e ruído magnético de Barkhausen são técnicas eletromagnéticas. A primeira só é aplicada a materiais condutores de corrente elétrica, enquanto que a segunda apenas a materiais ferromagnéticos.

Este trabalho concentrou-se na análise do comportamento microestrutural de um material ferromagnético, para isso, utilizou as técnicas CP e RMB em face as suas dependências com tais propriedades. Conforme dito no tópico 2.1.3, o RMB tem sua origem associada a pequenos deslocamentos de paredes de domínios para intervalos de tempo muito curtos, sendo por isso considerado uma técnica não destrutiva micromagnética. Quando a técnica depende de grandes deslocamentos de paredes de domínios que leva em consideração muitos grãos ou muitos domínios para tempos longos, passa a ser chamada macromagnética [19].

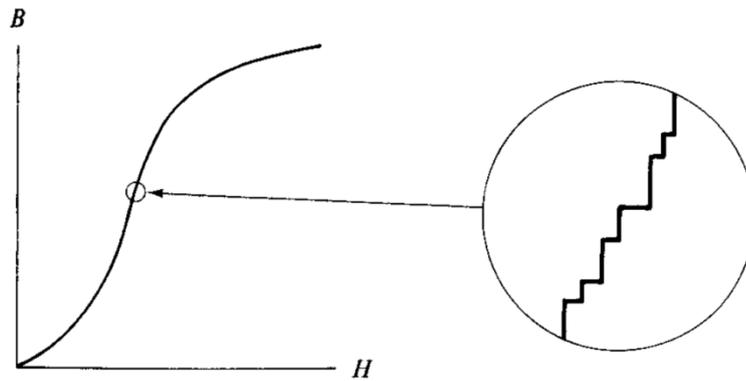
3.1.1 A técnica do RMB e a microestrutura

Os cristais reais apresentam defeitos nas suas estruturas que afetam suas propriedades mecânicas, elétricas e magnéticas. Podem ser de três tipos: pontuais, em linha e de superfície. Os defeitos pontuais mais comuns são as lacunas, átomos substitucionais e os interstícios. Em linha são as discordâncias em superfícies são os contornos de grãos [6]. Todos esses defeitos e imperfeições atuam de forma a dificultar a movimentação das paredes de domínio, necessitando campos externos cada vez mais intensos para superá-los.

O RMB é o resultado dos saltos abruptos que as paredes de domínios fazem ao encontrar esses pontos de ancoragem. Na curva de magnetização essas descontinuidades

aparecem como oscilações ao longo do percurso da curva, como observado na Figura 17 abaixo.

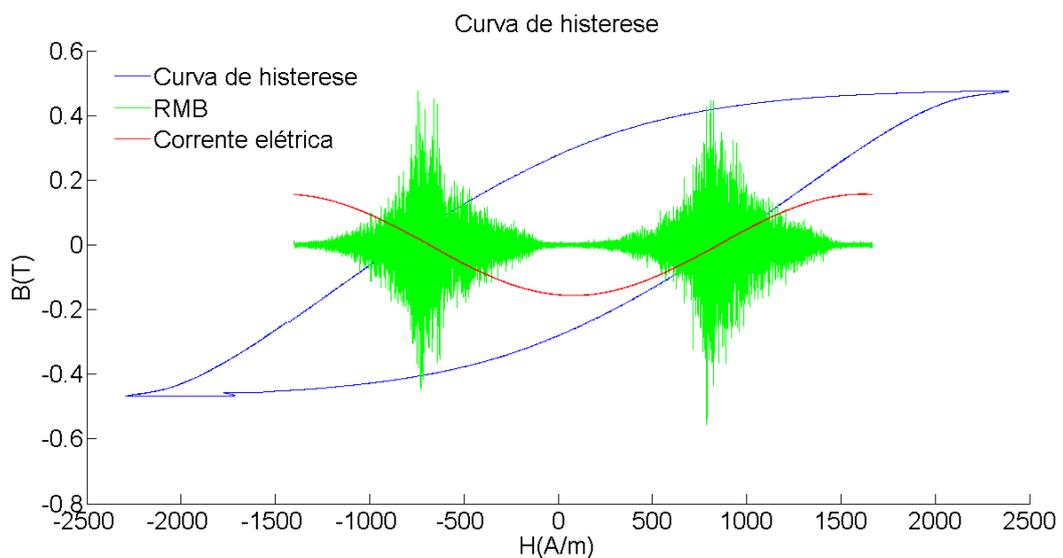
Figura 17: Saltos da curva de magnetização característico do efeito Barkhausen.



Fonte: [3]

As regiões na curva de histerese onde se concentram os maiores números destes eventos estão localizadas na região de campo coercivo [20]. Além dessa região, os pontos onde ocorrem nucleação e aniquilação também mostram certos números desses eventos tendo a nucleação, devido ao maior gasto de energia magnetocristalina, maior intensidade [4]. A Figura 18 ilustra as regiões de maior incidência de ruído de Barkhausen.

Figura 18: Curva de histerese com as regiões de maior incidência de RMB.



Fonte: autoria própria

A largura do campo coercivo depende da distância entre impurezas como os carbonetos e as inclusões: nitretos, óxidos e sulfetos [4]. Quando mais próximas elas estiverem, mais largo será o campo coercivo e, conseqüentemente, mais intenso será o sinal de RMB. Além da microestrutura, o RMB também é função do estado de tensão, composição química e dureza do material como será descrito nos tópicos seguintes.

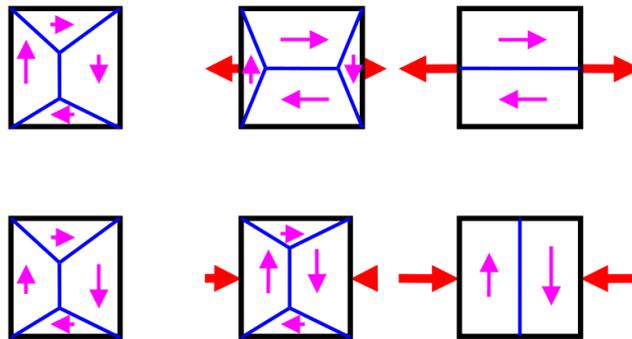
O método para capturar o RMB é fundamentado no princípio da indução magnética. Uma bobina indutora magnetiza o material com uma corrente elétrica alternada segundo uma função senoidal. Uma bobina sensora colocada sobre a superfície do material captura os pulsos elétricos causados pelos movimentos descontínuos das paredes de domínio. Esses pulsos representam o ruído magnético de Barkhausen.

A técnica de RMB tem um alcance limitado devido ao surgimento de densidades de correntes parasitas na seção transversal do material. À medida que se aumenta a variação do fluxo da seção homogênea do campo magnetizante diminui a profundidade de ação efetiva do campo.

3.1.1.1 Tensões mecânicas e o sinal de RMB

Os trabalhos produzidos até o momento mostram que existem dois comportamentos diferentes para as tensões mecânicas sobre o RMB. Para, [21] [22] e [23] quando a tensão aplicada é de tração os domínios magnéticos se alinham à direção da tensão aplicada. Esse efeito ocorre porque com o aumento da energia potencial elástica a microestrutura magnética se reorganiza para reduzir a energia total (energia magnetocristalina e magnetostática) do sistema. Esse efeito reflete-se com um aumento do número de domínios de 180° na direção da tensão em detrimento das paredes de 90°. Para [4] a tensão de tração gera uma direção de fácil magnetização na mesma direção da tensão aplicada, assim quando se mede a intensidade do RMB nessa direção, tem-se um valor mais elevado. Já para as tensões de compressão os domínios se ajustam perpendicularmente à direção da tensão aplicada, favorecendo a movimentação de paredes de 90°, conseqüentemente a diminuição do RMB [22, 24]. A ação da tensão mecânica sobre os domínios magnéticos recebe o nome de efeito magnetoelástico ou magnetomecânico. A Figura 19 ilustra como esse efeito ocorre.

Figura 19: Reorientação dos domínios magnéticos após sofre tensão de tração e compressão.



Fonte: [19]

A envoltória do sinal temporal do RMB após o incremento de uma tração mecânica muda de acordo com a intensidade da tensão aplicada. Para valores maiores de encruamento constatou-se uma elevação no pico da envoltória, sendo o limite entre a região elástica e plástica a que emitiu a maior amplitude. Contudo, quando a deformação alcança o regime plástico o valor do RMB diminui drasticamente [21, 24-26].

No trabalho de [27] o comportamento da tração foi semelhante aos trabalhos citados acima. Contudo, para valores mais elevados da tensão de compressão surgiu uma elevação de picos e em seguida o aparecimento de dois ou três picos para o mesmo material com tratamento térmico ou composição química diferente. Para [27] e [4] esses picos são oriundos da nucleação e aniquilação de domínios.

Os ensaios de RMB para este trabalho foram pautados nos diferentes comportamentos das paredes de domínio após o material passar por tratamento termomecânico.

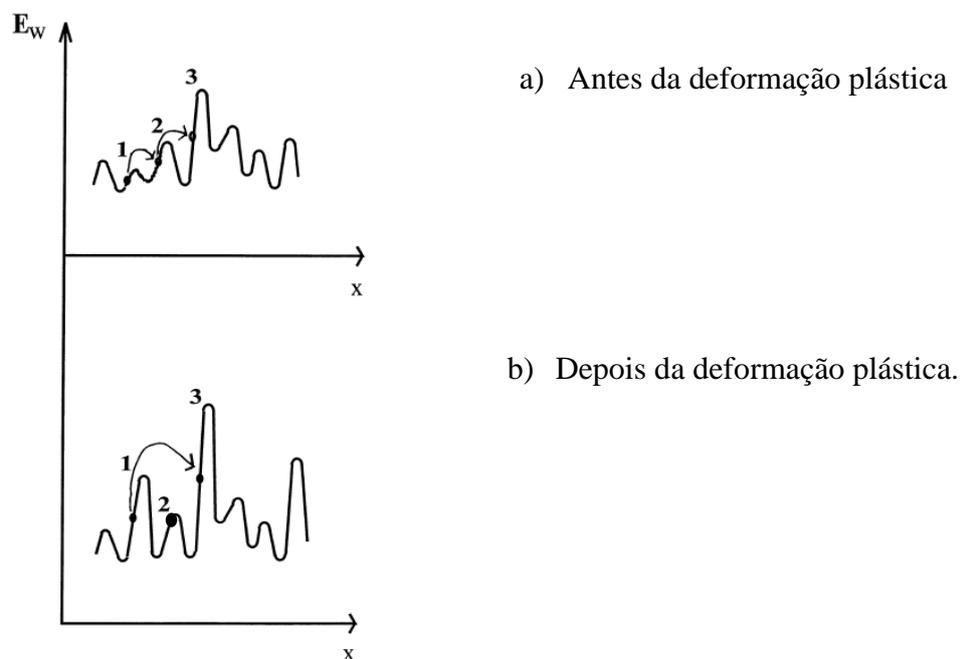
3.1.1.2 Deformações elásticas e plásticas

Como já foi dito antes, dentro da microestrutura existem regiões que dificultam a movimentação das paredes de domínios. Na maioria das vezes essas regiões são constituídas por discordâncias, oriundas de tensões locais. Havendo uma concentração de paredes de 180° e um elevado o número de discordância, decorrente de deformação elástica ou tratamento termomecânico, o aumento do sinal de Barkhausen é facilmente identificável, representando um auxílio na avaliação da microestrutura [25]. Quando se aplica uma tensão elástica na

região que concentra as maiores tensões local ocorre um aumento no deslocamento de discordância e no número de pontos de ancoragem à movimentação de paredes de 180° . À medida que a tensão aumenta os saltos tornam-se mais intensos, o que eleva a amplitude do envelopamento do RMB. Contudo, quando o número de pontos de ancoragem torna-se excessivamente elevado, as paredes de domínio não conseguem superá-los, havendo uma diminuição da intensidade do sinal de Barkhausen.

A partir da Equação 15, que descreve o movimento de paredes de domínio sobre ação de um campo magnético externo e do gradiente de energia em cada posição da parede, um aumento na deformação elástica também aumento do gradiente de energia magnética, sendo este crescimento compensado pela elevação na movimentação de paredes de 180° [25]. Quando do gradiente atinge um mínimo local esse aumento cessa, representando o aprisionamento definitivo das paredes de 180° . Neste momento apenas a movimentação de paredes de 90° torna-se possível. A Figura 3.4 ilustra esse comportamento.

Figura 20: Variação da energia E_w da parede em função da posição x : a) antes da deformação plástica, b) depois da deformação plástica.



Fonte: [25]

A pressão exercida pelo campo magnético aplicado na direção do ângulo θ com a magnetização tende a mover as paredes de domínio do ponto 1 para o ponto 2 e 3 (ver Figura

20). Quando ocorre uma deformação elástica ocorre um aumento na intensidade do gradiente de energia e da densidade de paredes de 180° nas regiões onde não existe homogeneidade na rede cristalina, ou seja, os planos são muito afastados o que possibilita o cisalhamento. Essa situação corresponde aos pontos 1 e 3 da Figura 20.

3.1.1.3 Tratamento térmico

O tratamento térmico tem efeito muito forte sobre o RMB, pois afeta diretamente os tamanhos de grãos que são centros preferenciais para a nucleação e aniquilação de novos domínios [28]. O crescimento de grão em amostras de aço por meio de tratamento térmico provoca um aumento na intensidade do sinal de Barkhausen [29]. Para LANDGRAF [4], que desenvolveu trabalho com aços elétricos, a explicação da dependência entre as estruturas de domínios e o tamanho de grão é manter a energia magnetostática constante, pois acoplado ao contorno de grãos pode existir o prolongamento de uma parede de domínio que separa dois polos magnéticos.

Um modelo matemático para os RMB que apresenta a dependência do tipo Hall-Petch⁴ com o tamanho médio de grão é [30],

$$RMB = C_g d_g^{-\frac{1}{2}}, \quad (30)$$

onde d_g é o tamanho médio do grão e C_g é uma constante dada por,

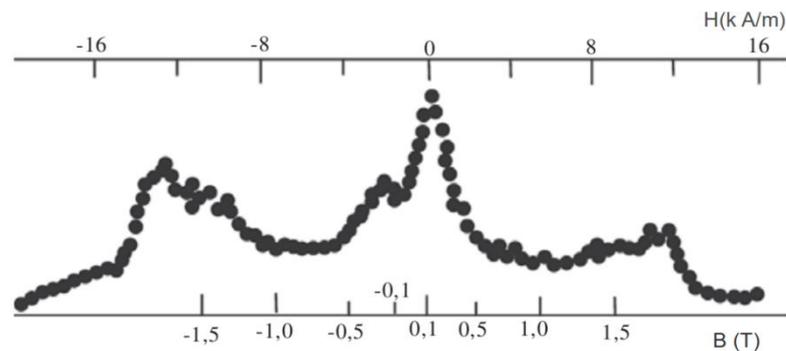
$$C_g = \frac{\left(\frac{dH}{dt}\right)}{8H_{m\acute{a}x}\sqrt{2\pi}} (N\Delta\phi) \left(\frac{C_v t_{total} \gamma^{\frac{5}{4}}}{I_s k^{\frac{1}{4}}}\right)^2, \quad (31)$$

sendo H a intensidade do campo de magnetização, N é o número total de impulsos sobre a amostra, $\Delta\phi$ a variação do fluxo magnético numa microrregião, C_v uma constante, γ é a energia por unidade de área da parede de domínio, I_s a magnetização de saturação e k é a constante de anisotropia magnética.

⁴ relação entre o tamanho de grãos com as propriedades mecânicas do material.

Quanto menor o valor médio do grão mais intenso será a emissão do RMB, isso porque com grãos pequenos haverá uma maior densidade de fronteiras ou contornos de grão, elevando o valor médio de nucleações e aniquilações de domínios magnéticos, já que esses eventos ocorrem preferencialmente nesta região devido à maior energia interfacial [28]. Em estudos feitos sobre o comportamento magnético em aços elétrico laminado, a região do campo coercivo concentra à maior fonte de informação para a técnica de RMB, visto que a largura do campo coercivo representa a distancia entre pontos de ancoragem [4]. Porém, os contornos, devido ao efeito da nucleação e aniquilação, também são fontes RMB, sendo a nucleação a responsável pelo maior pico. A Figura 21 ilustra esses eventos.

Figura 21: Eventos de Barkhausen na direção de laminação.



Fonte: [4]

No gráfico os intervalos de $-1,5\text{T}$ a $1,5\text{T}$ e -16kA/m a 16kA/m representam, respectivamente, a indução magnética e campo de magnetização. Observa-se que a maior intensidade para o pico é na região do campo coercivo, ou seja, entre $-0,5$ a $0,5$ T. Já nas proximidades de $-1,5$ e $1,5\text{T}$ surgem dois picos, sendo o de maior intensidade correspondente à nucleação de domínios e de menor para a aniquilação. A partir desses resultados é possível perceber que o tratamento térmico e tratamentos mecânicos afetam o sinal de RMB.

3.1.2 Composição química e as transformações de fase

Diversos trabalhos apresentaram justificativas para comprovar a dependência do sinal de RMB com a composição química e as transformações de fase. Por exemplo, uma composição de carbono em uma liga metálica pode ocasionar a formação de carbonetos devido ao envelhecimento magnético da amostra [31]. O acúmulo de carbonetos funciona

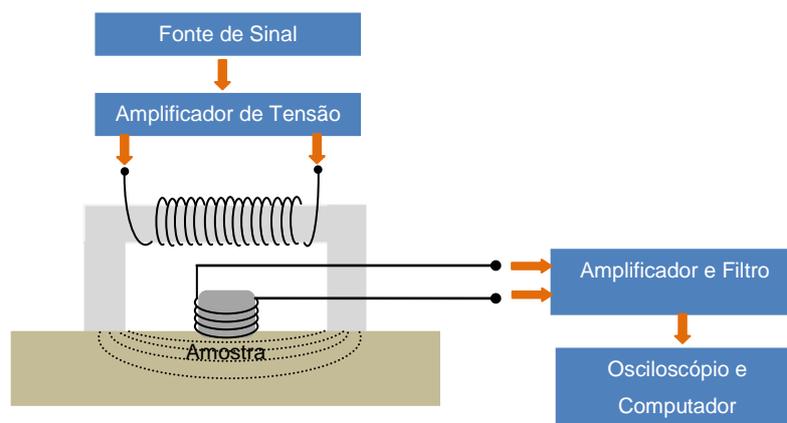
como pontos ancoragem ao movimento de paredes de domínio magnético e, como citado anteriormente, acarreta o alargamento da região de campo coercivo.

Sobre o comportamento do aço carbono depois de variados tratamentos térmicos para um mesmo aço os sinais de RMB não são os mesmos. Isso ocorre porque a formação de fases, tais como perlita, bainita ou martensita, altera de forma diferente a movimentação das paredes de domínio [32].

3.1.3 Sistema teórico para a medição do RMB

O sistema de medição do RMB é composto por: um gerador de funções senoidal ou triangular; um amplificador de tensão para aumentar a intensidade do sinal de tensão do gerador; um *yoke* constituído por uma bobina de magnetização enrolado sobre um núcleo ferromagnético em forma de U com alta permeabilidade magnética que serve para induzir um campo magnético variável sobre a amostra em teste; uma bobina leitora capaz de captar pulsos elétricos muito baixos emitidos pelas variações magnéticas causadas pela movimentação de paredes de domínio; um amplificador para que os sinais possam ser amplificados; um filtro passa-banda para eliminar algumas bandas de frequência desnecessárias; um osciloscópio; e um computador para o processamento dos sinais coletados. A Figura 22 abaixo ilustra esse esquema.

Figura 22 Modelo simplificado para medição do ruído de Barkhausen.



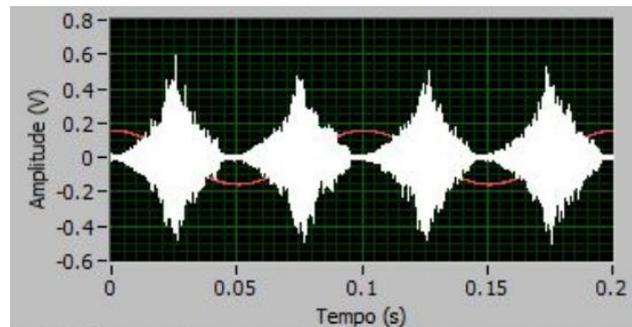
Fonte: Adaptado de [33]

Uma corrente elétrica variável no tempo de forma triangular é emitida pelo gerador de sinal e amplificada, e em seguida aplicada numa bobina do *yoke* posicionado sobre

a amostra [29]. Durante as oscilações magnéticas internas um sinal de tensão é capturado pela bobina sensora, em seguida amplificado, filtrado e depois projetado no osciloscópio. Após identificação do sinal foi processado e analisado em computador.

O RMB é no domínio do tempo, mas pode ser convertido para o domínio da frequência através da transformada de Fourier⁵. A Figura 23 ilustra o sinal de RMB e da corrente de excitação utilizada no procedimento.

Figura 23: Sinal de RMB (branco) e da corrente de excitação (vermelho).



Fonte: Equipamento Barktech do Laboratório de dinâmica e instrumentação - USP. [34]

3.1.4 Processamento dos sinais de RMB

O processamento dos sinais foi realizado com auxílio do programa MATLAB[®], que integra além do processamento de sinais a análise numérica de dados e construção de gráficos. A interface do programa, assim como a linguagem utilizada para gerar códigos, é intuitiva e de fácil compreensão.

Na literatura existem diferentes formas de processamento do RMB. Parâmetros estatísticos são largamente utilizados para o processamento e análise dos sinais de RMB. Classicamente os meios mais utilizados, tanto no domínio de tempo quanto no domínio da frequência, são: valor de amplitude e posição de pico, o valor *rms* (*root mean square*), análise de energia ou potência e espectro do envelope de sinal, curtose (*kurtosis*) e assimetria (*skewness*); espectro de frequência, diferentes tipos de banda e banda completa. Além destes, é possível, realizar uma análise tempo-escala por meio da transformada *wavelet* para separar as informações contidas no sinal emitido pela microestrutura e das tensões residuais.

⁵ Transformada discreta em representa a função em termos de base sinusoidal multiplicada por coeficientes.

Neste trabalho foram utilizados os parâmetros *rms*, energia do sinal, curtoses, assimetria, envelopamento do sinal e amplitude máxima e posição de pico a partir do envelopamento.

O uso da amplitude máxima de pico serviu para identificar, em cada amostra, os valores máximos do sinal de RMB para diferentes intensidades de correntes elétricas ou intensidade do campo induzido. Já o valor de *rms*, foi utilizado pelo fato de ser o modelo de análise mais utilizado na literatura para relacionar a influência da microestrutura [31], tamanho de grãos [28], concentração de carbono [32], anisotropia [35], defeitos e discordância com o sinal RMB. Contudo, não é sempre que se pode determinar as características microestruturais de um material com os parâmetros de *rms*, pois existem alguns tratamentos térmicos que comprometem sua eficiência [23]. Para resolver esse problema é preciso aplicar um método que seja sensível a qualquer alteração microestrutural independente do tipo de tratamento que amostra esteja submetida. Essa medida é o envelopamento do sinal como será citado em páginas futuras.

O valor numérico para o *rms* é definido a partir da equação 32 que representa a raiz quadrática do quadrático média para o sinal de RMB ao longo do tempo.

$$RMB_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (V_i - V_m)^2}{n-1}} \quad (32)$$

onde: RMB_{rms} é o valor de *rms* para o sinal de RMB;

V_i é a voltagem para certo intervalo de tempo;

V_m é o valor médio do sinal;

n é o número de pontos do sinal.

O sinal de RMB_{rms} tem média nula, logo esse é um valor equivalente ao desvio padrão das flutuações entorno da média.

Análise de potência serviu para medir a liberação de energia entre intervalos de tempos do sinal [36], enquanto que, o espectro do envelope, ou envoltório do sinal temporal, que é determinado pela transformada de Hilbert, foi utilizado para refinamento do sinal, com isso, pode-se localizar os parâmetros: amplitude e posição de pico, além da localização do campo magnético gerado pelo *yoke* [37, 38].

A potência ou energia do sinal de RMB sobre cada evento do sinal é calculada a partir da equação 33. Para uma análise mais esclarecedora pode ser feito uma normalização da energia em relação a cada ponto do sinal, desta forma fazer um comparativo com outros resultados menos precisos como a inferência do movimento de paredes de domínio entre as regiões de alta energia interfacial.

$$RMB_{energia} = \sum_{i=1}^n V_i^2 \Delta t \quad (33)$$

onde: V_i é tensão em um intervalo de tempo ou entre pontos do sinal;

Δt o intervalo de tempo ou inverso da frequência de amostragem;

n é o tamanho do sinal.

A partir do resultado da energia do sinal outro parâmetro pode ser encontrado. Esse parâmetro é a constante de anisotropia da amostra, k , que é determinada pela razão entre o valor do sinal de energia na direção de laminação com o valor do sinal na direção perpendicular à direção de laminação.

$$k = \frac{RMB_{energia}(0^\circ)}{RMB_{energia}(90^\circ)} \quad (34)$$

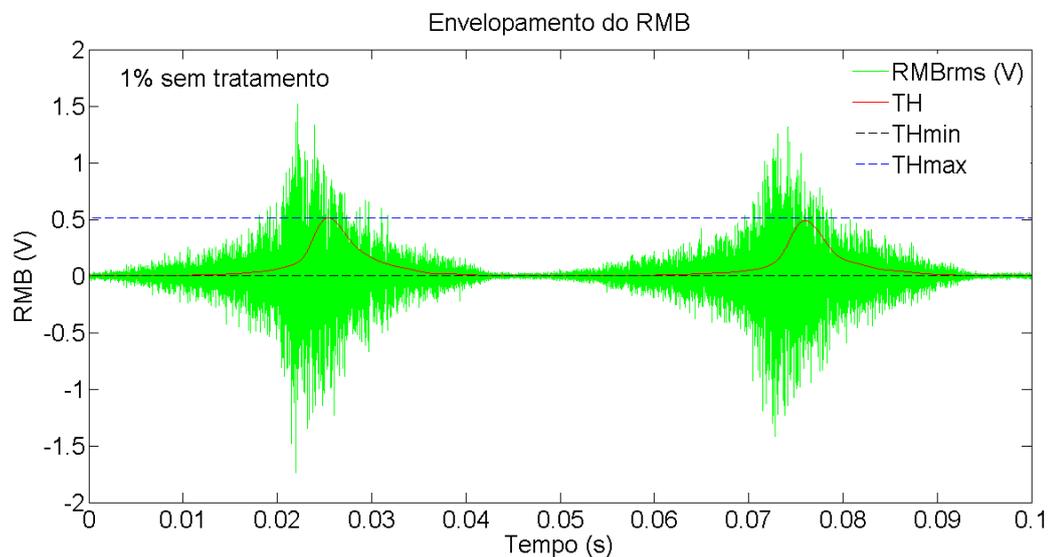
Já o envelopamento do sinal temporal que corresponde a um parâmetro matricial que se correlaciona com a microestrutura do material [25] é construído a partir da transformada de Hilbert (TH). Uma grande vantagem do envelopamento do sinal em relação aos outros parâmetros de avaliação do RMB é que ele tem um padrão que se modifica facilmente com qualquer alteração na microestrutura, facilitando o trabalho do avaliador [39].

Um sinal real é constituído de duas partes: uma parte real e outra parte imaginária que contem a transformada de Hilbert. A parte imaginária tem uma defasagem de 90° em relação à parte real que é corrigida na transformação de senos em cossenos pela TH [40].

$$H\{s(t)\} = \frac{2}{\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(t - n\Delta t) \frac{\sin^2(\pi n/2)}{n}, \text{ para } n \neq 0. \quad (35)$$

A transformada de Hilbert é útil porque retorna as partes mais importantes do sinal temporal que são a amplitude e a frequência do sinal. Além disso, a transformada de Hilbert associada a uma FFT (*Fast Fourier Transform*) remonta apenas as partes positivas do sinal [40]. Na Figura 24 a curva em vermelho foi construída através da transformada de Hilbert ou empacotamento do sinal temporal do RMB no intervalo de tempo de 0,1 segundo.

Figura 24: ilustração do sinal temporal de um RMB_{rms} após laminação e sem tratamento térmico para um intervalo de tempo de 0,1s (verde), uma TH (vermelho) do sinal de RMB_{rms} e seus valores de máximo (azul) e mínimo (preto).

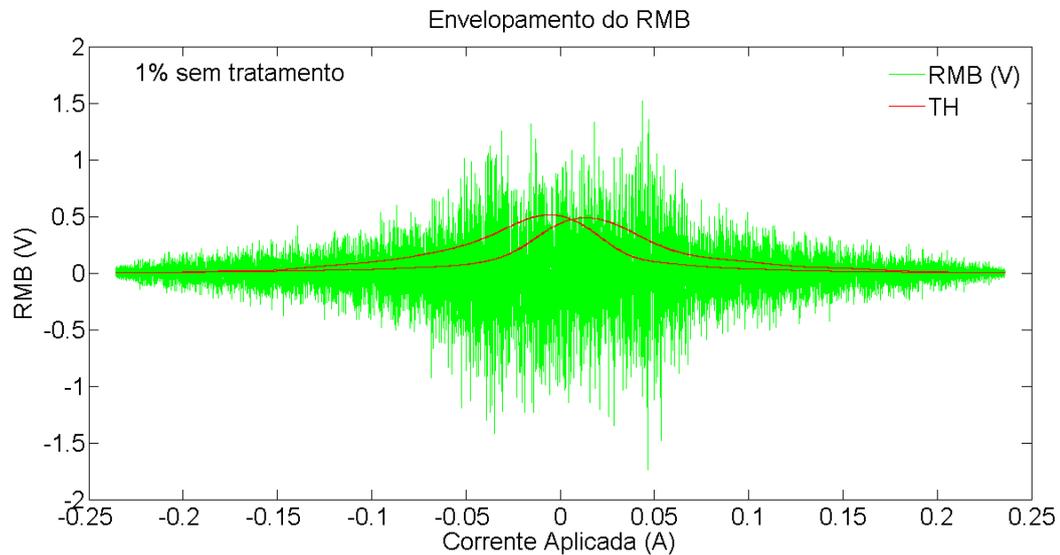


Fonte: Autoria própria

A região abaixo da curva de máximo para transformada de Hilbert que aparece na Figura 23 foi escolhida para a análise neste trabalho porque segundo [41] representa a faixa de pulso considerado como ótimo para avaliação do comportamento da microestrutura, principalmente para análise da variação de anisotropia do material, por isso a curva de TH não se estende além dessa região. Os valores das faixas acima da região de máximo de TH foram excluídos através de um filtro passa-baixo.

A Figura 25 foi construída a partir dos valores da Figura 24, com a diferença que o sinal de RMB foi construído em função da corrente que atravessa o *yoke* de magnetização. A Figura 24 mostra o envolvimento em conjunto com o sinal de RMB em função da corrente de excitação a amostra com laminação 1% e sem tratamento térmico cujo campo magnético aplicado está na mesma direção da laminação.

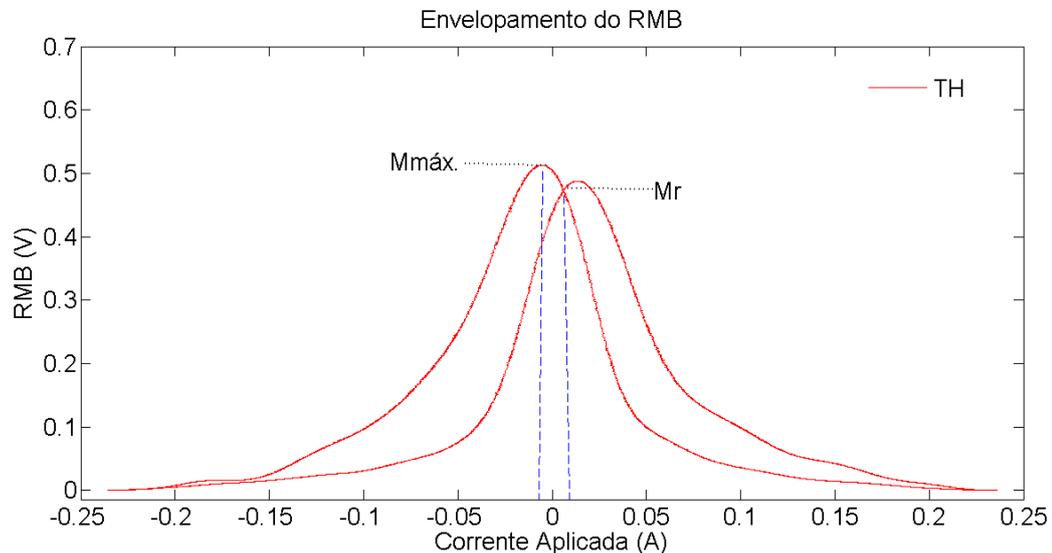
Figura 25: RMB em função da corrente de excitação sobreposto ao envelope do sinal.



Fonte: própria autoria

A Figura 26 apresenta apenas o envelopamento do RMB. Observe que existem dois picos e um ponto no gráfico onde as duas curvas se encontram. Nesse ponto o valor da corrente de excitação é aproximadamente nulo (M_r). Já o maior pico corresponde ao maior valor do sinal de RMB ($M_{m\acute{a}x}$). Como se observa esses dois picos localizam-se na região entre -0,05A e 0,05A que corresponde à região de campo coercivo. Quanto mais afastados forem esses picos, menor será a distancia média entre os pontos de ancoragem e as paredes de domínio. Um pico maior significa maior número de saltos na região do campo coercivo.

Figura 26: Sinal de RMB envelopado para uma amostra de aço ASTM A516 laminado e sem tratamento térmico de recristalização.



Fonte: Autoria Própria

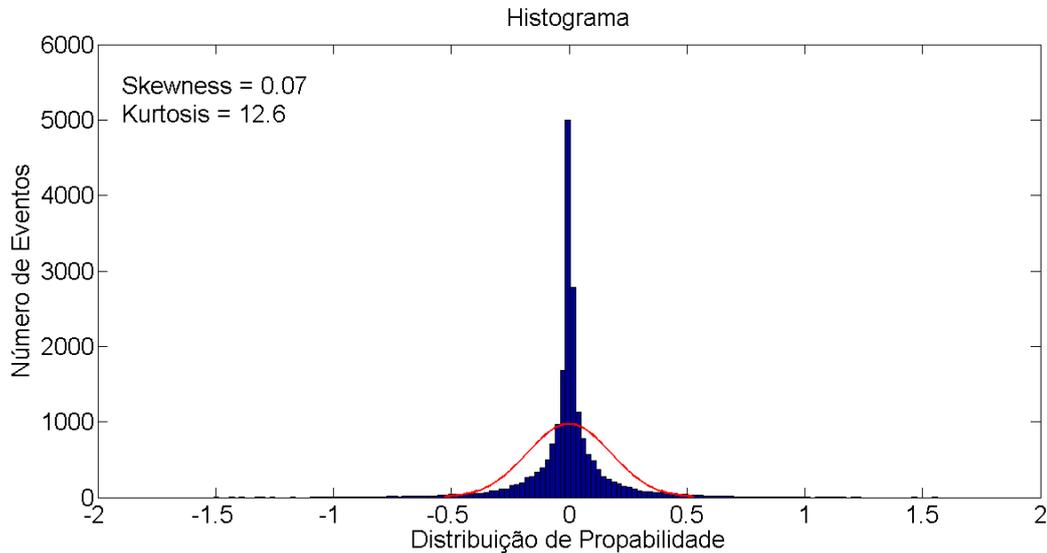
Para determinar a assimetria do envolvimento foi utilizado um método estatístico conhecido como assimetria (*skewness*). Neste método a inclinação do pico representa uma aproximação de uma simetria em relação à região de maior concentração de eventos dentro de uma população. Os valores que definem a assimetria são:

- entre -1 e 1 distribuição muito assimétrica;
- entre -1 e -1/2 ou 1/2 e 1 moderadamente assimétrica;
- entre -1/2 e 1/2 distribuição aproximadamente simétrica.

Os valores positivos representam uma maior concentração de eventos na região esquerda do gráfico, ou seja, com uma cauda mais longa ou enviesada à direita da distribuição. Esse tipo de gráfico recebe o nome de positivamente inclinado ou assimétrico à direita. Já os valores negativos correspondem a uma maior concentração de eventos na direita e cauda mais longa à esquerda, cujo nome correspondente é negativamente inclinado ou assimétrico à esquerda.

A melhor forma de demonstrar este tipo de gráfico é através do comando “histfit” do Toolbox do MATLAB[®], como se observa na figura abaixo:

Figura 27: Histograma para um número de eventos dentro de uma distribuição de probabilidade para um sinal de RMB na direção de laminação de um aço ASTM A516.



Fonte: Próprio autor

De acordo com a Figura 27 esse sinal se enquadra no perfil de aproximadamente simétrico, pois o valor da assimetria esta entre $-1/2$ e $1/2$.

A descrição matemática para assimetria, quando se conhece toda a população, é um momento estatístico de terceira ordem normalizado pelo cubo do desvio padrão.

$$s = \frac{1}{n \cdot \sigma^3} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^3, \quad (36)$$

onde: n é o tamanho do sinal, x_i é o valor de uma amostra da população, m o valor médio e σ é o desvio padrão [42]. Caso se conheça apenas uma amostra dessa população é preciso definir a simetria da amostra, definido por,

$$S = \sqrt{\frac{n(n-1)}{n-2}} s, \quad (37)$$

e S representa a assimetria da amostra [43].

Para determinar o grau de achatamento da função distribuição de probabilidade utilizou-se uma ferramenta estatística chamada de curtoses, definida como o momento

estatístico de quarta ordem normalizado pela quarta potência do desvio padrão [42] quando se conhece toda a população,

$$k = \frac{1}{n \cdot \sigma^4} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^4, \quad (38)$$

Caso se conheça apenas uma amostra da população é preciso corrigir o valor da curtose para qualquer valor da população. Para, pelo menos, quatro elementos tem-se a correção pela Equação 39 [43] e [42],

$$K = \frac{n-1}{(n-2)(n-3)} ((n+1)k - 3(n-1)) + 3 \quad (39)$$

Uma distribuição normal tem valor de curtose igual a 3 que recebe o nome de distribuição curtose mesocúrtica. Para valores maiores que 3 diz-se distribuição leptocúrtica, e platicúrtica para distribuição menor que 3.

3.2 Técnica de correntes parasitas e o tratamento térmico

Através da técnica de correntes parasitas, muitos autores têm desenvolvido trabalhos relacionados ao estudo das alterações microestruturais para diversos tipos de materiais como aço *maraging* [16, 44], zonas térmicas de soldagem em aço carbono [45], aço descarbonizado [46], aço inoxidável [47] [48], determinação da perlita em aço carbono [49] e ferro fundido [50]. Em cada trabalho os resultados obtidos contribuem para consolidar a técnica como uma importante ferramenta na avaliação microestrutural de materiais ferromagnéticos e não ferromagnéticos.

Quando uma amostra de aço fica exposta à alta temperatura, abaixo do ponto de fusão, mas acima da temperatura de recristalização por um tempo prolongado, inicia-se a liberação de energia de tensões das regiões de contorno de grão. A liberação desta energia junto com o movimento dos átomos para direções mais estáveis faz com que os contornos de grãos se movimentem na direção do centro de curvatura dos grãos menores. Desta forma, grãos maiores cresceram em detrimento dos menores. No final, tem-se uma amostra com grãos maiores [51]. Este aumento reflete-se pela alteração nas propriedades mecânicas como

aumento da tenacidade e diminuição resistência a tensão mecânica [51].

As regiões de contorno de grãos são os locais de maior energia interfacial [2], por isso, de maior acúmulo de obstáculos à passagem de corrente elétrica. Além disso, existe uma dependência linear do campo coercivo com o tamanho de grãos [52, 53, 54], e uma dependência linear da permeabilidade com o tamanho médio de grão [53]. Desta forma, é possível afirmar que o tamanho de grão afeta as propriedades eletromagnéticas.

3.3 Correntes parasitas e a composição química

Em muitos trabalhos tem-se relacionado o comportamento das correntes parasitas com as fases que se formam após tratamentos termomecânicos, principalmente em aço com grande concentração de níquel, devidos, principalmente, à facilidade na identificação das fases magnéticas em contraste com o restante do material que não é magnético [55].

A microestrutura esta diretamente relacionada com a composição química, pois as fases (ferrita, austenita, cementita e martensita) que se formam a partir de tratamentos termomecânicos determinam as propriedades físicas do material. Essas propriedades são: a resistividade elétrica, permeabilidade magnética e os estados de tensão, dureza dentre outras. Nos trabalhos que avaliam o comportamento de forma não destrutivas dos aços, busca-se sempre determinar ou comparar as reações das fases, assim como, das concentrações de carbono com as alterações que a impedância da bobina sofre, pois estas mudanças representam as relações de como a região externa à fase interna esta se comportando mediante variações do campo aplicado. Assim, pode-se determinar em que região da amostra as fases que surgiram com o tratamento termomecânico estão se concentrando. Além disso, é possível determinar a partir da intensidade da impedância o tamanho da fase.

3.4 Correntes parasitas e as tensões mecânicas

A permeabilidade do aço muda com o tipo de tensão e a direção da tensão aplicada [58]. Tensões de compressão dificultam a movimentação de domínio quando aplicada na mesma direção da magnetização, tornando a magnetização mais dura. Esse efeito causa uma diminuição da permeabilidade magnética. Já a permeabilidade em sentido oposto a força de tensão sofre aumento [59].

Defeitos pontuais diminuem a condutividade devido ao maior espalhamento de elétrons e permeabilidade devido ao aprisionamento dos domínios [60]. A origem destes defeitos ou a concentração deles em certas regiões está diretamente associada ao tipo de tensão externa que se aplica no material. Essas tensões podem ser de compressão como a laminação ou de tração.

3.4.1 Efeito *Lift-off*

Quando se aproxima ou afasta a sonda de magnetização da amostra ocorre uma variação da impedância que pode levar a uma avaliação errônea do resultado. Este efeito é chamado de *lift-off*. O avaliador que usa a técnica de correntes parasitas deve estar ciente deste efeito e restringi-lo o máximo possível para, com isso, evitar diagnósticos equivocados causados por este efeito. Para algumas situações como, por exemplo, na determinação de espessuras de tintas sobre superfície ou para avaliar superfícies irregulares o efeito *lift-off* poderá ser útil.

O enfoque deste trabalho não são camadas superficiais ou subsuperficiais, mas investigar variações internas das amostras e por tanto não foi utilizado *lift-off*.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Amostras e preparação das amostras

As amostras utilizadas para este procedimento foram do aço ASTM A516 grau 60. Esse material é muito utilizado na construção de tubulações industriais, e foi escolhido para este trabalho para dar prosseguimento às pesquisas anteriores iniciadas no laboratório. Além disso, esse material tem características que facilitam a magnetização, a caracterização metalográfica e processos de tratamento termomecânico. Sua composição química é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2: composição química do aço A516 grau 60.

Elemento	C	Cu	Si	Ni	Mn	Mo	P
%	0,2	0,3	0,4	0,3	0,5~1,4	0,08	0,03
Elemento	S	Ti	Al	V	Cr	Nb	Fe
%	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	Balanço

Fonte: [61]

Um número de treze amostras com dimensões de 12mm x 120mm x 110mm foram selecionadas. Essas amostras foram divididas em três grupos, e cada grupo foi submetido a um tipo de tratamento térmico e/ou mecânico. Uma amostra ficou na condição como recebida da fábrica (amostras de referência). A amostra de referência não sofreu nenhum tipo de tratamento.

Cada grupo contém um número de 04 amostras. No primeiro e segundo grupo as amostras passaram por um processo de laminação a frio com redução de espessura em relação à espessura original para os seguintes valores: 1%, 3%, 5% e 7% para cada amostra. Após a laminação as amostras do primeiro grupo juntamente com as do grupo três foram tratadas termicamente à temperatura de 912°C/1 hora (tratamento térmico) e, em seguida, retiradas do forno para resfriar a temperatura ambiente (normalização). Em seguida, as amostras do grupo três foram novamente tratadas termicamente, porém à temperatura de 750°C, mas por períodos de tempos diferentes (12, 24, 40 e 60 horas), sendo todas arrefecidas no próprio forno (recozimento).

Após o tratamento termomecânico todas as amostras foram polidas e atacadas com nital 4% e levadas ao microscópio óptico para análise metalográfica. O objetivo era determinar o tamanho e diâmetro de grãos em cada amostra. A Figura 27 mostra as micrografias de algumas amostras.

As Figuras 27a, 27c, 27e e 27g sofreram, respectivamente, redução de espessura de 1%, 3%, 5% e 7% e tratamento térmico com normalização. As Figuras 27b, 27d, 27f, 27h sofreram apenas redução de espessura de 1%, 3%, 5% e 7%, respectivamente. Já as Figura 27i, 27j não foram laminadas, mas sofreram dois tratamentos térmicos. O primeiro tratamento foi seguido por uma normalização e o segundo tratamento por um recozimento de 12 horas e 60 horas, respectivamente. Figura 27l apresenta a amostra de referência, ou seja, sem tratamento termomecânico. O método utilizado para determinar o tamanho de grão ASTM foi o do planimétrico de Jeffries (ASTM E112-10) onde se determina o livre caminho médio para encontrar os contornos de grãos. Maiores detalhes sobre esse método, assim como o número de grãos necessário para determinar o diâmetro médio de grãos para cada amostra, podem ser encontrados na referência. A Tabela 3 mostra o resultado dos diferentes tratamentos termomecânicos aplicado a cada amostra.

Tabela 3: Resultado encontrado com o método de planimétrico Jeffries (ASTM E112-10), (ST = sem tratamento térmico, CT = com tratamento térmico).

Tratamento	Tamanho de grão ASTM	Diâmetro médio de grão (μm)
1%CT	4,7	70,8
1%ST	4,7	70,6
3%CT	4,7	70,9
3%ST	4,6	71,0
5%CT	4,8	68,4
5%ST	5,2	59,8
7%CT	5,1	61,2
7%ST	5,1	61,3
12 horas	4,6	72,0
24 horas	4,6	73,6
40 horas	4,5	75,5
60 horas	4,4	82,6
Referência	4,8	68,7

Fonte: Próprio autor

Figura 28: Micrografias superficiais de algumas amostras

Figura 28a

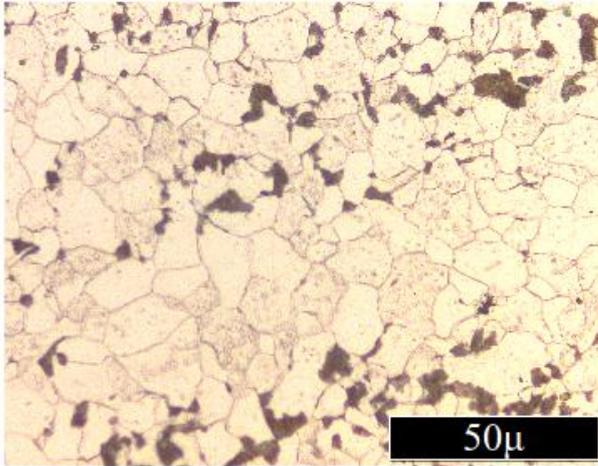


Figura 28b

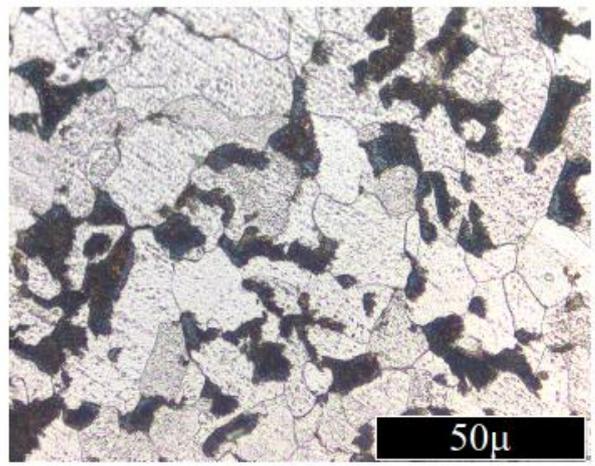


Figura 28c

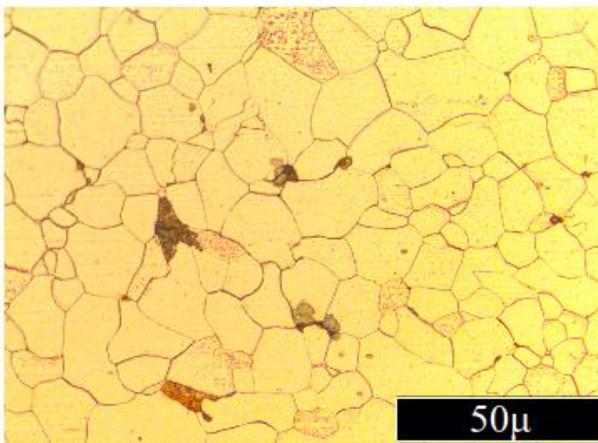


Figura 28d

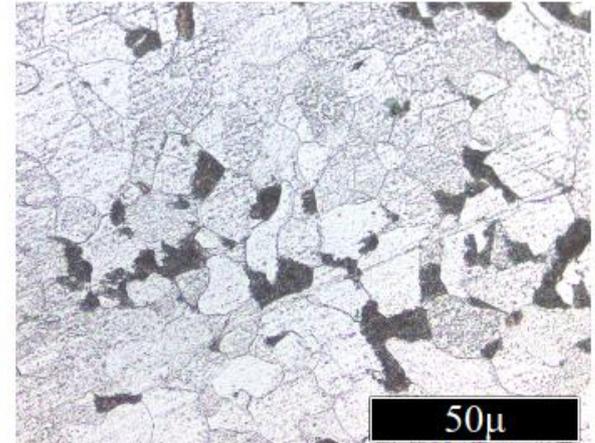


Figura 28e

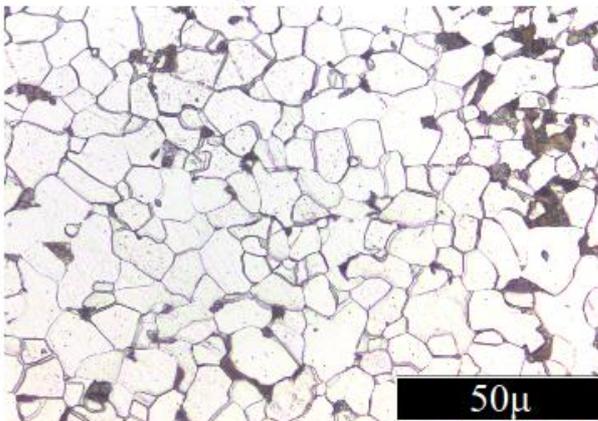


Figura 28f

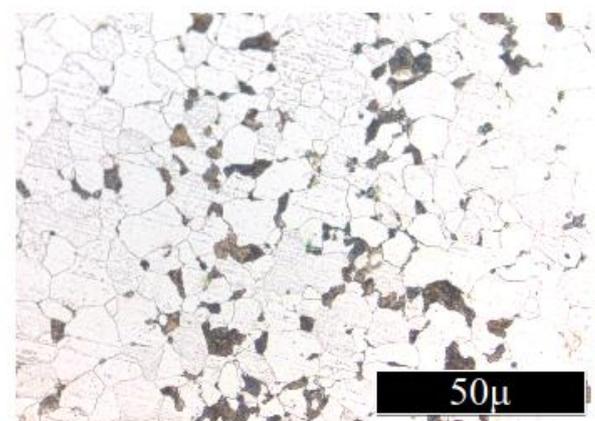


Figura 28g

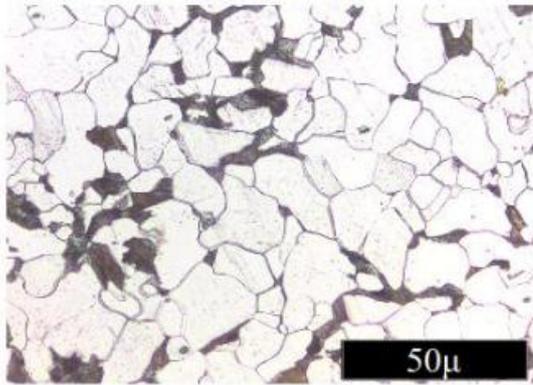


Figura 28h

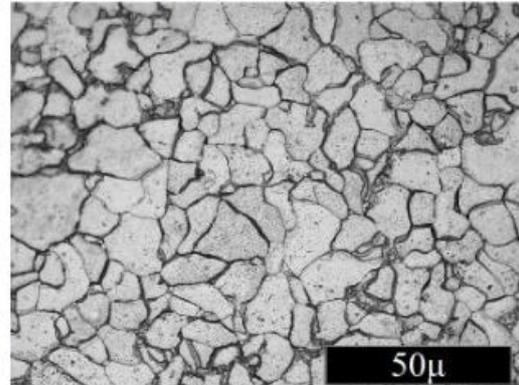


Figura 28i

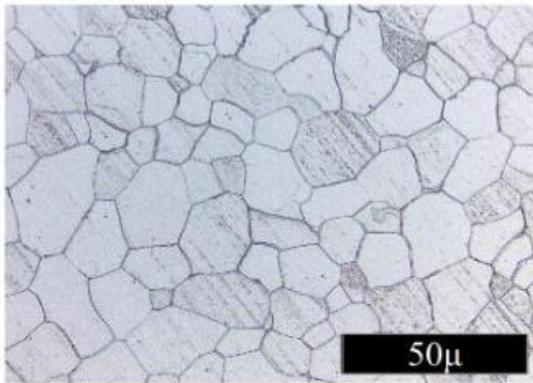


Figura 28j

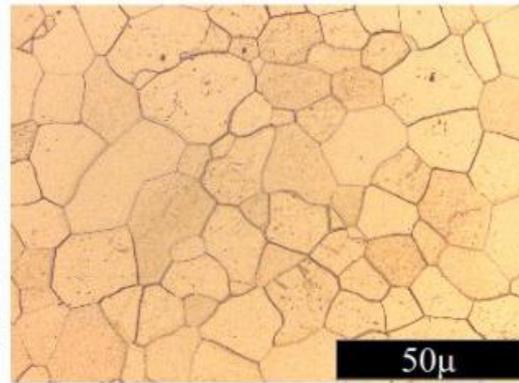
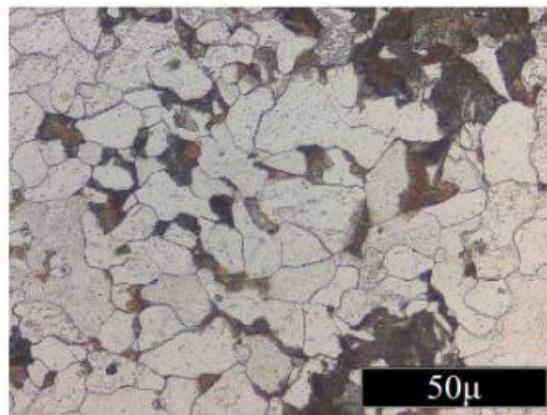


Figura 28l



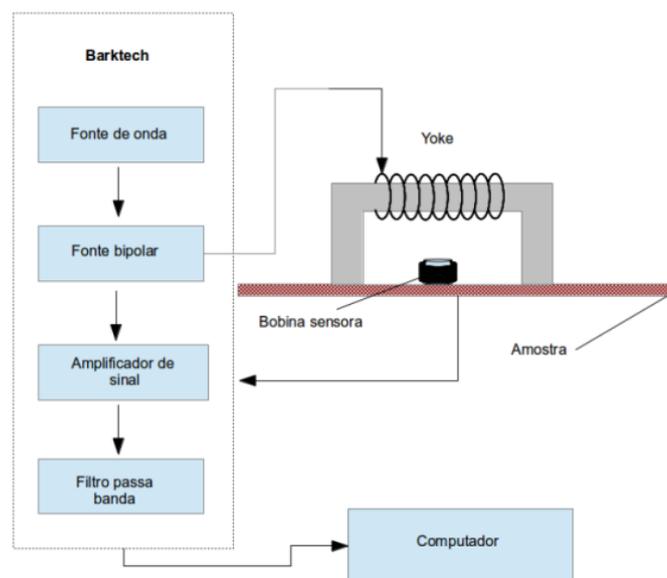
Fonte: Próprio autor

As micrografias mostram as diferenças entre os tamanhos dos grãos para cada amostra. As figuras acima revelam que o tamanho de grão variou de acordo com o grau de laminação e com o período de tratamento térmico.

4.2 Equipamentos experimentais utilizados

O equipamento desenvolvido pelo Laboratório de Dinâmica e Instrumentação (LADIN) da Universidade de São Paulo (USP) para a medição do RMB chama-se “Barktech” e é composto basicamente por uma unidade magnetizante (gerador de função e um amplificador bipolar), uma bobina sensora (sonda), uma unidade de amplificação e filtragem do sinal e um sistema de aquisição e processamento de dados (computador). A figura abaixo ilustra o esquema de funcionamento do Barktech, assim como seus componentes.

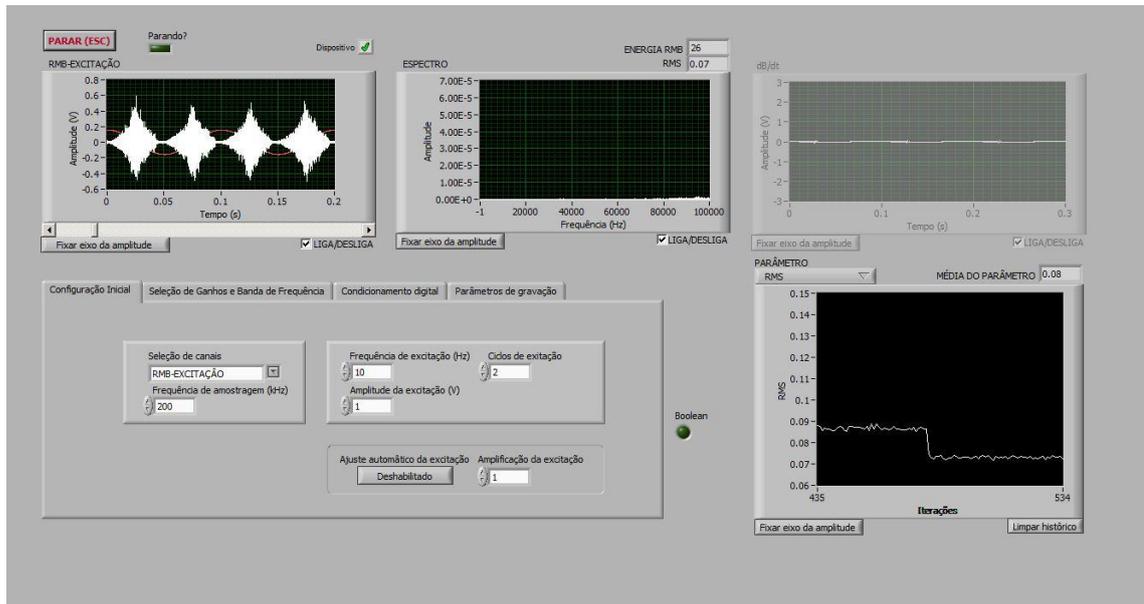
Figura 29: Ilustração das partes que compõem o Barktech



Fonte: adaptado de [34]

O Barktech funciona da seguinte maneira: uma corrente elétrica variável no tempo é produzida por um gerador de sinais e amplificada e atravessa a bobina posicionada em torno de um *yoke* constituído por um núcleo ferromagnético. Quando posicionado sobre a amostra, o *yoke* induz um campo magnético na amostra. O campo magnético alternado induz na amostra a movimentação de paredes de domínio que ao encontrar e saltar obstáculos causa pequenas variações no campo magnético. Essas variações são captadas por uma bobina sensora como sinal de tensão e enviadas a um osciloscópio que captura e converte em sinal de Barkhausen. A Figura 29 mostra a interface do equipamento Barktech.

Figura 30: Interface do equipamento Barktech

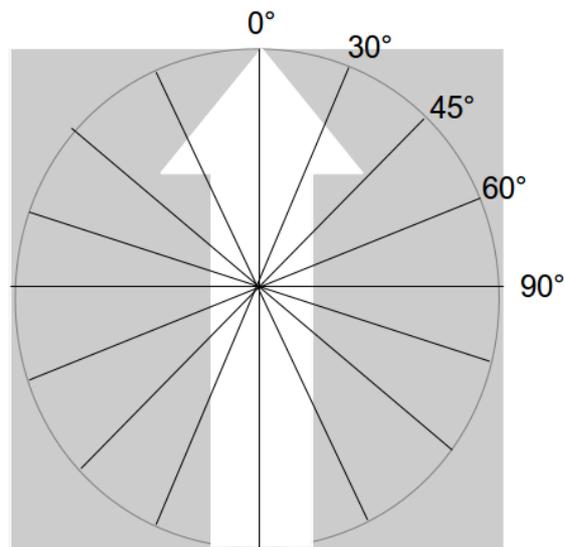


Fonte: LADIN – Laboratório de Dinâmica e Instrumentação – USP

Durante a captura dos sinais de RMB, ajustou-se o equipamento com a seguinte configuração: frequência de amostragem = 200 kHz, número de amostras na janela = 20000, frequência de excitação = 10 Hz, amplitude de excitação de 1,5V, ciclos de excitação = 1, ganho de RMB 10 dB, filtro passa-alto de 1 kHz, frequência de corte superior = 100kHz, frequência de corte inferior = 2 kHz, sem eliminação de ruído de fundo, amplitude de faixa de eliminação 0,2V, 10 repetições.

Nas superfícies das amostras foram desenhadas, com auxílio de uma régua e transferidor, retas que se cruzam no centro da amostra, conforme Figura 31. No centro da amostra ocorre a interseção de todas as retas. Cada reta tem uma rotação que varia de 0°, 30°, 45°, 60° até 90° em relação à direção de laminação. Essa marcação foi necessária para identificar as diferenças entre as intensidades dos sinais para um afastamento ou uma aproximação das linhas de campo magnético com a direção de laminação.

Figura 31: Desenho esquemático dos ângulos em relação à direção de laminação para uma amostra.



Fonte: Próprio autor

Os sinais foram coletados para rotações do campo de magnético de 0°, 30°, 60° e 90° em relação à direção de laminação (seta branca) para todas as amostras, exceto as do grupo três (não laminadas) e a amostra de referência. Para estas amostras a partir da captura dos sinais de RMB foi possível determinar a direção de anisotropia magnética e a direção de fácil magnetização.

Os sinais de saída do Barktech são: sinal da corrente de excitação, RMB, e o tempo. Além do sinal de RMB o equipamento também fornece uma curva de histerese com identificação das propriedades e valores dos campos molecular, coercivo e remanente referente à região onde se encontra o sensor, ou seja, uma curva de histerese localizada. Assim, é possível determinar com maior precisão o valor da permeabilidade magnética para cada amostra.

Para o ensaio por correntes parasitas apresentado na seção 2.3.1, utilizou-se o equipamento Omniscan MX RD/TECH que, conforme seção 2.3.1, exibe um plano de impedância com uma componente horizontal e vertical normalizados. As unidades de medida em cada eixo são ajustáveis para porcentagem (%) ou tensão elétrica (V). Já o ângulo de fase é medido apenas em graus (°). Para calibrá-lo, utilizou-se uma amostra de ferrita, sem defeitos, que acompanha o aparelho, peça de calibração. Com ela, pode-se ajustar o plano de

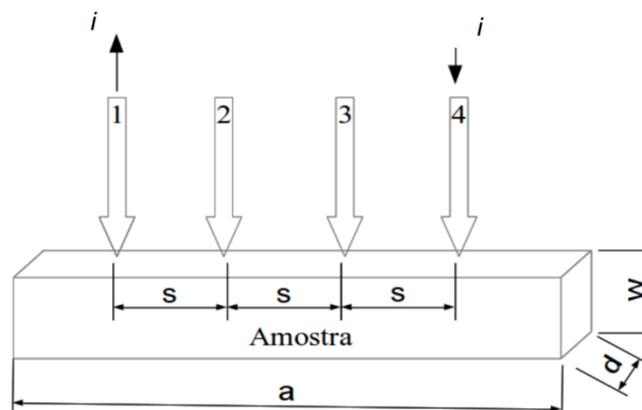
impedância para o primeiro quadrante. Já com a amostra de referência, pode-se limitar um valor máximo da impedância de pico a pico de 2,000V e ângulo de fase 278° , mesmo para as diferentes bandas de frequência. As frequências e os ajustes escolhidos para cada medição de CP são apresentados abaixo.

- Primeira medição: 1 Hz – ganho 50H/V – filtro média, passa baixo, 30 pontos;
- Segunda medição: 10 kHz – ganho 50H/V – filtro média, passa baixo, 30 pontos;
- Terceira medição: 100 kHz – ganho 50H/V – filtro média, passa baixo, 30 pontos.

Foram utilizados diferentes tipos de bobinas absolutas de superfície do tipo emissão/recepção (E/R), com faixa de operação entre 100 Hz a 500 kHz, conhecida comumente por “caneta”. Esse tipo de sonda foi escolhido por serem mais sensíveis às alterações na condutividade e/ou permeabilidades [10]. Nas regiões polidas das amostras foram marcados 10 pontos igualmente espaçados para captura dos sinais. Tomando-se o cuidado para que a marcação não interferisse no resultado, foram capturados 10 sinais de impedância e ângulo de fase para cada frequência. As 10 medições foram necessárias para calcular a média aritmética do sinal.

Para determinar os valores da condutividade de cada amostra, utilizou-se o modelo sonda quatro pontos. Este método foi desenvolvido para determinar a resistividade de materiais cristalinos, com formato regular, e consiste de 4 pontos de material condutor e igualmente espaçados [62].

Figura 32: Sonda quatro pontos para determinar a condutividade elétrica



Fonte: [62]

Neste tipo de teste uma corrente elétrica DC conhecida incide sobre os pontos externos (1 e 4). Entre os pontos internos (2 e 3) é gerada uma diferença de potencial que deve

ser medida com um voltímetro. Sabendo os valores de a (comprimento), d (largura), w (espessura) da amostra e s (espaçamento entre os pontos), pode-se determinar o valor de ρ (resistividade elétrica) para amostras retangulares e que tenha $w \geq s$, através de:

$$\rho = \frac{\varepsilon}{i} w F_1 F_2, \quad (40)$$

onde ε é o potencial entre os pontos internas e i a corrente elétrica entre os pontos externos. F_1 e F_2 que são fatores de correção descritos pelas equações 41 e 42 [62]:

$$F_1 = \frac{\pi}{\left\{ \left(\pi \frac{s}{d} \right) + \ln \left(1 - e^{-\frac{4\pi s}{d}} \right) - \ln \left(1 - e^{-\frac{2\pi s}{d}} \right) + e^{-2\pi \left(\frac{a}{s} - 2 \right)} \frac{\left(\begin{matrix} -6\pi s \\ 1 - e^{-\frac{6\pi s}{d}} \end{matrix} \right) \left(\begin{matrix} -2\pi s \\ 1 - e^{-\frac{2\pi s}{d}} \end{matrix} \right)}{\left(\begin{matrix} -2\pi a \\ 1 + e^{-\frac{2\pi a}{d}} \end{matrix} \right)} \right\}}, \text{ e } \quad (41)$$

$$F_2 = \frac{2s \ln 2}{w + 4s \left[\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{s}{w} \right)^2 + (2n)^2}} - \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2s}{w} \right)^2 + (2n)^2}} \right) \right]}, \quad (42)$$

sendo que a sonda deve ficar paralela ao comprimento a para obter um resultado mais preciso.

A medida da resistividade foi feita no sentido perpendicular a secção transversal da superfície da amostra de tal forma que as correntes parasitas passem perpendicular às lamelas deformadas pela laminação. Também foram feitas medidas na superfície da amostra só que estas se mostram praticamente constante sobre qualquer região.

Uma dificuldade encontrada com os resultados da sonda de 4 pontos foi localizar valores de referência para resistividade elétrica na literatura, ou seja, valores que possam ser comparados aos valores encontrados com a utilização do equipamento, e desta forma, minimizar os erros. Como não foi encontrado nenhum valor na literatura os valores mostrados

nos resultados para a resistividade são incertos ou imprecisos.

Para medir a permeabilidade foi usado um sistema artesanal, constituído por uma fonte de sinal de tensão, amplificador de sinal de tensão um *yoke* feito com fio de cobre e um osciloscópio. O sinal de tensão era enviado através do *yoke*, magnetizava a amostra que, em seguida enviava um sinal de tensão da magnetização própria para o osciloscópio num processo parecido com o Barktech. Os sinais de tensão coletados foram processados no MATLAB[®].

Conhecendo os valores da frequência de excitação, da permeabilidade magnética e condutividade é possível determinar em que profundidade os equipamentos estão trabalhando.

Para todos os equipamentos, exceto para determinar a permeabilidade magnética, não houve a necessidade de desmagnetizar as amostras, visto que as frequências de excitação foram muito baixas.

5. RESULTADOS

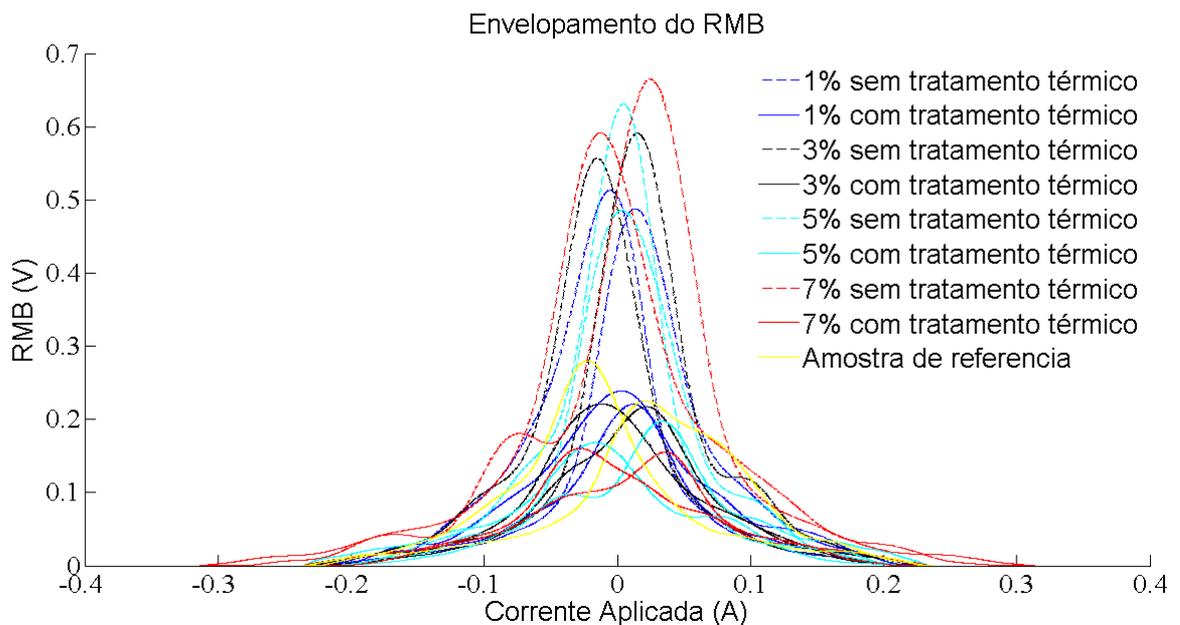
Como posto anteriormente, as amostras foram divididas em três grupos de 4 peças cada, adicionalmente uma amostra ficou como recebida para ser utilizada como referência, totalizando treze amostras.

5.1 Efeito da laminação sobre o envelopamento do sinal de RMB

Os resultados apresentados neste tópico estão relacionados aos efeitos da laminação sobre RMB, por isso, nesta etapa apenas as amostras dos grupos 1 e 2, referentes às amostras laminadas, foram consideradas.

Os sinais de RMB foram coletados para quatro diferentes orientações (0° , 30° , 60° e 90°) em relação à direção de laminação. A Figura 33 mostra vários sinais completo de RMB para a direção 0° do campo de magnetização em relação à direção de laminação. Observa-se que se formaram dois picos para cada amostra, sendo a amostra com maior perda de espessura a que exibe maior amplitude.

Figura 33: Envelopamento de RMB em função da corrente elétrica na direção 0° com a direção de laminação.



Fonte: Próprio autor

A Figura 33 apresenta um sinal com os dois picos, representando a maior intensidade do RMB que fica na região do campo coercivo, além disso, existe sempre um sinal com amplitude mais acentuada que o outro, correspondendo à região com menor concentração de pontos de ancoragem ao movimento das paredes de domínio.

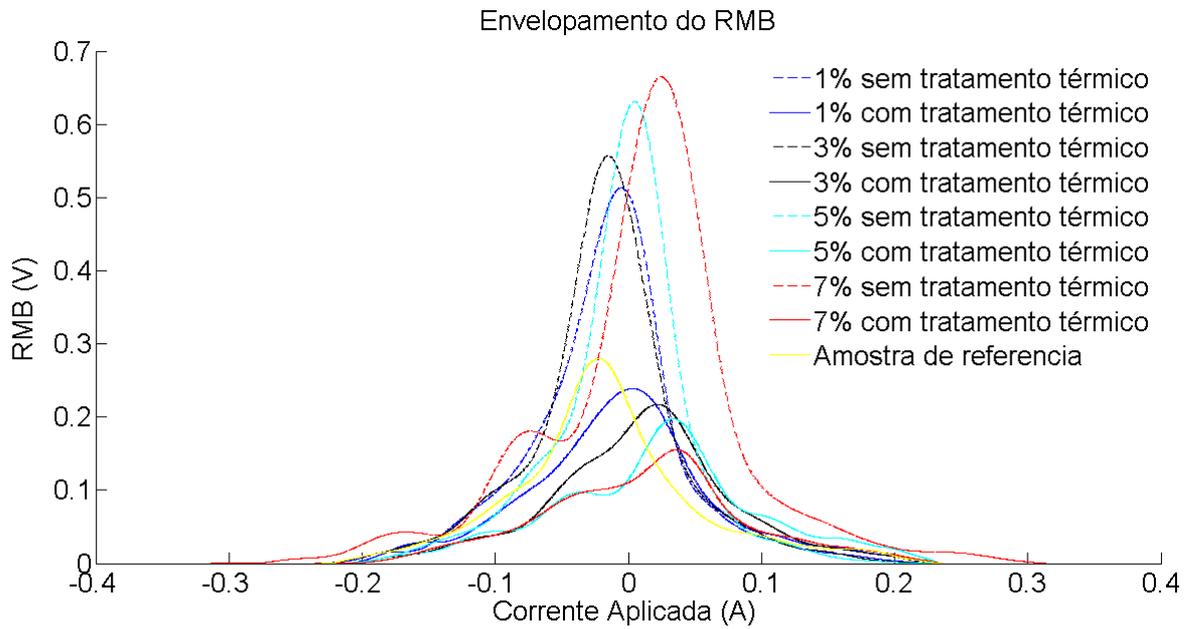
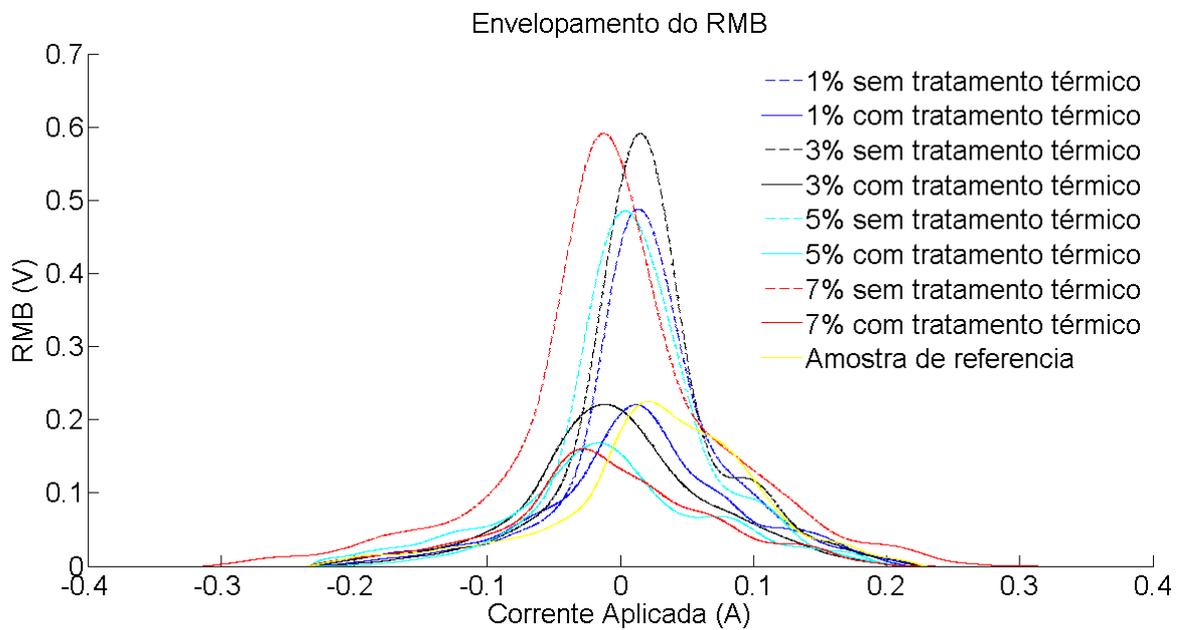
Ainda de acordo com a Figura 33, também é possível perceber que as amostras apenas laminadas estão com uma amplitude de pico maior que as amostras que, além da laminação, foram também normalizadas. Já a amostra de referência aparece como meio termo entre as outras amostras. Quanto maior o valor da laminação maior a amplitude de pico. Por outro lado, quando essas mesmas amostras são normalizadas apresentam grande redução na intensidade do sinal.

Considerado os primeiros picos do sinal de RMB para cada grau de laminação, observou-se uma diferença entre as amplitudes e posições dos picos. Como se observa na Figura 33, à medida que o grau de laminação aumenta, as amostras apenas laminadas têm uma elevação da amplitude de pico e um afastamento do pico no sentido da maior intensidade da corrente de magnetização. A amostra de 7% que tem uma amplitude de pico bem acentuada em relação às demais, a solubilização aumentou o estado de tensão interna como tensões residuais e discordância, dificultando o processo de rotação das paredes de 180° . Para a amostra de 7% normalizada tem-se uma intensidade mais baixa, pois com o aumento da energia térmica sobre a amostra há uma diminuição do número de pontos de ancoragem devido à maior liberação de energia de tensão acumulada nos contornos de grãos.

Como existe uma diferença bem acentuada entre esses dois picos é possível dividir o sinal em duas partes, assim analisar cada um deles separadamente, conforme Figuras 34 e 35 que são separações da Figura 33.

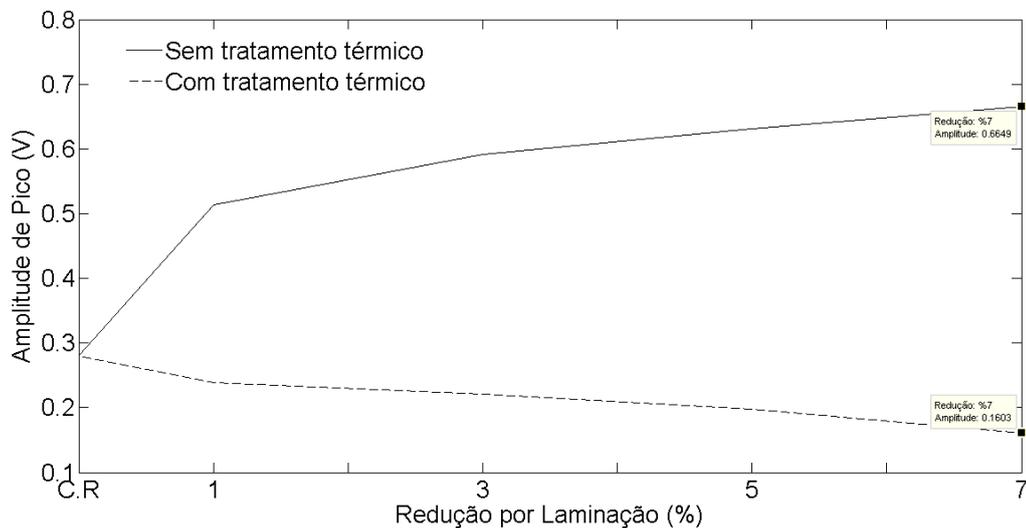
A Figura 35 apresenta as segundas amplitudes de pico da Figura 33. Como se observa ocorre uma diminuição da intensidade de pico em relação à Figura 34, além disso, a amostra de 5% sem tratamento térmico tem sua amplitude aproximadamente equivalente à amostra de 1%, mas com a posição de pico diferente. As amplitudes de pico das amostras sem tratamento térmico continuou maiores que as amostras com tratamento térmico.

Confrontando os resultados da Figura 34 e 35, observou-se que para a compreensão do comportamento da microestrutura das amostras para um tratamento termomecânico, obtém-se um melhor resultado para os primeiros picos do sinal, já que para as outras amplitudes de pico existe um comportamento irregular.

Figura 34: Sinal de RMB região inicial do campo coercivo.**Fonte:** Próprio autor**Figura 35:** Sinal de RMB região final do campo coercivo.**Fonte:** Próprio autor

A Figura 36 confronta os valores do envelopamento do sinal com a redução de espessura ainda para medidas realizadas na direção de laminação, ratificando o resultado citado anteriormente. A figura apresenta valores da amplitude de pico em função do grau de laminação. O ponto no gráfico igual ao zero de redução corresponde à amostra como recebida (C.R.) ou referência, os demais valores correspondem ao grau de laminação: 1, 3, 5 e 7%. A curva com linha contínua e seccionada corresponde, respectivamente, as amostras sem e com tratamento térmico após a laminação.

Figura 36: Relação entre o sinal de RMB com redução por laminação na direção 0°



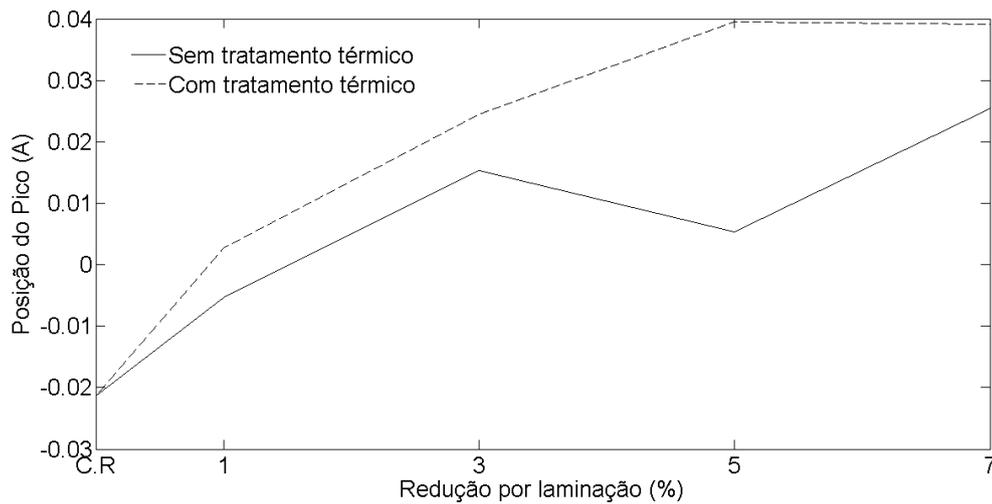
Fonte: Próprio autor

Como se observa, à medida que o grau de laminação para as amostras sem tratamento térmico aumenta a curva contínua da Figura 36 tende a aumentar, sendo mais acentuado para a laminação de 1% enquanto para as demais amostras a variação da amplitude cresce praticamente na mesma proporção. Já para amostras com tratamento ocorre o comportamento inverso.

A Figura 37 representa o comportamento da posição do pico para redução de espessura para dois tipos de amostras: com tratamento térmico (linha tracejada) e sem tratamento (linha contínua). Como se observa as curvas iniciam a partir do mesmo valor de corrente, porém com o aumento do grau de laminação os picos se deslocam para posições com maior intensidade da corrente, sendo as amostras com tratamento térmico as que apresentam maior deslocamento. Isso revela a existência de uma relação entre a posição do pico com a posição do campo coercivo [63, 64]. Observa-se também que amostras com

tratamento térmico atingem um valor de saturação para a corrente em 0,04 A e, a partir deste ponto, permanece constante, diferentemente da amostra sem tratamento térmico que em média tem sempre um valor crescente para a corrente elétrica.

Figura 37: Relação da posição de pico com a redução de espessura na direção 0°

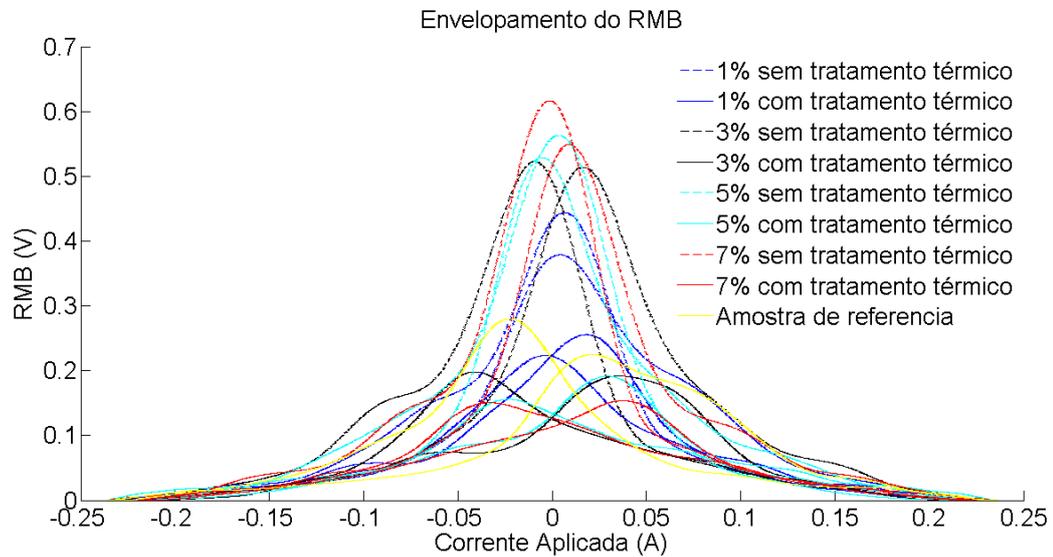


Fonte: Própria autoria

A Figura 38 mostra os envelopamentos dos sinais de RMB na direção de 30° com a direção de laminação. Como se observa na figura na direção de 30° ocorre um afastamento entre os picos máximos da região de campo coercivo em todas as curvas. Além disso, os dois valores das amplitudes de pico para cada grau de laminação se aproximam de uma mesma intensidade.

Ainda sobre a Figura 38 é possível notar que os valores das amplitudes de pico continuam a crescer com o aumento do grau de laminação para amostras sem tratamento térmico, mas diminuem para as amostras laminadas com tratamento térmico. Esse resultado é semelhante ao descrito pela Figura 33.

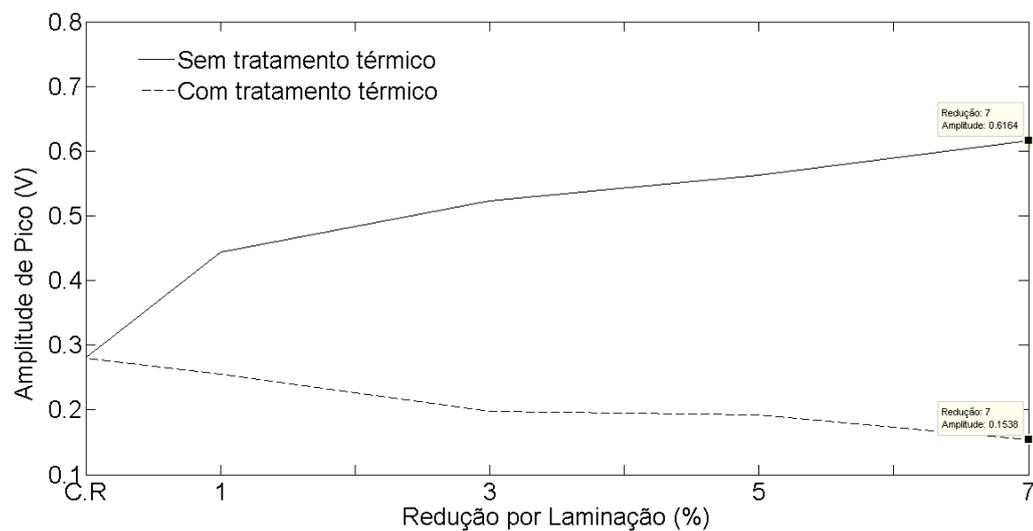
Figura 38: Envolvimento do sinal de RMB na direção de 30° com a laminação.



Fonte: Próprio autor

A Figura 39 apresenta o comportamento do sinal de RMB para a direção 30°, tendo um resultado semelhante ao da Figura 36. Como se observa o comportamento do sinal de RMB é semelhante entre as direções 0° e 30° em relação à laminação. A única diferença reside nos valores das amplitudes, porque na direção 0° tem intensidade maior no comparativo entre todas as curvas da direção 30°.

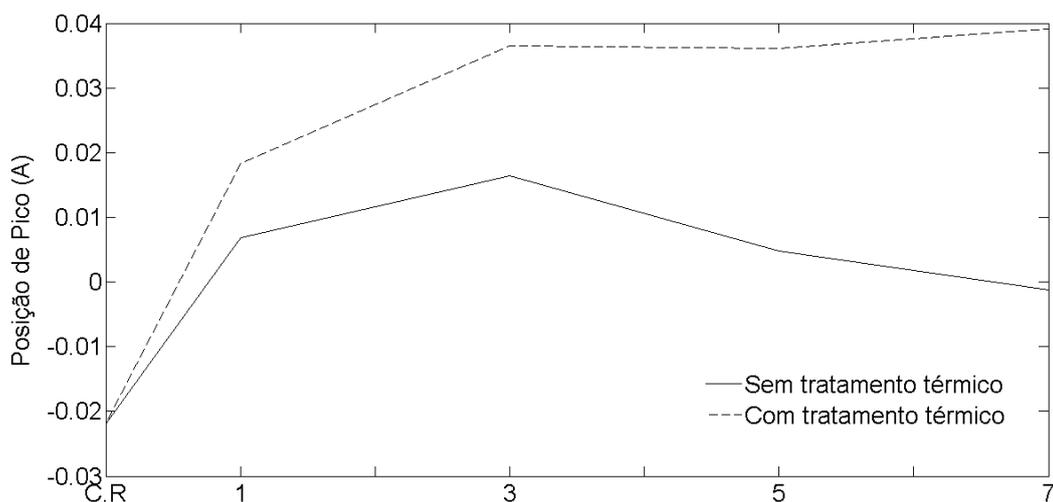
Figura 39: Relação entre o sinal de RMB com redução por laminação na direção 30°



Fonte: Próprio Autor

A Figura 40 representa o comportamento da posição de pico com o grau de laminação para o envelopamento do RMB na direção 30° com a laminação. Conforme figura, as amostras com tratamento térmico se deslocam para posições que correspondem a uma intensidade maior de corrente, enquanto as amostras sem tratamento térmico apresentam um crescimento até a laminação de 3% e, depois um decrescimento para 5% e 7% de laminação. As amostras com tratamento térmico, semelhante à Figura 37, atingem uma linearização aproximadamente em 0,04A, especificamente em 0,038A. Já as amostras sem tratamento térmico, diferentemente da Figura 37, tem um valor de saturação para a corrente elétrica 0,015A para 3% e, a partir deste ponto, a posição do pico retrocede.

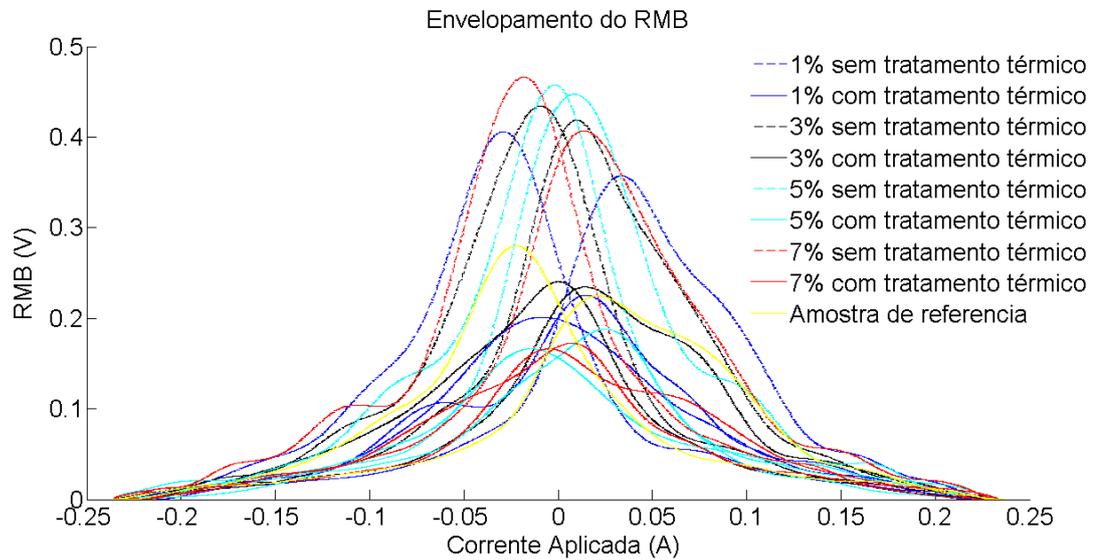
Figura 40: Relação entre a posição de pico e a redução de espessura na direção 30°



Fonte: Própria autoria

A Figura 41 mostra o comportamento do envelopamento do RMB para a direção de 60° com a laminação. Comparando o comportamento do RMB na direção 0° e 30° com a direção 60° é possível perceber uma diminuição da amplitude de pico para todas as amostras. As posições de pico não estão seguindo alterações regulares. Tanto a distância entre os dois picos quanto à posição de encontro entre as curvas estão crescendo.

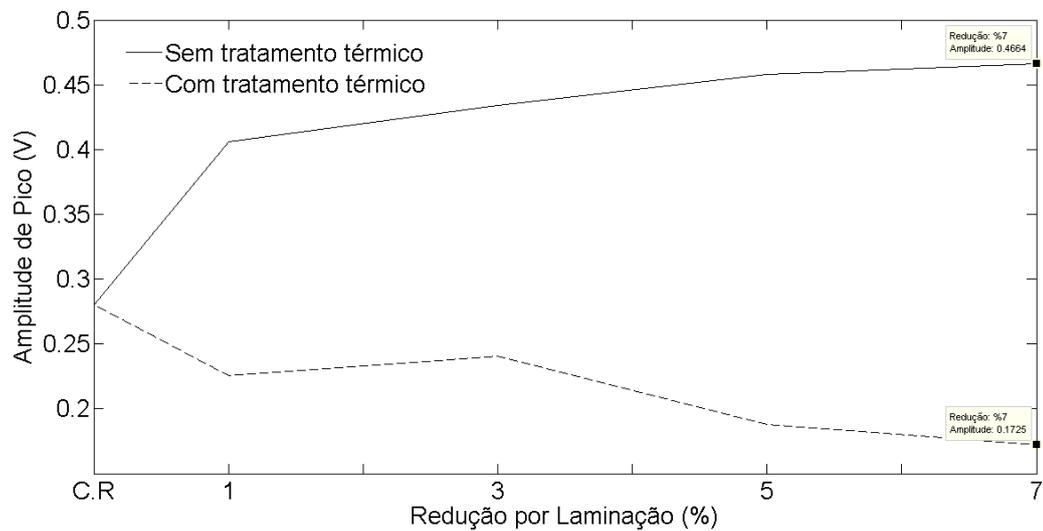
Figura 41: Envolvimento do sinal de RMB na direção de 60° com a laminação



Fonte: Próprio autor

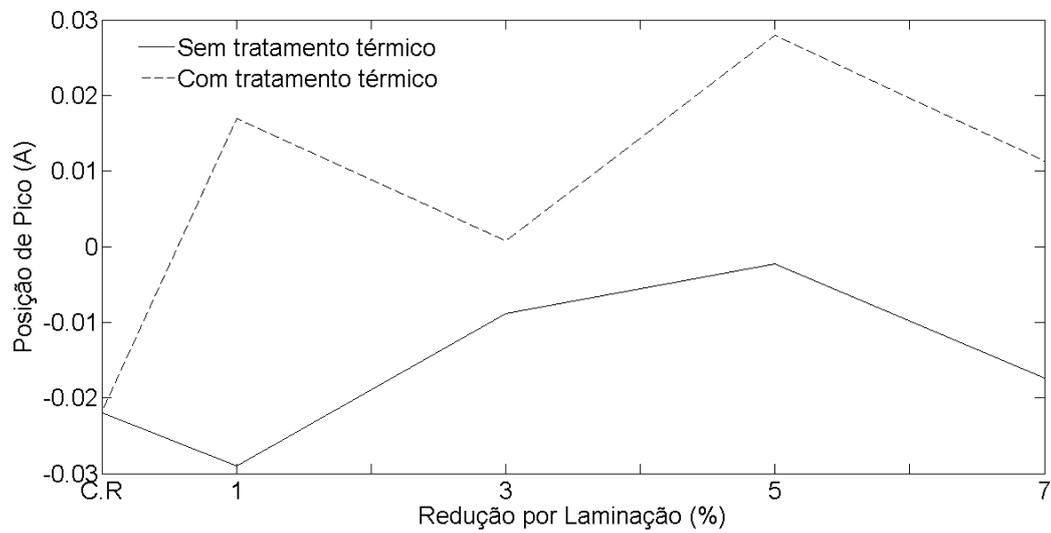
A Figura 42 mostra a relação entre a amplitude de pico e o grau de laminação na direção 60° a partir da amostra de referência (sem laminação) seguida pelas amostras com redução por laminação. O resultado encontrado é semelhante ao apresentado pelas figuras 36 e 39, porém com amplitude de pico menor.

Figura 42: Relação entre o sinal de RMB e a redução por laminação na direção 60°



Fonte: Próprio autor

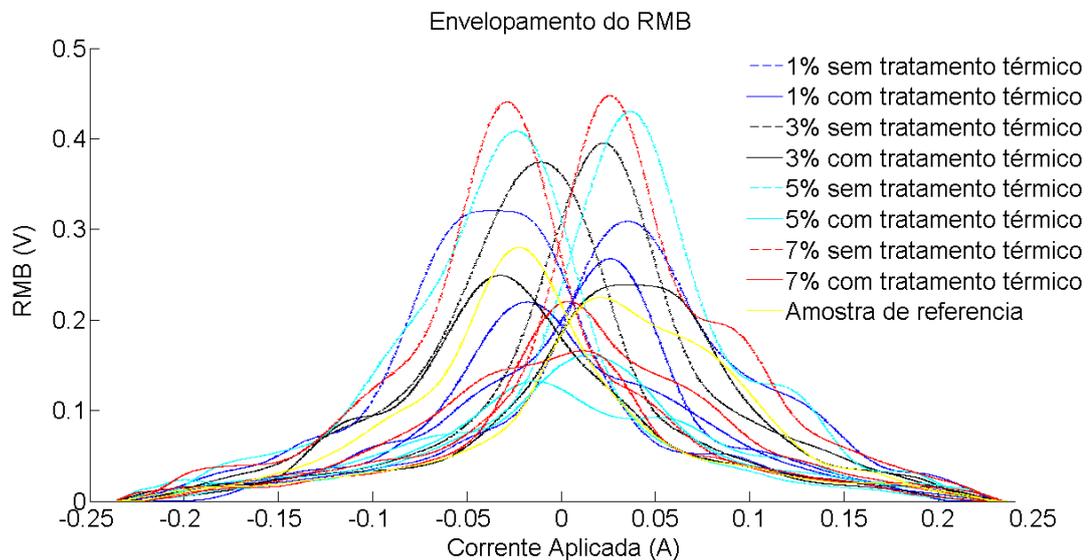
Figura 43: Relação entre a posição de pico e a redução de espessura na direção 60°



Fonte: Próprio autor

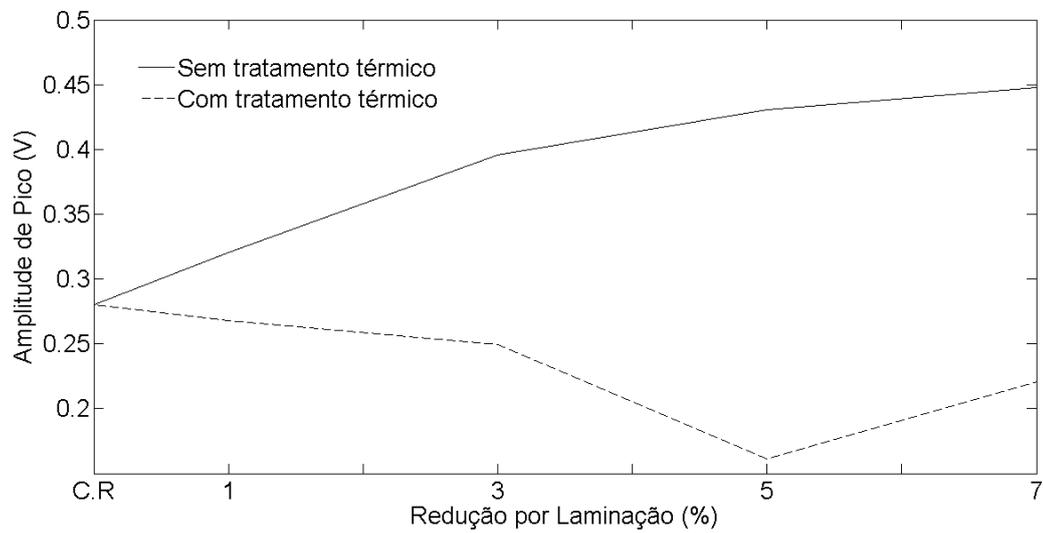
A Figura 44 mostra o comportamento do RMB em função da corrente elétrica aplicada na direção 90° com a laminação.

Figura 44: Envolvimento do sinal de RMB na direção de 90° com a laminação



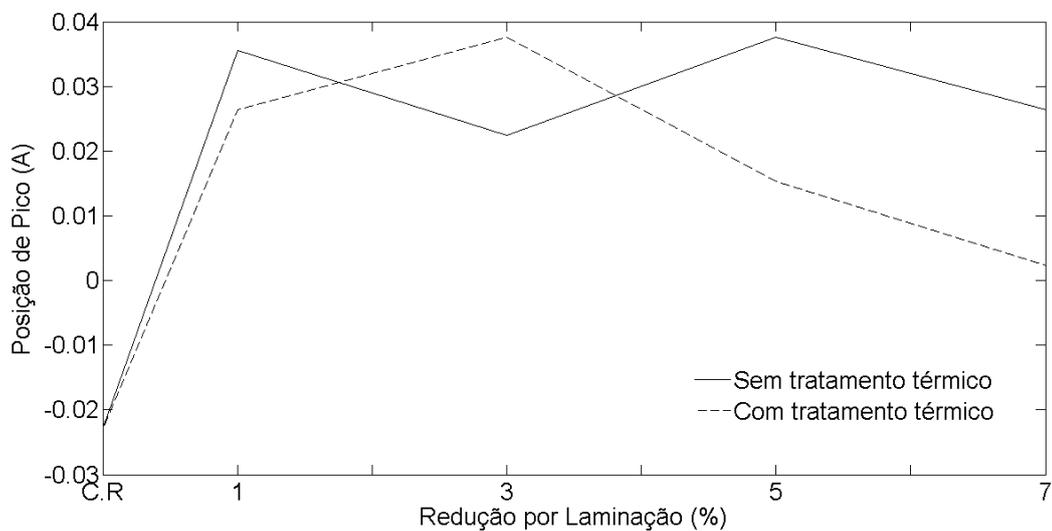
Fonte: Próprio autor

Figura 45: Relação entre a amplitude de pico e a redução por laminação na direção 90°



Fonte: Próprio autor

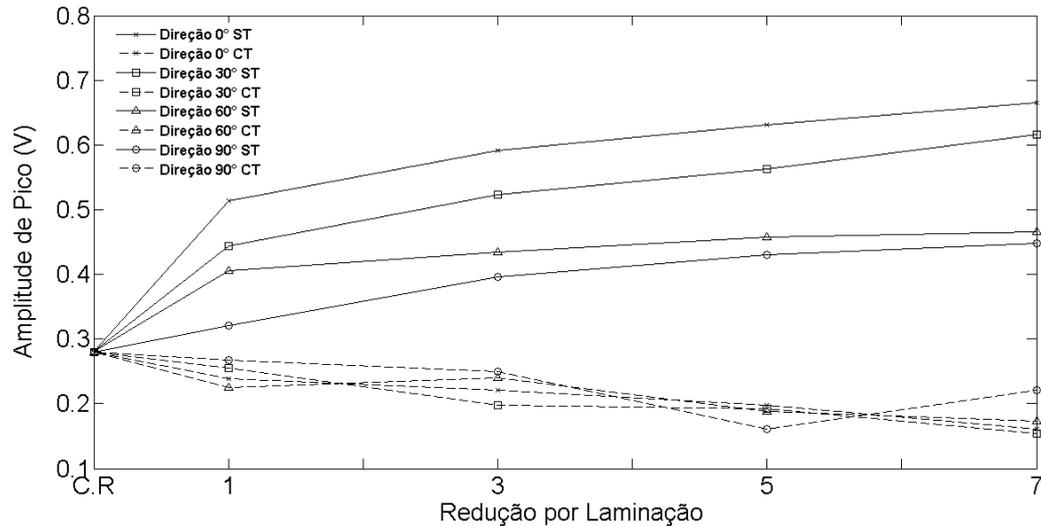
Figura 46: Relação entre a posição de pico e a laminação na direção 90°



Fonte: Próprio autor

Os resultados apresentados acima mostram que na direção 0° do campo de magnetização em relação à direção de laminação, a amplitude de pico para cada amostra tem um valor correspondente. Contudo, à medida que essa direção varia para 30°, 60° e 90° esse valor diminui, como mostra a Figura 47 que apresenta um comparativo entre as amplitudes de picos para todas as amostras laminadas com tratamento térmico (CT) e sem tratamento térmico (ST).

Figura 47: Amplitude de pico para todas as amostras como função do grau de laminação



Fonte: Próprio autor

Observando a Figura 47 é possível visualizar uma amplitude de pico maior para as amostras ST em relação às amostras CT para valores maiores do grau de laminação. Para as amostras ST significa que houve aumento no número de discordâncias em regiões específicas, aumento de tensões residuais, impulsionado pelo encruamento e pela a diminuição ou achatamento dos grãos o que possibilitou um aumento na energia potencial nos contornos de grãos. Esse resultado é justificado pela seção 3.1.1.1 que afirma que tensões de tração mecânicas aumentam a intensidade das emissões de Barkhausen. Para as amostras CT o resultado foi diferente, ou seja, a amplitude de pico do RMB diminui com o aumento do grau de laminação. Isso ocorreu porque, semelhante às amostras sem tratamento térmico houve uma variação do estado de tensões residuais, aumento da energia interna etc. Porém com o tratamento térmico ocorreu uma uniformização da estrutura e liberação da energia potencial acumulada, principalmente nos contornos de grãos que diminui a emissão de Barkhausen.

A menor amplitude de pico na direção 90° é justificada nos trabalhos de [21, 22, 23, 27, 53]. A magnetização ocorre por movimentação de paredes de domínio e as tensões elásticas afetam diretamente esse processo. O material ferromagnético tem energia interna equilibrada de tal forma que permaneça com um menor valor possível. Assim quando uma tensão é aplicada ocorre um aumento da energia interna devido ao acréscimo de energia potencial elástica e para minimizar novamente esse aumento ocorre um rearranjo dos

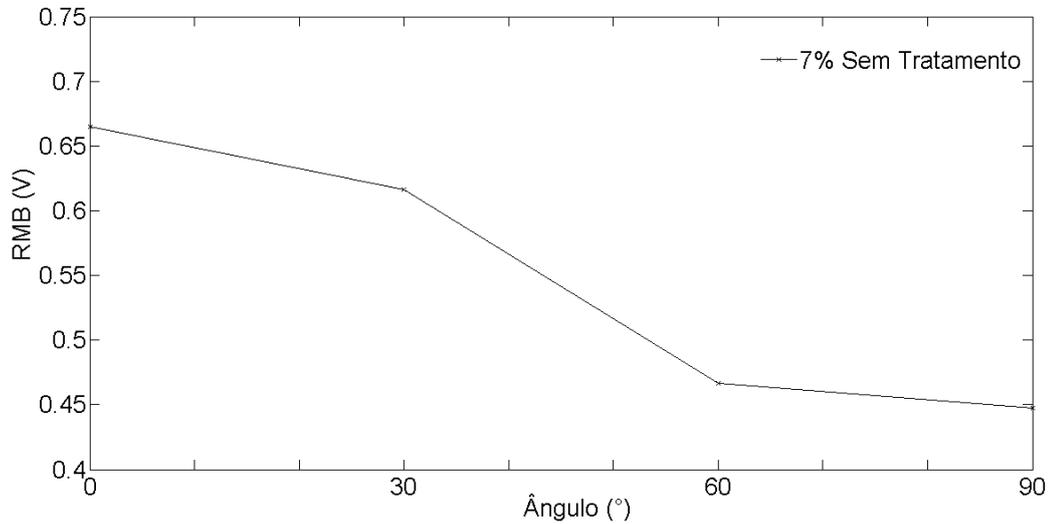
domínios magnéticos. O rearranjo dos domínios não é aleatório, depende do tipo de tensão aplicada. Assim, quando a tensão aplicada é de tração há um favorecimento à movimentação de paredes de 180° na direção da tensão aplicada e na direção perpendicular que se movimenta são as paredes de 90° . No caso de uma tração de compressão ocorre o efeito contrário. As energias associadas ao tipo de paredes são: magnetocristalina e magnetostática para a dinâmica das paredes de 180° e magnetoelástica ou magnetostrictiva no caso das paredes de 90° . Esses argumentos estão localizados na seção 3.1.1.1.

Como discutido na seção 2.2 o processo de magnetização em cristais multidomínios ocorre de duas formas: pela movimentação de paredes de domínio e por rotação de domínios magnéticos. As paredes de domínios dos ferromagnéticos são basicamente de dois tipos: 90° e 180° , sendo que a movimentação de paredes de 90° não causam eventos de Barkhausen, apenas as paredes de 180° . Assim, para a direção de 0° com a laminação ocorre o maior acúmulo de paredes de 180° e, por isso a maior emissão de RMB.

É provável que durante o processo de fabricação da chapa de aço, de onde se retirou as amostras para este trabalho tenha ocorrido um aumento das tensões residuais para alguma direção privilegiada. Nesta direção é possível encontrar um sinal de RMB mais intenso, pois o acúmulo de tensões e discordância gera uma anisotropia mecânica mais acentuada nesta direção e conseqüentemente uma anisotropia magnética. A amostra de referência apresenta uma amplitude e posição de pico com valores entre as amostras ST e CT, mesmo não passando por nenhum tipo de tratamento termomecânico.

A Figura 48 mostra a relação entre a intensidade de RMB em função do ângulo de aplicação do campo para a mostra de 7% ST. Não serão mostrados os resultados para as outras amostras porque todos apresentam comportamentos semelhantes. Ainda, como se observa na figura, a intensidade do sinal de RMB diminui a partir do ângulo 0° até 90° .

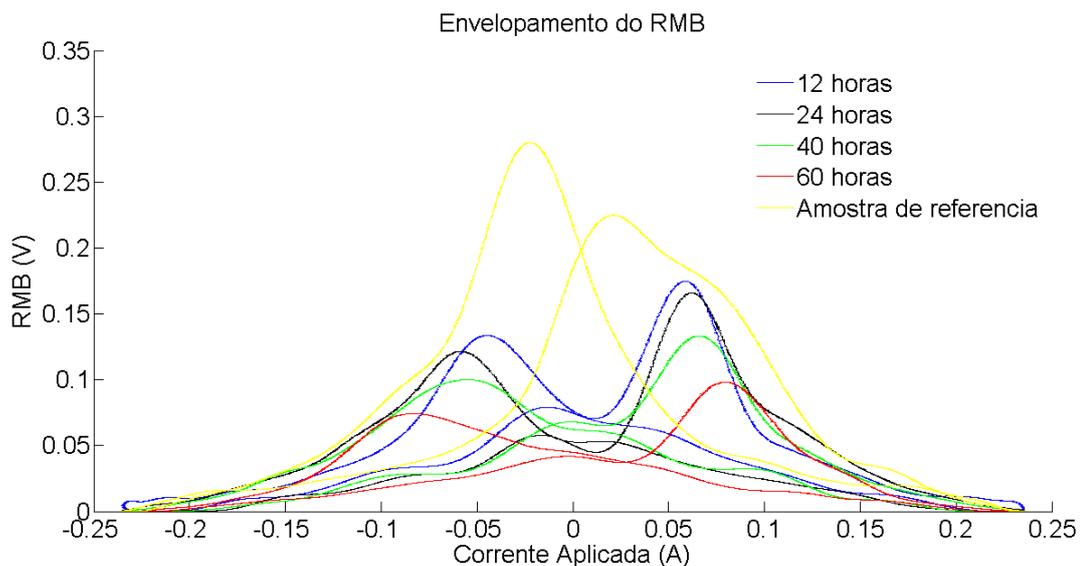
Figura 48: Sinal de RMB para amostra de 7% ST em função do ângulo de magnetização em relação à direção de laminação



Fonte: Próprio autor

A Figura 49 apresenta o resultado para o grupo de amostras que foram submetidas apenas aos tratamentos térmicos de normalização e recozimento. A normalização contribui para reduzir o estado de tensão, densidade de discordâncias e as impurezas. O recozimento proporciona aumento no diâmetro médio de grão.

Figura 49: Envolvimento do RMB para as amostras sem laminação, apenas com tratamento térmico, normalização e recozimento.



Fonte: Próprio autor

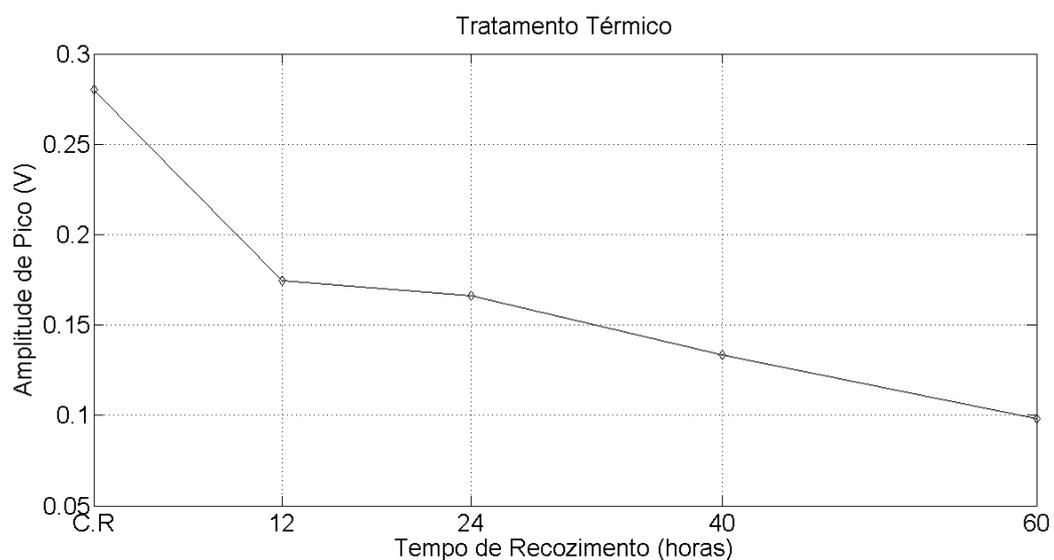
O sinal RMB tem amplitudes que diminuem com o aumento da temperatura e com o tempo de exposição da amostra ao forno.

Existe uma dependência do tipo Hall-Petch entre o sinal de RMB e o tamanho de grão [28]. Assim ao aumentar o tamanho médio de cada grão ocorre uma diminuição no sinal de RMB. A Figura 49 apresenta o envelopamento do sinal de RMB. Como se observa à medida que a amostra fica mais tempo exposta ao forno, a amplitude de pico do envelopamento diminui, formando uma curva mais achatada. Além disso, ocorre uma deformação assimétrica entre os picos e a região de valor zero para a corrente de excitação. Ainda pela Figura 48 o primeiro pico para todas as amostras tem intensidade menor que o segundo pico e o ponto de interseção entre as curvas ficou com valor entre as amostras ST e CT para cada curva.

É importante esclarecer que o tratamento térmico de normalização pode produzir microconstituintes como ferrita e perlita e, eventualmente, bainita. Contudo, neste trabalho não se avaliou a influência de cada um desses microconstituintes, ficando para trabalhos futuros.

A Figura 50 mostra como o período de tempo de exposição das amostras ao forno com a mesma temperatura afetou a amplitude de pico do sinal de RMB. Como se observa para valores maiores de tempo (horas) tem-se amplitude de pico menor.

Figura 50: Relação entre amplitude do sinal RMB e número de horas de tratamento térmico.



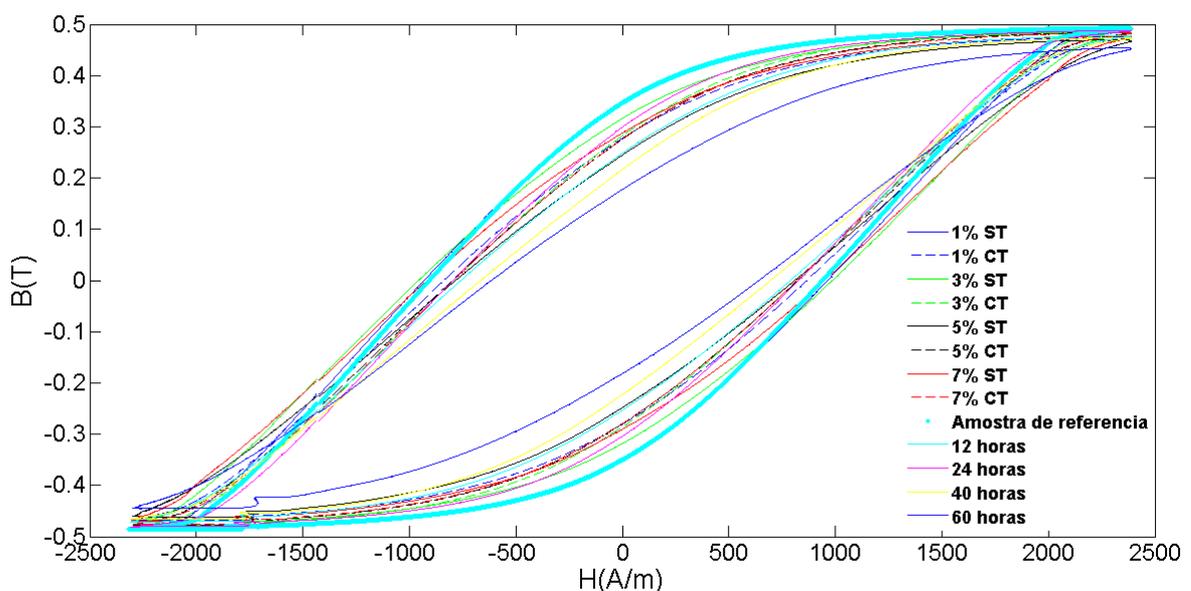
Fonte: Próprio autor

5.2 Análise da curva de histerese magnética

Como foi citada na revisão de literatura, a forma mais rápida de analisar as propriedades magnéticas de um material é através da construção de ciclos de histerese. Neste trabalho para cada amostra foi construído um ciclo de histerese na direção de laminação com o intuito de conhecer as variações magnéticas a partir da laminação a frio. Infelizmente, a laminação causa um aumento no estado de tensões locais, acúmulo de discordância na região onde se concentra a maior intensidade da pressão do cilindro utilizado, o que dificultou ao processo de magnetização [5]. Na maioria dos casos a laminação causa um aumento do campo coercivo [19]. A curva de histerese obtida nesse trabalho apresenta resultados do comportamento microestrutural localizada, por isso a sensibilidade maior a pequenas alterações, inclusive das falhas na estrutura dos cilindros do equipamento para a laminação.

A Figura 51 exibe as curvas de histerese de todas as amostras sobrepostas. Com alguma dificuldade, é possível na figura observar uma leve inclinação das curvas de histerese no sentido horário devido a variações na microestrutura das amostras. Todas as curvas foram construídas com o campo de indução na direção de fácil magnetização para que se possa ter a menor interferência de campos remanentes. As figuras seguintes trazem mais detalhes sobre a curva de histerese.

Figura 51: Sobreposição dos ciclos de histerese de todas as amostras.



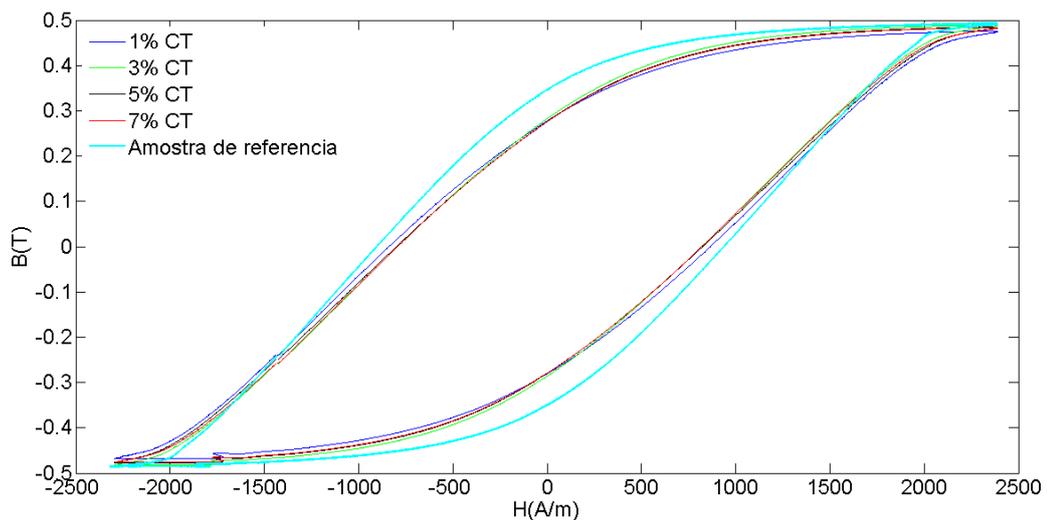
Fonte: Próprio autor

Como se observa, a inclinação horária e a largura das curvas são dependentes do grau de laminação e do período em que as amostras foram tratadas termicamente, sendo mais acentuados os resultados das amostras que não passaram por tratamentos térmicos. O comportamento da curva de histerese das amostras com tratamento térmico apresentou resultado sem difíceis de serem avaliados, pois não houve uma regularidade de uma curva para outra.

A Figura 52 mostra as curvas de histereses para as amostras laminadas a frio e normalizadas. Como se observa, a curva em amarelo representa a amostra de referência. Como essa amostra não sofreu tratamento térmico existe ainda em sua estrutura fatores que causam uma diminuição da permeabilidade magnética, como altos valores de tensão mecânica ou tensões residuais e alta densidade de discordância que dificulta a movimentação de paredes de domínio. Esses fatores contribuem para produzir uma curva de histerese mais larga.

Para as amostras 1, 3, 5 e 7% normalizada os ciclos de histerese são semelhantes e próximos, pois os obstáculos advindos da laminação e das tensões residuais são reduzidos ou eliminados pelo calor aplicado durante o tratamento térmico. Por isso, o ciclo da amostra de referência é mais largo, enquanto os demais são mais estreitos.

Figura 52: Curvas de histerese das amostras laminadas e normalizadas

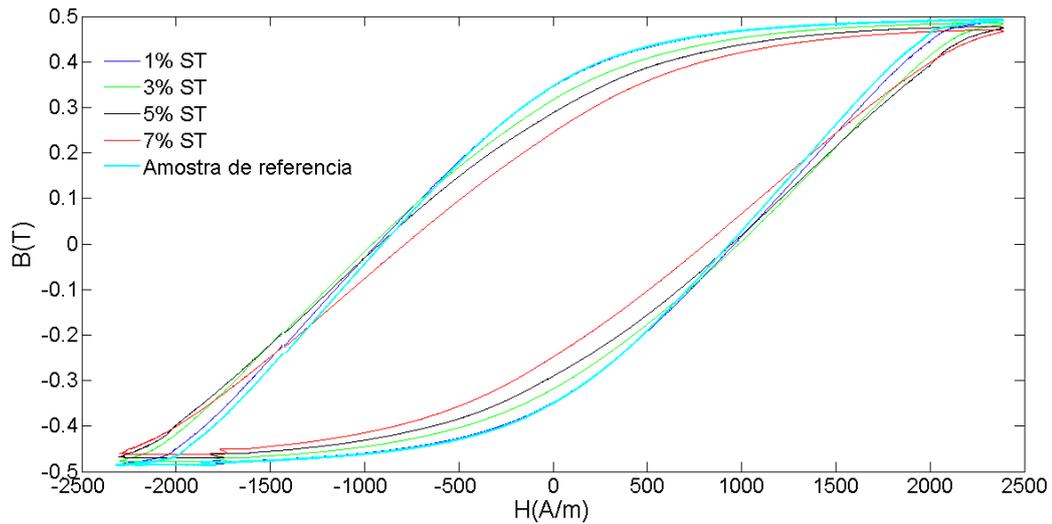


Fonte: Próprio autor

A Figura 53 apresenta a uma superposição das curvas de histerese para as amostras que foram apenas laminadas. Conforme dito antes, a laminação causa um aumento de discordância que dificulta a magnetização e reduz a permeabilidade magnética. Como se

observa na figura a amostra com redução de 7% é levemente mais inclinada para a direita sendo seguida pela amostra de 5%, 3% e 1%. Nota-se que a diferença entre a curva da amostra de 1% e a amostra de referência é muito pequena.

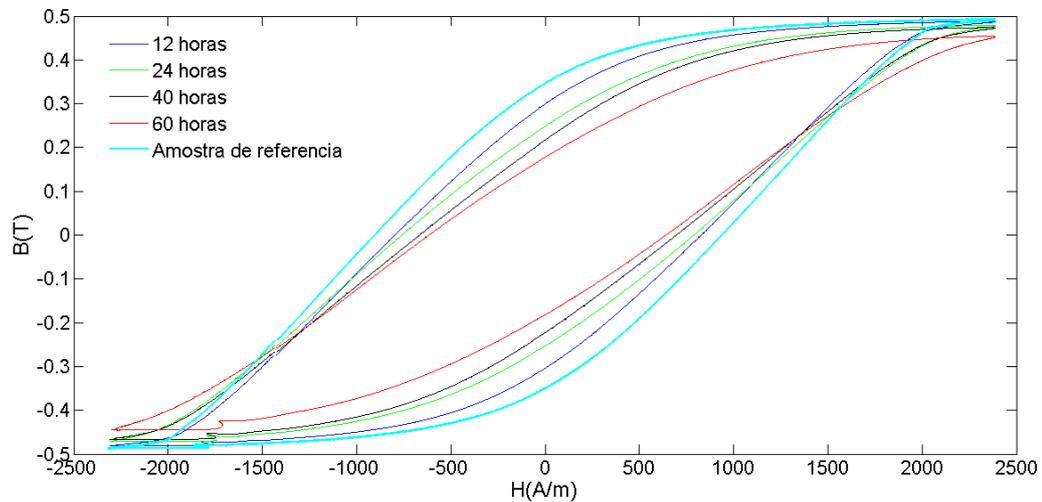
Figura 53: Curvas de histerese das amostras laminadas.



Fonte: Próprio autor

A Figura 54 representa a curva de magnetização para as amostras que foram normalizadas, em seguida passaram por um recozimento. Conforme mostra a figura, os laços estão mais estreitos, isso significa que ocorreu uma alteração na permeabilidade. O material passou a ter uma permeabilidade maior e, com isso um campo coercivo menor. Este resultado também é atribuído ao crescimento no tamanho de grãos, pois como citado anteriormente o campo coercivo obedece à relação de Hall-Petch para o crescimento de grão, ou seja, que seu valor diminui por um sobre a raiz quadrada do tamanho de grão.

Figura 54: Curva de histerese amostras normalizadas e com crescimento de grãos.



Fonte: Próprio autor

A utilização da curva de histerese para avaliação do RMB e das correntes parasitas remonta principalmente no comportamento do campo coercivo. Como descrito na literatura, o sinal de RMB tem maior intensidade nesta região (campo coercivo), pois representa o momento exato da movimentação das paredes de 180° quando o campo de indução é invertido. Quando a largura do campo coercivo é grande significa que haverá uma maior necessidade de campo de indução mais intenso para que a magnetização possa ocorrer.

O campo coercivo também obedece à equação de Hall-Pech, tendo valor maior para tamanho de grão menor, como se pode observar pela Figura 54 [65]. Para as amostras com maior tempo de recozimento a curva de histerese é levemente mais fechada, além disso, ela também rotaciona no sentido horário o que significa uma diminuição da permeabilidade de saturação magnética [65].

O campo coercivo não apresenta muita sensibilidade aos estados de tensão microestrutural, mas reflete muito bem o comportamento das variações de degradação microestrutural [19]. Assim, quando ocorrem alterações microestruturais, principalmente neste tipo aço que tem certo teor de carbono e, por isso possibilita a formação de fases como ferrita e perlita que tem uma estreita relação com o campo coercivo [9].

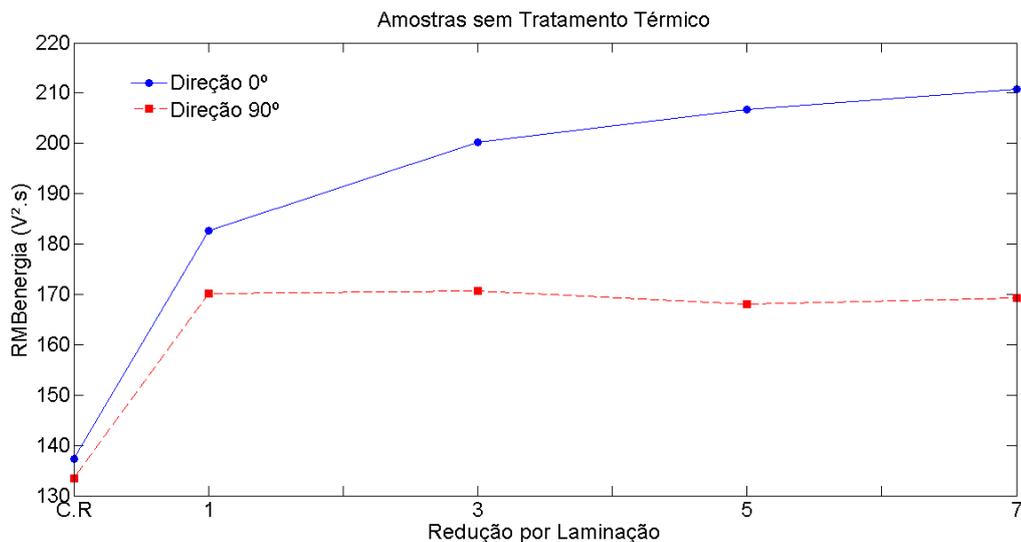
5.3 Influência da laminação a frio sobre a energia do sinal de RMB.

Um processo de laminação a frio consiste em reduzir a espessura de um lingote de aço através de sua passagem entre dois cilindros cuja abertura é menor que a espessura do lingote resultando o encruamento de sua microestrutura. O encruamento abaixo da temperatura de recristalização modifica a microestrutura do aço e aumenta os estados de tensões residuais, dureza e resistência mecânica, além de diminuir a ductilidade.

A Figura 55 apresenta o resultado do comportamento do sinal de $RMB_{energia}$ quando aplicado para dois ângulos diferentes de 0° e 90° com a direção de laminação, para amostras de aço que foram apenas laminadas a frio. Como se observa a energia do sinal aumenta com o aumento do grau de laminação, sendo máxima para o valor de 7%. Contudo, conforme exposto anteriormente, o valor da intensidade do sinal é mais acentuada na mesma direção da laminação e, por isso, tem-se um valor maior na direção 0° em relação à direção 90° .

O primeiro ponto do gráfico (CR) foi obtido sobre a amostra de referência, dita como recebida de fábrica. Para essa amostra (CR) a direção de mais fácil magnetização, determinada a partir da direção de captura do sinal RMB de maior energia durante a rotação da sonda de magnetização sobre a amostra, foi adotada como sendo a direção de 0° com a direção de laminação.

Figura 55: Intensidade do $RMB_{energia}$ para as direções de 0° e 90° com a direção de laminação

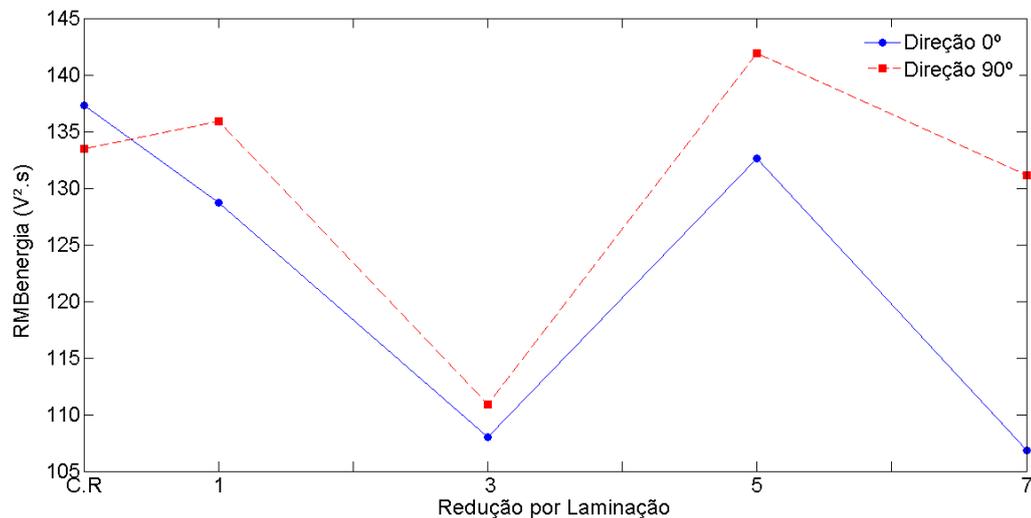


Fonte: Próprio autor

Figura 56 apresenta resultado similar ao citado anteriormente com a diferença que agora além da laminação as amostras também foram normalizadas para reduzir seus estados de tensão originados pela laminação. Contudo, como se observa o resultado do gráfico não é conclusivo, pois não se encontrou um padrão para o comportamento da microestrutura através deste método.

O resultado do processamento do sinal com métodos estatísticos, através da técnica de distribuição de assimetria e de curtose mostrou-se mais eficiente, pois os resultados gerados foram mais coerentes e/ou mais precisos como se verá em tópicos seguintes.

Figura 56: Intensidade do $RMB_{energia}$ para as direções de 0° e 90° com a direção de laminação seguida de tratamento térmico (normalização)



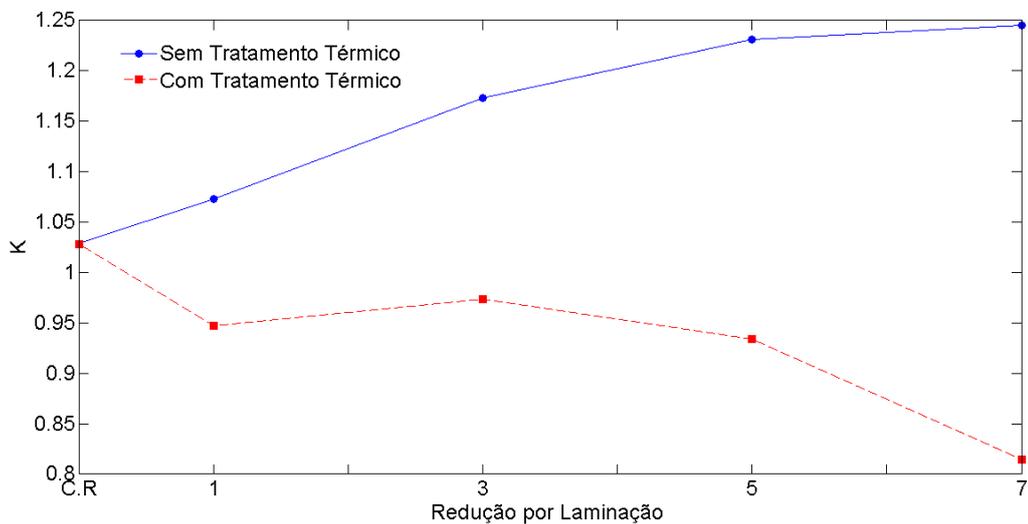
Fonte: Próprio autor

O que se observa da Figura 56 é uma diminuição da intensidade do sinal de energia para valores maiores da laminação. A justificativa para esse comportamento é que como a energia potencial acumulada é maior para valores maiores de redução de espessura, devido ao aumento tensão residual, aumento no número de discordância e concentração de impurezas, assim quando ocorre à normalização a quantidade de energia de tensões liberada para as reduções maiores é bem mais elevada, com isso diminui as regiões que proporcionam ancoragem das paredes de domínio, e com isso, diminui também a intensidade do sinal de $RMB_{energia}$.

Utilizando a equação 34 determinou-se a constante de anisotropia, k , definida como a razão entre a energia dos sinais RMB capturados nas direções longitudinal (0°) e

perpendicular (90°) à direção de laminação. Os resultados apresentados na Figura 57 revelam que, para as amostras laminadas e não submetidas ao tratamento térmico posterior, ocorre crescimento da constante k com o aumento do grau de redução. Por outro lado, as amostras submetidas ao tratamento térmico de normalização após a laminação observa-se redução da constante de anisotropia k . Esse resultado mostra que a normalização reduziu os efeitos da laminação nas amostras, e que a taxa de recuperação é tanto maior quanto maior o grau de deformação. Como foi mostrado em gráficos anteriores o valor da $RMB_{energia}$ cresce com o aumento da laminação, justificando o resultado do aumento das amostras apenas laminadas.

Figura 57: Constante de anisotropia para amostras laminadas, com e sem tratamento térmico.

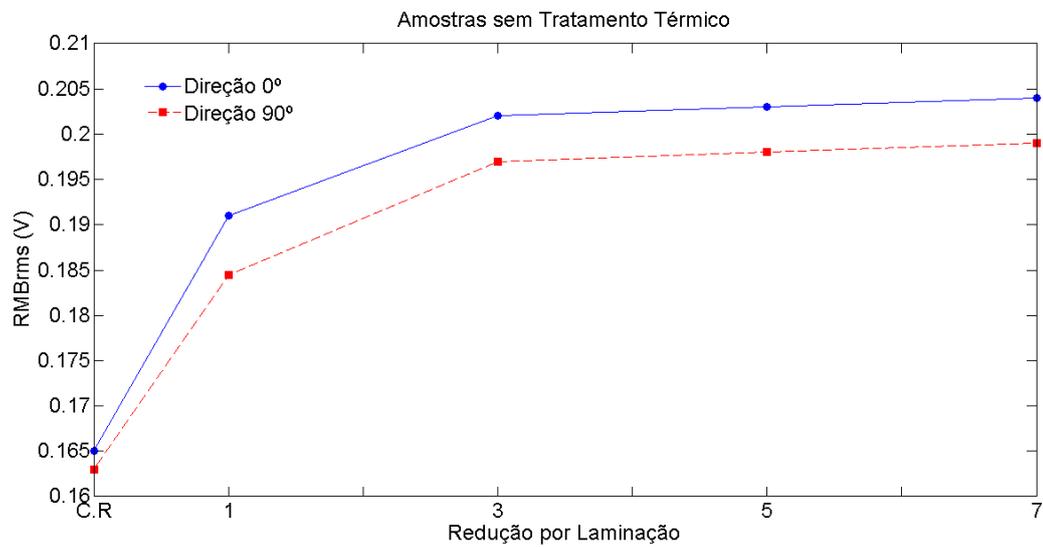


Fonte: Próprio autor

5.4 Influência da laminação sobre RMB_{rms}

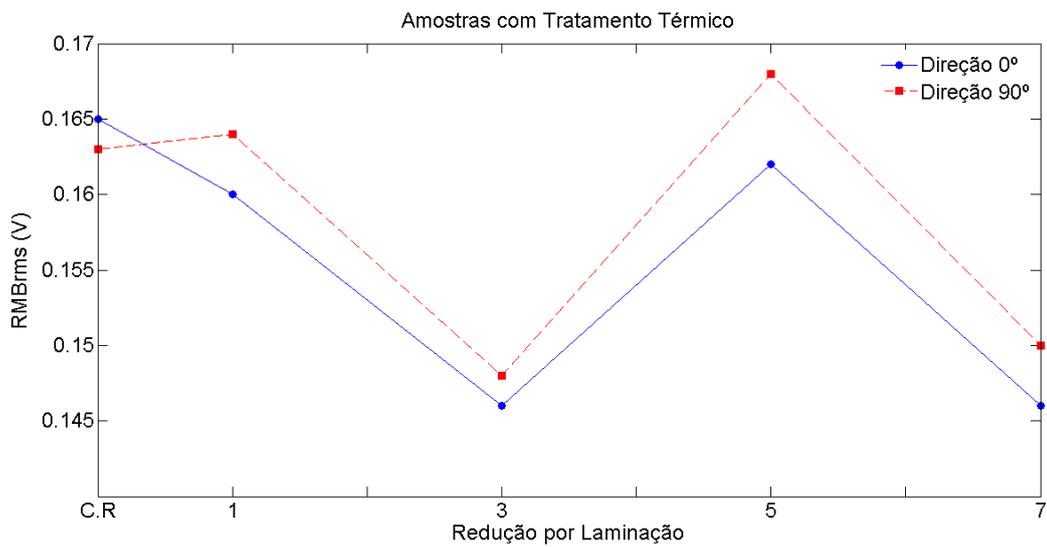
Os resultados sobre os efeitos da laminação sobre o sinal RMB_{rms} são semelhantes aos resultados do $RMB_{energia}$, ou seja, como se observa na Figura 58 para as amostras laminadas ocorre um aumento do sinal, sendo o sinal na direção 0° maior que 90° . Para as outras amostras o resultado também é semelhante ao sinal de $RMB_{energia}$ como se observa na Figura 58.

Figura 58: Relação entre RMB_{rms} e o grau de laminação para amostras laminadas e sem tratamento térmico.



Fonte: Próprio autor

Figura 59: Relação entre RMB_{rms} e o grau de laminação para amostras laminadas e normalizadas.



Fonte: Próprio autor

O próximo tópico traz uma análise estatística para os sinais de RMB em função do ângulo da sonda em relação à direção de laminação.

5.5 Análise por meio de assimetria e curtose na direção de laminação

Como foram apresentados na revisão de literatura os métodos estatísticos assimetria e curtoses representam uma importante ferramenta para avaliar o comportamento de uma distribuição de eventos, mais precisamente o comportamento da amplitude de pico nas proximidades da maior concentração de eventos do sinal.

A Tabela 4 apresenta os resultados assimetria e curtoses para as amostras que foram apenas laminadas. Como se observa, os valores de assimetria para todas as amostras estão entre $-1/2$ e $1/2$ o que se considera um valor aproximadamente simétrico em relação à curva gaussiana. Na tabela também é mostrado que os valores 0° e 90° diferenciam-se apenas pela posição onde se concentra o maior número de eventos, mas em ambas as direções existem sempre simetria.

Tabela 4: Valores estatísticos para a distribuição de eventos de Barkhausen (amostras laminadas)

Rotação 0°	Assimetria	Curtoses	Rotação 90°	Assimetria	Curtoses
Referência	0,0093	8,5	Referência	0,0093	8,86
1ST	-0,1210	12,2	1ST	-0,0634	10,71
3ST	0,0967	12,8	3ST	-0,0811	9,90
5ST	-0,0360	14,1	5ST	0,0191	9,78
7ST	0,0183	14,4	7ST	-0,0853	8,52

Fonte: Próprio autor

A Figura 60 ilustra a relação entre a redução por laminação (0%, 1%, 3%, 5% e 7%), eixo horizontal, com a assimetria na distribuição de eventos, eixo vertical, para magnetização na direção 0° com a laminação. O eixo vertical é composto por duas regiões: acima e abaixo de zero. Acima o valor é positivo e abaixo o valor é negativo.

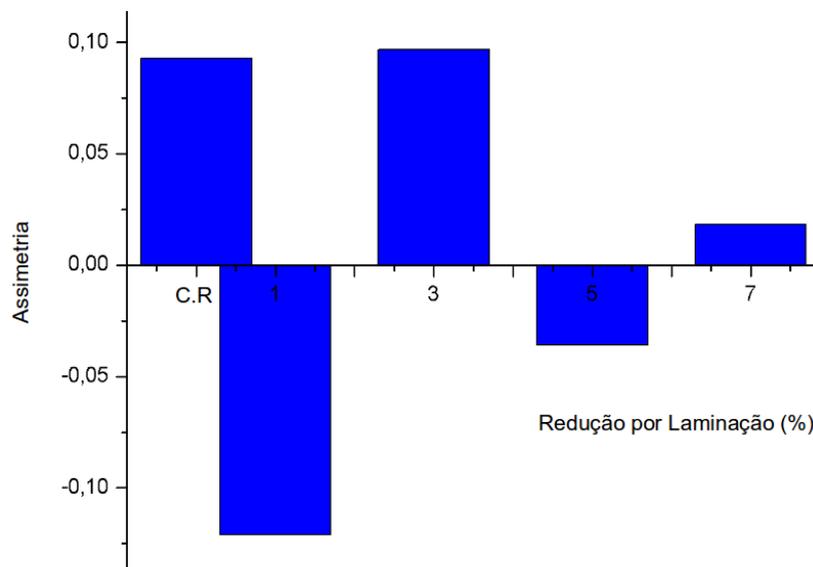
Como se observa na Figura 60, a assimetria assume valores positivos ou valores negativos. Na revisão de literatura foi apresentado o significado desses sinais. Assim para as amostras que tem valor negativo, significa que existe uma concentração de eventos localizada mais à direita em relação aos dois picos ou a gaussiana. Para os sinais positivos ocorre o contrário.

Na laminação de 0%, 3% e 7% a assimetria tem valor positivo na direção de laminação, por essa razão os valores mais intensos do sinal estão na proximidade do segundo pico do campo coercivo. Na curva de histerese essa região é representada pelo início da avalanche de paredes de 180° e também pela nucleação de domínios, detalhes na Figura 18 seção 3.1.1. No caso das laminações 1% e 5% que tem valores negativos, significa que a concentração de eventos ficou mais próxima da região do primeiro pico ou região inicial o campo coercivo.

A amostra de 7%, que tem o menor valor positivo e corresponde ao valor mais próximo da curva gaussiana, representa a mais simétrica distribuição de eventos dentro da região de campo coercivo ou entre os dois picos. Confirmando que para maiores valores de laminação, têm-se eventos igualmente intensos em toda a região de campo coercivo.

Observando a Figura 33 na seção 5.1, pode-se tomar como referência a região no entorno do valor nulo para a corrente elétrica aplicada, pois essa região representa o ponto de encontro entre as duas curvas que originam as amplitudes de picos. A distância entre os picos representa o valor do campo coercivo. Além disto, como é possível observa na mesma figura, a região de campo coercivo concentra o maior número de eventos de RMB, sendo as amostras sem tratamento térmico as que apresentaram maiores picos. Esta informação não poderia ser obtida através a avaliação do 3º e 4º momento estatístico, mas pode-se analisar em que região os eventos se concentraram como será mostrado nas figuras seguintes.

Figura 60: Valores da distribuição de probabilidade de eventos para amostra laminada na direção 0° com a laminação



Fonte: Próprio autor

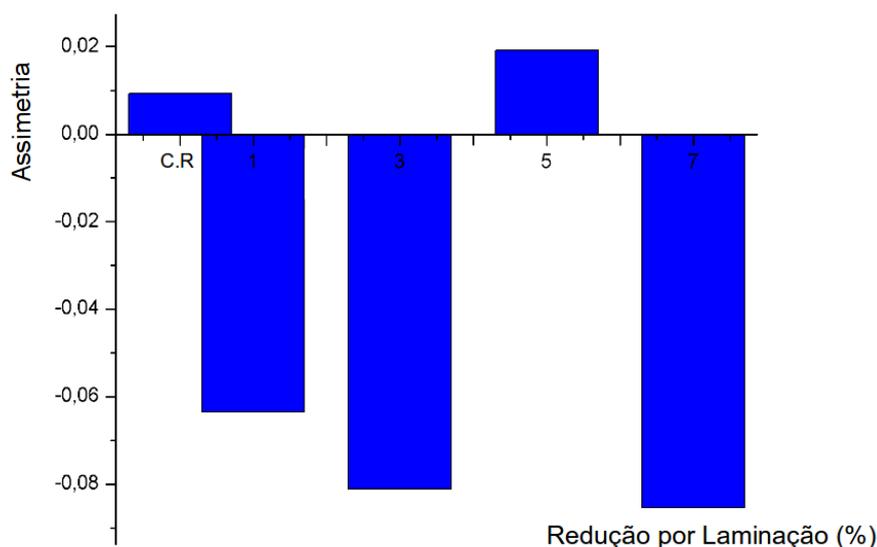
A Figura 61 mostra a medida de assimetria para sinal de RMB na direção 90° com a laminação. Observa-se que os valores para todas as amostras estão no intervalo de $-1/2$ e $1/2$ o que corresponde a um valor aproximadamente simétrico. Os valores de 0% e 5% são positivos sendo o 5% mais distante da média.

As amostras 1, 3 e 7% têm valores negativos sendo que a amostra de 1% também é aproximadamente simétrica, mas as amostras de 3% e 7% que tem valor entre $1/2$ e 1 são aproximadamente simétricas.

O valor negativo significa que a maior concentração de eventos esta tendendo para a esquerda e a maior largura do pico para à direita.

Analisando o resultado mostrado na Figura 47 através da assimetria, tem-se que os picos de RMB para o campo coercivo sofre um espalhamento. Isso ocorre porque o número de momentos magnéticos com paredes de domínio nessa direção é pequeno e os domínios que rotacionam para que ocorra a magnetização necessitam de uma energia externa mais intensa para superar a energia magnetocristalina que é máxima nesta direção. O resultado é uma elevação da região de interseção entre os picos do campo coercitivo, conseqüentemente um espalhamento dos eventos. Essa distribuição assimétrica em torno do pico é mais bem compreendida com o uso do parâmetro de curtose, pois ela reflete propriedades tais como, o tipo e largura do pico formado.

Figura 61: Valores da distribuição de probabilidade de eventos para amostra laminada na direção 90° com a laminação



Fonte: Próprio autor

Os valores encontrados para as amostras laminadas sem tratamento térmico são bem diferentes das amostras laminadas e normalizadas. Para essas últimas, como a direção de laminação foi praticamente eliminada pela liberação de energia e pela redução dos estados de tensão microestruturais que causavam a anisotropia magnética, a direção de fácil magnetização passou a ser dependente do reordenamento dos domínios magnéticos, ou seja, a direção em que a microestrutura adquira a menor energia magnetostática e magnetocristalina possível. Dessa forma, quando se calcula a assimetria desse tipo de amostra, encontram-se valores afastados da média na região negativa o que representa uma possível incidência de nucleação e aniquilação de domínios.

A Tabela 5 reúne os valores de assimetria para as amostras laminadas e normalizadas e as figuras 62 e 63 são representações gráficas desses valores para as direções 0° e 90°. Como se observa, os valores de assimetria para as amostras 0, 1, 3 e 5% são positivos, mas apenas as amostras 0 e 1% tem valor aproximadamente simétrico, sendo que a amostra 1% apresenta valores próximos ao intervalo assimétrico junto às amostras 5 e 7%. A amostra de 3% é a única que ficou na região negativa, também com valor aproximadamente assimétrico.

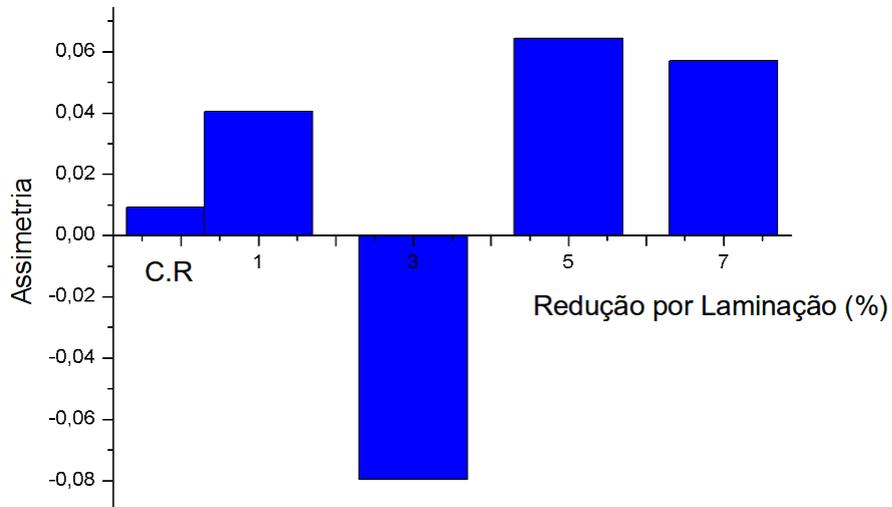
Para a Figura 62 que tem valores do RMB na direção perpendicular ao valor da laminação o valor da assimetria ficou: para amostra de 0, 1 e 7% que tem valor positivo os valores correspondem ao intervalo aproximadamente assimétrico para 1 e 7%. Para as amostras 3% e 5% o valor é negativo e o intervalo é aproximadamente simétrico.

Tabela 5: Valores estatísticos para a distribuição de eventos de Barkhausen (amostras laminadas e normalizadas).

0°	Assimetria	Curtoses	90°	Assimetria	Curtoses
Referência	0,0093	8,5	Referência	0,0093	8,52
1CT	0,0405	8,3	1CT	0,04355	8,39
3CT	-0,0795	8,4	3CT	-0,01245	8,30
5CT	0,0643	7,6	5CT	-0,03871	6,72
7CT	0,0570	7,2	7CT	0,0606	8,31

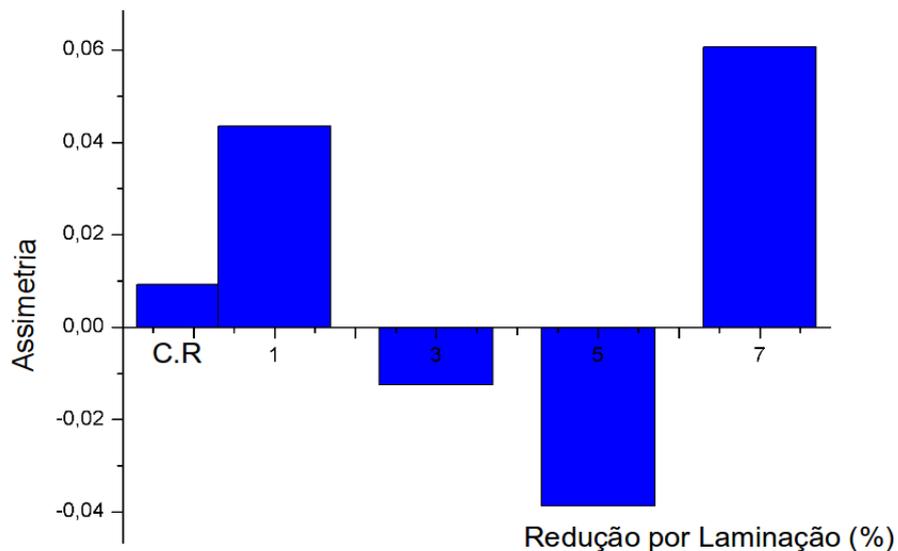
Fonte: Próprio autor

Figura 62: Distribuição de probabilidade de eventos para amostra laminada e normalizada na direção 0° com a laminação.



Fonte: Próprio autor

Figura 63: Distribuição de probabilidade de eventos para amostra laminada e normalizada na direção 90° com a laminação.



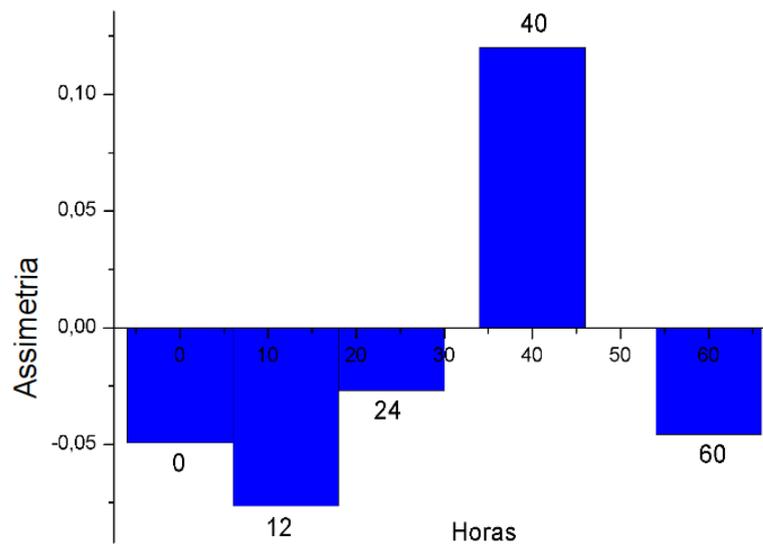
Fonte: Próprio autor

Conforme a Tabela 6 e Figura 64 o comportamento dos eventos são semelhantes aos encontrados para as amostras que foram laminadas e normalizadas. Como se observa, todas as amostras ficaram praticamente simétricas, apenas a amostra 40horas ficou na região positiva.

Tabela 6: Estatístico para a distribuição de eventos de Barkhausen

Amostras	Assimetria	Curtoses
Referência	-0,0493	8,50
12 horas	-0,0764	7,51
24 horas	-0,0273	7,80
40 horas	0,1213	7,57
60 horas	-0,0457	7,57

Fonte: Próprio autor

Figura 64: Distribuição de probabilidade de eventos para as amostras sem laminação.

Fonte: Próprio autor

Os valores de curtose representam uma distribuição do sinal nas proximidades do pico, assim é possível determinar as características físicas do sinal, com isso avaliar o grau de achatamento do sinal apenas por um fator numérico, ou seja, como apresentado na revisão de literatura, o grau de achatamento define a distribuição dos eventos de RMB em relação à média da distribuição ou da curva gaussiana.

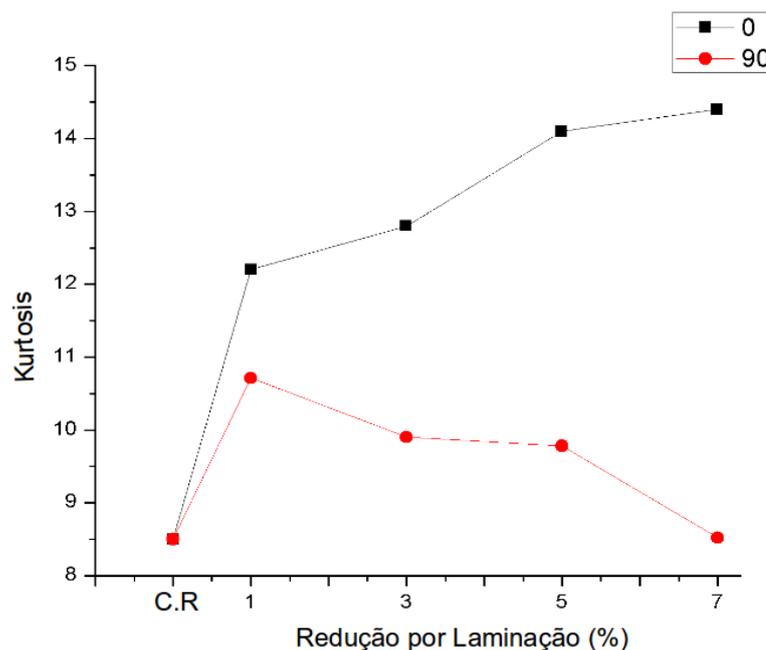
A Figura 65 mostra o comportamento da curtose para o sinal de RMB nas direções 0° e 90° com a direção de laminação, para as amostras laminadas sem tratamento térmico (ST). Como se observa a curtose cresce junto com grau de laminação na direção 0° e decresce na direção 90°. A amostra que apresenta o maior grau de laminação tem um excesso

de curtose (valor da curtose -3) maior em relação às outras, ou seja, uma distribuição de eventos que remetem a um gráfico mais estreito no topo e afunilado nas extremidades. Isso se justifica pela maior concentração de eventos de RMB, gerado pelo aumento da densidade de paredes de 180° ancoradas nessa direção. O resultado é um pico mais afilado na ponta, mas com extremidades mais larga. Esse tipo de resultado recebe o nome de distribuição leptocúrtica cujo gráfico tem regiões de pico bem definidas.

Como o valor da curtose está associado a distancia entre os dois pontos extremos do campo coercivo, é possível determinar a largura da curva de histerese e dessa forma avaliar se o material é magneticamente mole ou duro.

Para os sinais direção de 90° com a laminação, observa-se uma diminuição do valor da curtose à medida que o valor da laminação aumenta. Como se sabe o sinal de RMB é menos intenso na direção perpendicular à laminação. Isso ocorre por que na direção perpendicular existe uma preferência de magnetização, uma por rotação de parede de 90° e outra por rotação de domínio magnético. Assim quando se determinar o valor da curtose na direção perpendicular a intensidade da distribuição dos eventos diminui o que ocasiona um alargamento do tronco do gráfico, já o pico sofre um achatamento e por isso o valor da curtose diminui.

Figura 65: Distribuição dos picos de RMB para amostras laminadas ST na mesma direção e perpendicular a direção de laminação respectivamente.

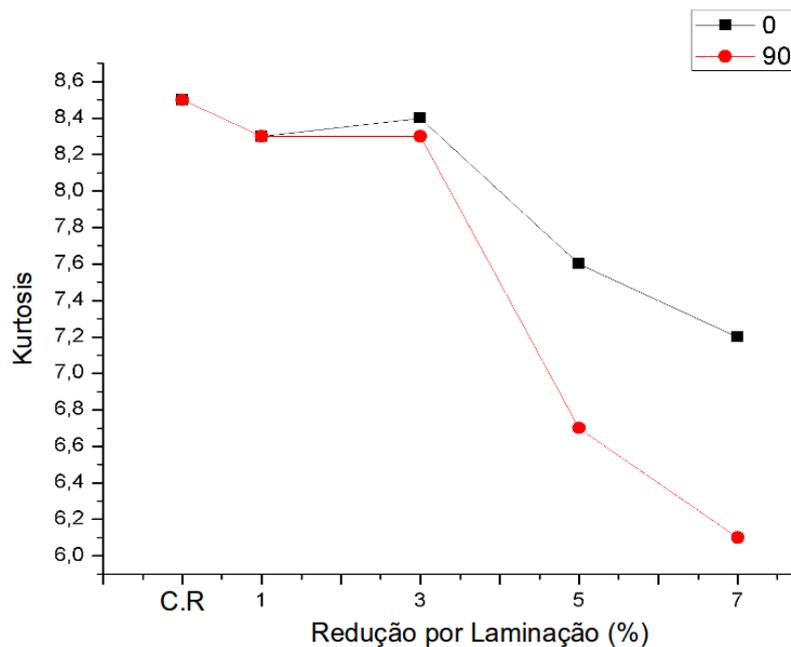


Fonte: Próprio autor

A Figura 66 mostra o comportamento da curtose para o sinal de RMB nas direções 0° e 90° com a direção de laminação para amostras laminadas com tratamento térmico. Como foi explicado em tópicos acima, quando uma amostra laminada passa por uma normalização ou recozimento ocorre uma recristalização e uma redução dos estados de tensão microestruturais da amostra. O resultado é uma redução nos pontos de ancoragem das paredes de 180° e, conseqüentemente, uma diminuição na intensidade do sinal de RMB.

Assim, para essas amostras ocorre um maior achatamento do sinal nas regiões de maior grau de laminação, sendo por isso que o valor da curtose diminui. Os valores da curtose para a direção perpendicular a direção de laminação segue o mesmo princípio com a diferença de que a intensidade do sinal ainda menor pelo fato de existirem menos domínios de 180° nessa direção. Por tanto, os valores de curtose para 90° são menores que os de 0° .

Figura 66: Distribuição dos picos de RMB para amostras laminadas CT na mesma direção e perpendicular a direção de laminação.



Fonte: Próprio autor

Todos os valores de curtose encontrados nas figuras são maiores que 3, ou seja, são maiores que o valor padrão. Dessa forma cada valor encontrado se enquadra do intervalo que corresponde ao chamado curtoses leptocúrtica, ou distribuição que afunila o pico do sinal quando os valores da curtose crescem.

5.6 Efeitos da laminação e do crescimento de grãos sobre as correntes parasitas

Na Figura 67 é apresentado o comportamento da impedância para variações em amostras do aço ASTM A516 sem a saturação magnética ou térmica. Como a principal fonte de informações extraída pelo ensaio por correntes parasitas está baseada nas suas propriedades elétricas e magnéticas, ou seja, a resistividade e a permeabilidade magnética e sendo a amostra material ferromagnético, tornou-se difícil diferenciar quem estava causando mais interferência na impedância da sonda. Quando se trabalha com material que apresenta campo induzido, as respostas da resistividade ficam ínfimas se comparada às alterações proporcionadas pela permeabilidade magnética [14]. A partir dessa afirmação as análises das correntes parasitas foram pautadas nas variações micromagnéticas. Além disso, como serão mostradas em tópicos seguintes, as variações da resistividade foram muito pequenas para o grau de laminação utilizada no experimento.

As figuras 67, 68 e 69 são funções da impedância com o grau de laminação. Como se observa para valores maiores de deformação existe uma influência maior sobre a impedância. As três figuras foram construídos para apresentar a importância da escolha apropriada da frequência de excitação. Como se observa existe uma coerência no resultado para a frequência de 1 e 10kHz, diferentemente do que ocorre com a frequência de 100kHz. Para as duas primeiras frequências a variação de impedância aumentou quando o grau de laminação aumenta. Já para a frequência de 100 kHz a resposta da impedância foi confusa. Isso pode ser indício que existe uma frequência de corte para que tenha bons resultados na captura de sinal de correntes parasitas.

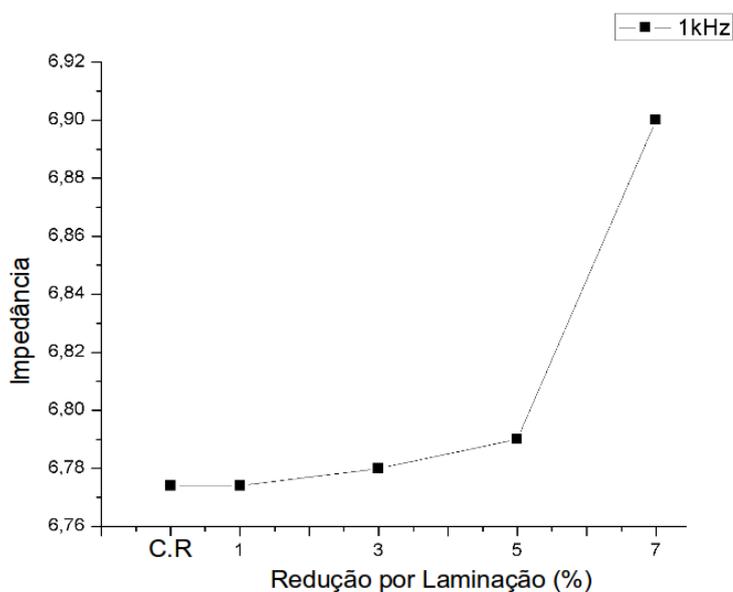
Para a captura dos sinais foi observado à direção de fácil magnetização que no caso das amostras laminadas era a própria direção de laminação. As demais amostras que não foram laminadas a descoberta da direção de fácil magnetização foi obtido pela análise dos sinais de RMB, ou melhor, pelos valores máximos de pico do envelopamento atrelado a uma análise estatística por meio dos parâmetros de assimetria e curtose. Desta forma, pode obter a direção de maior intensidade para permeabilidade magnética em cada amostra.

A Figura 68 inicia com laminação de 0%, sendo esta amostra a referência adotada para a determinação das possíveis variações que pode ocorrer na microestrutura.

Antes de fazer as medições foi observado em qual região da amostra poderia emitir o maior sinal. A captura de sinais foi feita então a partir de duas posições: uma superficial e a outra na lateral da amostra. Foi utilizada uma sonda do tipo “caneta” e, por

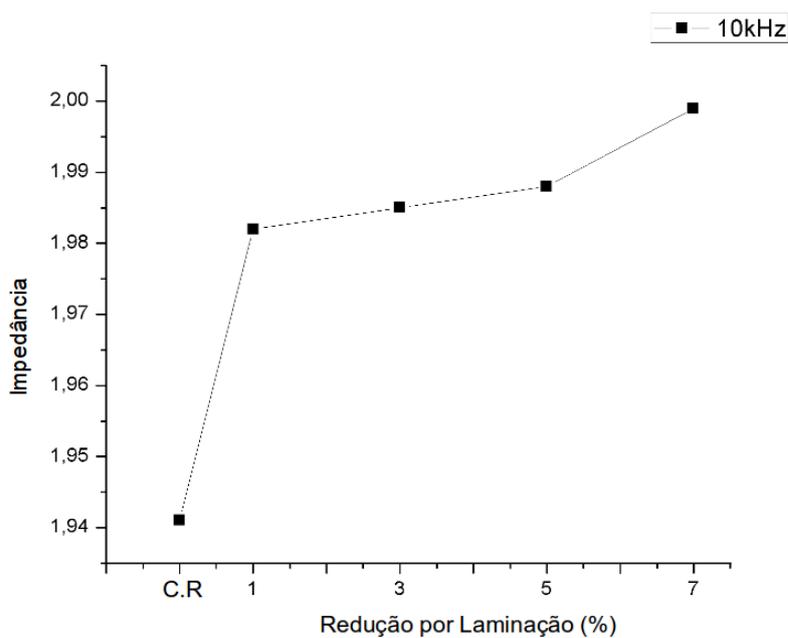
isso, não houve preocupação com a fuga de linhas de campo que poderia interferir no resultado. A medição lateral foi necessária porque as correntes parasitas não pouco sensíveis à laminação com baixo grau de redução de espessura [49].

Figura 67: Influência da laminação sobre da impedância para uma frequência de 1 kHz.

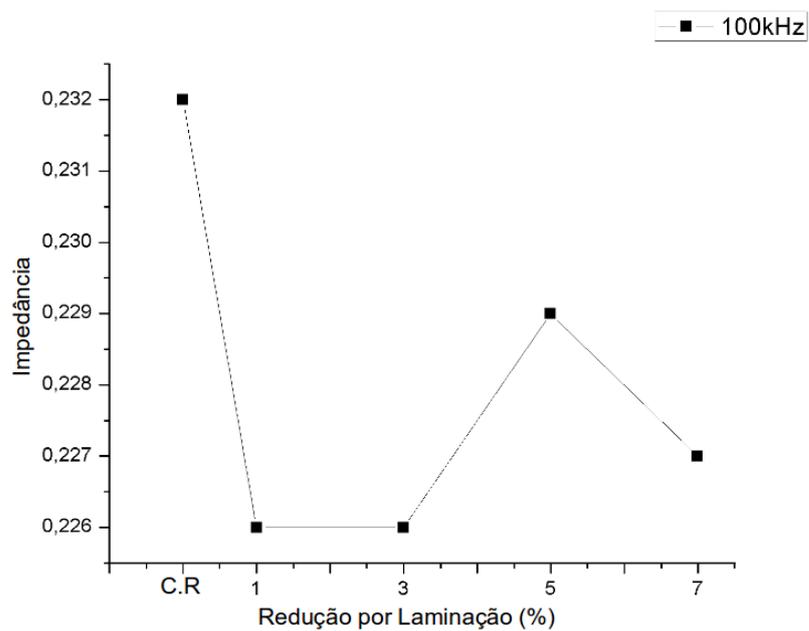


Fonte: Próprio autor

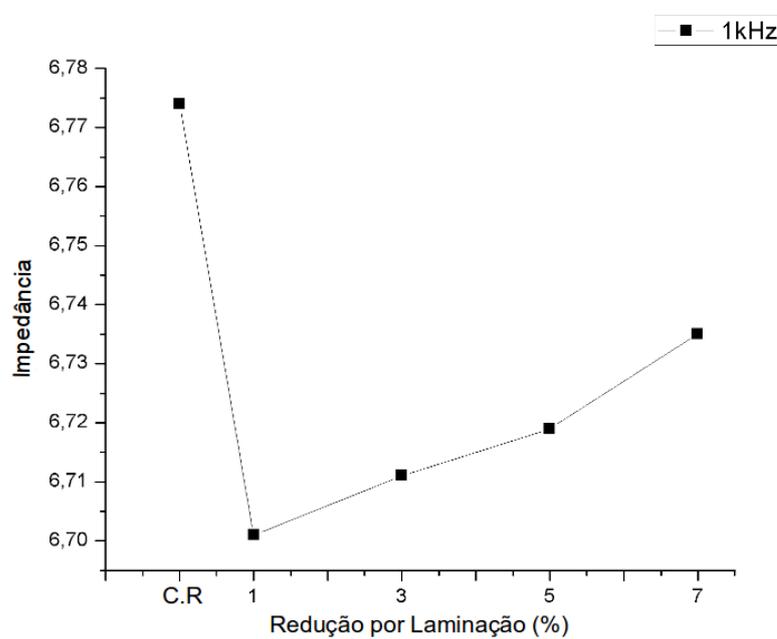
Figura 68: Influência da laminação sobre da impedância para uma frequência de 10 kHz.



Fonte: Próprio autor

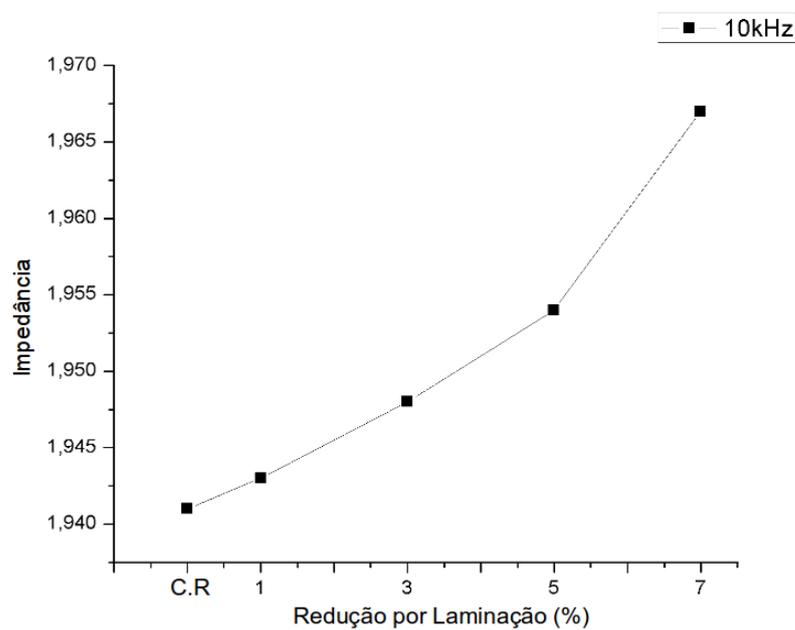
Figura 69: Influência da laminação sobre da impedância para uma frequência de 100 kHz

Fonte: Próprio autor

Figura 70: Influência da laminação sobre a impedância para uma frequência de 1 kHz. Amostras também tratada termicamente

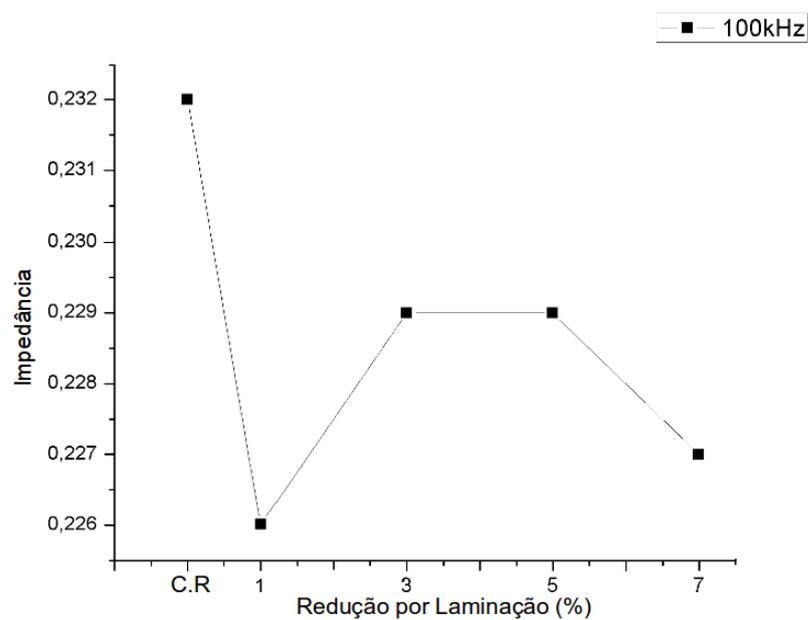
Fonte: Próprio autor

Figura 71: Influência da laminação sobre a impedância para uma frequência de 10 kHz.
(Amostras também tratada termicamente)



Fonte: Próprio autor

Figura 72: Influência da laminação sobre a impedância para uma frequência de 100 kHz.
(Amostra também tratada termicamente)



Fonte: Próprio autor

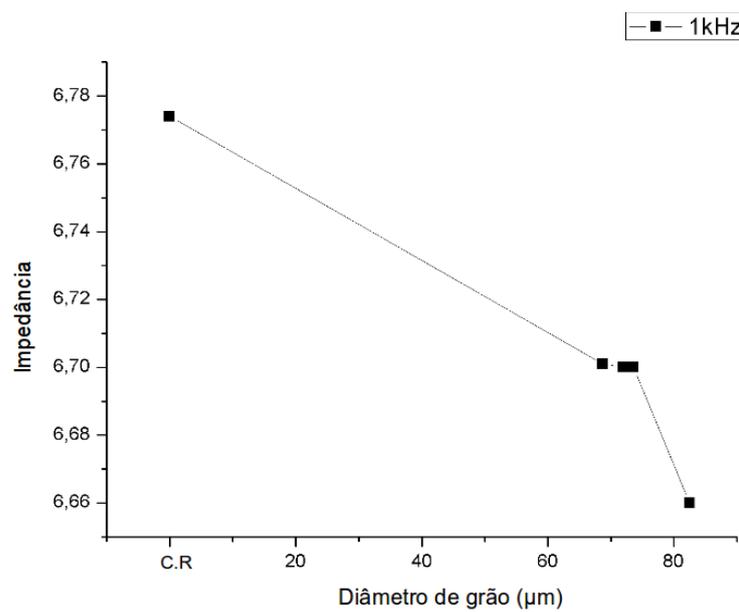
5.7 Influência do diâmetro médio de grão e da laminação

As figuras 73, 74 e 75 mostram as relações entre os valores do diâmetro médio de grão com a impedância normalizada, associadas também as diferentes bandas de frequência. Como se observa, a diminuição do diâmetro médio de grão ocorre junto com uma diminuição na impedância. Esta mudança pode ser uma resposta à diminuição do campo coercitivo, aumento da permeabilidade relativa, tendo em vista que, diminuíram os pontos de ancoragem e obstáculos ao movimento das paredes de domínios magnéticas e aumento da densidade de correntes parasitas [45].

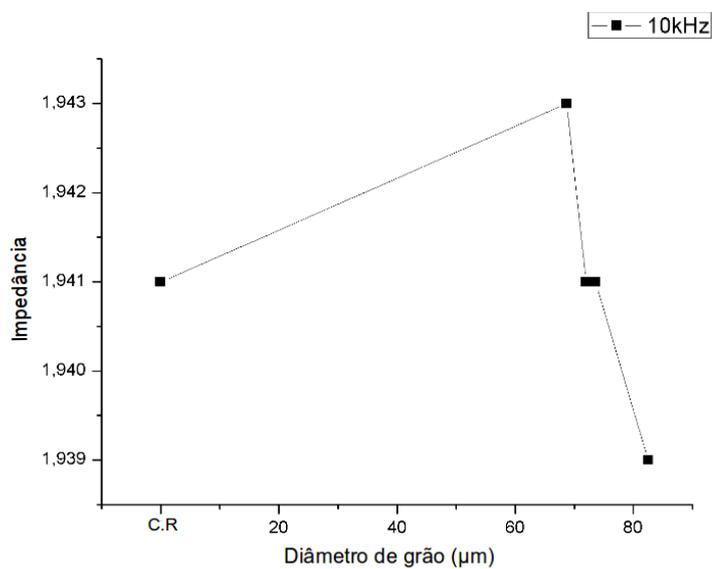
Nesse caso como o tratamento térmico envolveu também as variações nas fases metalúrgicas, pois além da normalização, ainda houve um tratamento de recozimento para o aumento do diâmetro médio de grão. Existe um ajuste entre as paredes de domínios e os contornos de grãos, mesmo estes últimos sendo bem menores que os primeiros [4].

Os domínios magnéticos são ímãs com polos opostos, assim quando eles ficam juntos existe uma repulsão natural entre eles. Para que o material fique com a menor energia magnética possível os domínios se ajustam de tal forma a obter um campo magnético uniforme, mesmo esses domínios estando separados pelo contorno de grãos. Assim, essas ligações entre domínio e contorno de grãos causam uma dependência ao processo de magnetização que vincula as variações no crescimento de grão também ao processo de magnetização, justificando os resultados dos gráficos abaixo.

Além disso, com já citado antes, os valores mais precisos para a impedância dependem da frequência adotada no processo que neste caso são 1 e 10kHz.

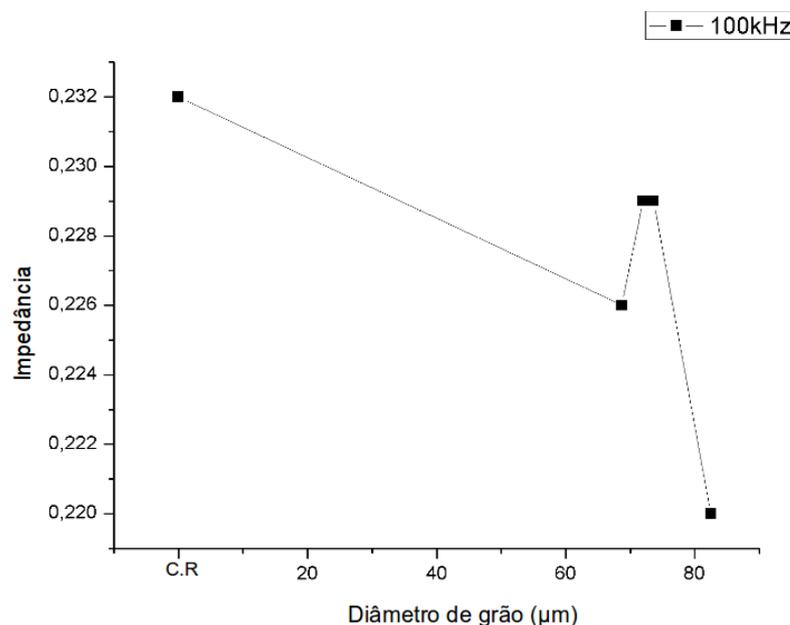
Figura 73: Impedância em função do diâmetro médio de grão (freq. excitação = 1kHz).

Fonte: Próprio autor

Figura 74: Impedância em função do diâmetro médio do grão (freq. excitação = 10kHz).

Fonte: Próprio autor

Figura 75: Impedância em função do diâmetro médio do grão (freq. excitação = 100 kHz).



Fonte: Próprio autor

O perfil dos três gráficos acima que relacionam a impedância com o tamanho de grãos para diferentes bandas de frequência são semelhantes. Como se observa a impedância que diminui com o aumento da frequência, assim valores de frequência alta tem um valor baixo da impedância. Essa é uma resposta natural da própria amostra, conforme Equação 30. De acordo com essa equação os valores de campo que penetram no material são limitados a certa profundidade, impossibilitando que avaliações mais profundas da estrutura sejam investigadas.

Para determinar a profundidade máxima alcançada pelo fluxo da sonda e também pelo *yoke* do Barktech é preciso determinar o valor da resistividade elétrica da permeabilidade magnética relativa para cada amostra. Para determinar a resistividade elétrica foi utilizado o método da sonda de 4 pontos [62], conforme procedimento citado em capítulos anteriores. Para determinar a permeabilidade foi feito um processamento de 20 ciclos completos de magnetização. O valor da permeabilidade do ar foi adquirido da literatura $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{T.m/A}$. A Tabela 7 mostra os valores resistividade elétrica e da permeabilidade magnética.

Tabela 7: Valores da resistividade e permeabilidade relativa

Amostras	Resistividade ($\mu\Omega.m$)	Permeabilidade (A/m)	Permeabilidade relativa $\mu_r = \mu/\mu_0$
Referência	0,3910	0,00299	2379
12 horas	0,2635	0,00358	2848
24 horas	0,2597	0,00312	2481
40 horas	0,2234	0,00314	2498
60 horas	0,2012	0,00306	2435
1%CT	0,2801	0,00318	2530
1%ST	0,3990	0,00345	2745
3%CT	0,2780	0,00308	2450
3%ST	0,4019	0,00325	2586
5%CT	0,2620	0,00360	2864
5%ST	0,4441	0,00361	2872
7%CT	0,2543	0,00355	2825
7%ST	0,4821	0,00372	2960

Fonte: Próprio autor

A partir dessa tabela é possível determinar o grau de penetração do campo magnético dentro da amostra, ou seja, determinar a profundidade padrão de penetração para os dois experimentos RMB e CP, ou seja, até qual profundidade foi possível extrair informação.

A partir da Equação 30, pode-se determinar o valor médio da penetração para o RMB para a frequência de 10 Hz e para CP adotando a menor frequência de 1 kHz. Assim, pode-se definir um valor médio de penetração padrão para esse conjunto de amostras. Os valores médios calculados para permeabilidade e resistividade elétrica são 0,00333 A/m e 0,318 $\mu\Omega.m$, respectivamente. A partir desses valores é possível determinar o valor da profundidade padrão média de 3,4mm.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi analisado o comportamento do sinal de RMB e das correntes parasitas para amostras do aço ASTM A516 Gr. 60, submetidas a três tipos de tratamento termomecânica: laminação, laminação – normalização e recozimento.

Para as amostras que foram apenas laminadas foi observado um aumento da amplitude de pico do sinal de RMB na mesma direção de laminação, devido à maior anisotropia gerada, sendo observado também que os demais picos diminuía à medida que se aproximava da direção perpendicular à direção de laminação. O maior valor de pico encontrado foi para a laminação de 0° e menor para 90° . Além disso, foi observado também que a posição, largura, simetria, elevação do valor de magnetização média e afastamento dos picos, variavam com o grau e direção de laminação. Foi observado também que a posição do pico em relação à corrente se comportava seguindo um padrão linear para o ângulo 0° , mas à medida que esse ângulo aumentava sua posição se desorganizava não sendo possível determinar uma regularidade de crescimento quando atingira o valor de 90° .

Para análise da energia do sinal RMB_{energia} foi observado um aumento bem definido à medida que o grau de laminação aumentava, tanto para a rotação de 0° como para a de 90° . Esse resultado é justificado pelo aumento da constante de anisotropia. Contudo, a intensidade do sinal da rotação de 90° foi menor. Resultado semelhante ocorre para os sinais de RMB_{rms} .

Na análise estatística as amostras apresentaram-se com assimetrias positivas ou assimetrias negativas, correspondendo respectivamente as duas regiões coercitivas: nucleação e aniquilação de domínios. Ocorreu também uma aproximação do eixo de simetria à medida que o grau de laminação foi aumentando em todas as direções de magnetização, diferenciando apenas pela assimetria positiva ou negativa nas direções de fácil e difícil magnetização. Já os valores de curtose mostraram que existe um afunilamento da curva gaussiana, ou seja, uma confirmação de que a maior concentração de eventos foi entre estas duas regiões. Sendo assim, possível afirmar que o 3º e 4º momento estatístico consegue diferenciar entre as regiões do campo coercitivo onde se concentra as maiores intensidades dos eventos de Barkhausen.

Para os valores da impedância das correntes parasitas foi observado que para baixas frequências de excitação tem-se uma resposta mais precisa sobre o comportamento da

microestrutura, sendo o valor de 1 kHz considerado apropriado e o valor 100 kHz não apropriado para a análise.

Para as amostras laminadas com tratamento térmico, observou-se que o valor e o comportamento da amplitude do pico do RMB diminuíram com o aumento do grau de deformação, sendo a amplitude de pico encontrada, inferior ao sinal das amostras que foram apenas laminadas tanto para as amostras na direção 0° quanto na direção de 90° . Para os sinais a partir da direção de 0° foi observada uma regularidade no decrescimento do sinal, seguindo um padrão linear. Contudo, quando o grau de deformação aumentou os sinais adquiriam um comportamento irregular, dificultando a avaliação do resultado.

Observou-se uma redução nos valores de RMB_{energia} e RMB_{rms} com o aumento do grau de laminação. A amostra com 5% de redução de espessura apresentou um desvio desse comportamento, que pode ser justificado por um aumento do encruamento da amostra ocasionada por uma falha durante a retirada das camadas de óxidos de ferro quando a amostra saiu do forno, além disto, também pode esta ligada ao fato de seu tratamento térmico ter ocorrido em forno diferente das outras amostras. Como resultado, os valores numéricos de RMB_{energia} e RMB_{rms} para as amostras de 5% e 7% estão próximos, já que as demais amostras não ocorreram os mesmos erros. Ainda segundo os valores de RMB_{energia} foi encontrado um valor decrescente para a constante de anisotropia que representa uma maior isotropia das amostras para valor maior de laminação e normalização.

Para a avaliação da assimetria foi observado que todos os resultados foram na região do simétrico em relação à distribuição de eventos sendo que alguns resultados oscilaram entre os intervalos de positivos e negativos. Os resultados positivos significam que a maior concentração de eventos ocorreu para o lado direito em quanto que o negativo ocorreu no lado esquerdo da transformada de Hilbert, ou seja, ambas dentro da região de campo coercivo como provam os resultados da avaliação por curtose. Nesta avaliação o valor de curtoses diminui com o aumento da deformação o que corresponde a um achatamento do sinal. Esse resultado pode ser sugerido como resposta à diminuição do valor da anisotropia magnética induzida pela laminação da amostra.

Para essas amostras foi observado que o valor da impedância da sonda aumentou com elevação do grau de laminação para as frequências de 1 kHz e 10 kHz sendo o resultado disforme para a frequência de 100 kHz. Contudo, para a amostra de 10 kHz obteve-se um resultado mais preciso, pois mostrou um gráfico linear da variação de impedância com a

deformação plástica. Com a sonda de 4 pontos foi observado que o valor da resistividade e da permeabilidade diminui com o grau de laminação.

Para os resultados do sinal da sonda de 4 pontos e da permeabilidade magnética foi observado que o valor da resistividade aumentou com o grau de laminação, já os valores da permeabilidade não seguiram um padrão regular de crescimento ou decréscimo. Como a impedância causada pela permeabilidade magnética é maior que o valor observado para a resistividade, então mesmo a resistividade sendo maior não interfere acentuadamente no resultado. O gráfico das correntes parasitas, contudo, mostrou que a impedância ascende com o aumento da laminação o que contradiz o resultado esperado.

Para as amostras sem laminação, observou-se que a amplitude de pico para a cada amostra variou de acordo com o aumento do tempo de exposição ao forno. Assim, as amostras que ficaram mais tempo sofreram uma maior diminuição da intensidade dos dois picos. Além disso, o valor do sinal proporcional a corrente aproximadamente igual à zero sofreu uma diminuição com o aumento do tempo de exposição ao forno.

Para os dados estatísticos de assimetria e curtose foi observado que a distribuição de eventos ocorreram em maior parte na região de início de nucleação de novos domínios. Com exceção da amostra de 40 horas que ocorreu com maior intensidade na região de aniquilação.

Confrontando os resultados obtidos pelas duas técnicas foi observada a grande dependência entre o tamanho de grão com os sinais de CP e RMB, como foi observado pela variação de impedância da sonda de CP e pelas variações das amplitudes de pico.

Portanto, as alterações microestruturais tiveram grandes efeitos sobre os sinais da técnica de CP e RMB, ou seja, sobre as propriedades magnéticas das amostras, afirmando o potencial que essas duas técnicas apresentam para as avaliações não destrutivas, tendo apenas o cuidado com a calibração correta do equipamento.

Os resultados encontrados neste trabalho podem ser utilizados para fazer avaliações sobre o comportamento da microestrutura do aço ASTM A516 gr 60, observando a posição e tamanho das amplitudes de pico do sinal de RMB, por meio de ferramentas estatísticas e processamento de sinais para diferentes graus de laminação à frio e sem tratamento térmico posterior, já que estes apresentaram comportamento complexo, principalmente os seguintes a laminação.

6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar a influencia do percentual de cada microconstituente (perlita fina, perlita grossa, bainita, martensita) decorrente de diferentes tratamentos térmicos nos sinais de RMB e correntes parasitas.

Análise estatística da distribuição de eventos de Barkhausen na região de rotação de domínio magnéticos.

REFERÊNCIAS

1. HALLIDAY, D; RESNICK, R; MERRILL, J. **Fundamentals of Physics**. 3rd. ed. Pittsburgh: John Wiley & Sons, v. I, 1988.
2. GUIMARÃES, A. P. **Magnetismo e Ressonância Magnética em Sólidos**. Rio de Janeiro: EdUsp, 2009.
3. CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction To Magnetic materials**. 2rd. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, 2009.
4. LANDGRAF, F. J. G. Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de S.Paulo**, São Paulo, p. 128, 2000.
5. CHIKAZUMI, S. **Physics of Ferromagnetism**. 2rd. ed. New York: Oxford University Press, 2005.
6. CALLISTER, W. D. **Ciências e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 5ª Edição. ed. Rio de Janeiro: LTC, vol. Único, 2002.
7. LOWRIE, W. **Fundamentals os Geophysics**. Cambridge: Zurich Cambridge University Press, 1997.
8. D'AGRELLA, M. S. F. Universidade de São Paulo. **Geomagnetismo**, 2011. Disponível em: <www.iag.usp.br/geomagnetismo>. Acesso em: 21 janeiro 2013.
9. BUSCHOW, K. H. J.; BOER, F. R. D. **Physics os Magnetism nd Magnetic Mterials**. 1rd. ed. New Youk: Kluwer Academic Publishers , v. I, 2003.
10. MARTÍN, J. G.; GIL, J. G.; SÁNCHEZ, E. V. **Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing**. Sensors (Basel), Valladolid, February 2011.
11. HANBOOK, N. T. **Electromagnetic Testing**. 3rd. ed. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, v.5. 2004.
12. STEGEMANN, D. **Avanços Tecnológicos em END por Correntes Parasitas**. Revista dos END, p. 23-29, 1986.
13. RAJKUMAR, V. et al. **Characterization of aging behaviour in M250 grade maraging steel using eddy current non-destructive methodology**. Materials Science and Engineering: A, p. 233-140, Feb. 2007.
14. TESTING, A. S. **Electromagnetic Testing**. 3rd. : Nondestructive testing Handbook Testing Handbook , v. 5, 2004.

15. CESAR, P. F.; HENRIQUE, R. O. **Ensaio Não destrutivo por Correntes Parasistas**. Petrobras Petróleo Brasileiro S.A .
16. RAJKUMARA, K. V. et al. **Characterization of aging behaviour in M250 grade maraging steel using eddy current non-destructive methodology**. Materials Science and Engineering, v. 464, p. 233-240, Aug. 2007.
17. RAMOS, H. et al. **Using the skin effect to estimate cracks depths in metallic structures**. **cracks depths in metallic structures**. Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (12MTC 2009). p. 1361–1366 . Singapore : [s.n.]. 2009
18. KONOPLYUK, S. et al. **Characterization of ductile cast iron by eddy current methods**. NDT & E International, v. 38, p. 623-626, dec.2005.
19. BUTLLE, D. J.; MOORTHY, S. B. **Determination of Residual Stresses by Magnetic Methods**. ed National Physical, Newcastle, v. 88, 2006.
20. DESVAUX, S. et al. **The evaluation of surface residual stress in aeronautic bearings using the Barkhausen noise effect**. NDT & E International, França, v. 37, p. 9-17, Jan. 2004.
21. MOORTHY, V. et al. **Effect of tensile deformation on micromagnetic parameters in 0.2% carbon steel and 2.25Cr-1Mo Steel carbon steel and 2.25Cr-1Mo steel**. Acta Materialia , v. 47, n. 6, p. 1869-1878, 1999.
22. KRAUSE, T. W. et al. **Investigation of the stressdependent magnetic easy axis in steel using magnetic Barkhausen noise** . Journal of Applied Physics , Ontario, Canada, 17 p.79-4242. Dec. 1996.
23. CAPÓ-SÁNCHEZ, J.; BENÍTEZ, J.; PADOVESE, L. **Dependence of the magnetic Barkhausen emission with carbon content in commercial steels**. Journal of Materials Science, ELSEVIER , v. 39. p. 1367-1370., 2004.
24. MOORTHY, V.; SHAW, B. A.; HOPKINS, P. **Surface and subsurface stress evaluation in case-carburised steel using high and low frequency magnetic barkhausen emission measurements**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Bristol, UK, v. 299 p. 362-375, Apr. 2006.
25. STEFANITA, C. G.; ATHERTON, D. L.; L, C. **Plastic versus elastic deformation effects on magnetic Barkhausen noise in steel**. Acta Materialia, Ontario, Canada, v. 48, p. 3545-3551, Aug. 2000.
26. ROTHEA-GATELIER, C. et al. **Characterization of pure iron and (130 p.p.m.) carbon “iron binary alloy by Barkhausen noise measurements: study of the influence of stress and microstructure**. Acta Materialia, v. 46, p. 4873-4882, Sep. 1998.

27. BLAOW, M. E. A. **Effect of deformation in bending on magnetic Barkhausen noise in low alloy steel.** Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties, Newcastle University, UK, v. 386, p. 74-80, Sep. 2004.
28. YAMAURA, S.; FURUYA, Y.; WATANABE, T. **The effect of grain boundary microstructure on Barkhausen noise in ferromagnetic materials.** Acta Materialia, Japan, v. 49, n. Issue 15, p. 3019-3027, Sep. 2001.
29. DAVUT, K.; GUR, C. H. **Monitoring the Microstructural Changes During Tempering of Quenched SAE 5140 steel by Magnetic Barkhausen Noise.** Springer Science, Business Media e LLC, v. 26, p. 107-113, out. 2007.
30. SAKAMOTO, H.; OKADA, M.; HOMMA, M. **Theoretical Analysis of Barkhausen Noise In carbon Steels .** IEEE Transactions on Magnetics, , Sendai, v. 23, p. 2236-2238 , Sep. 1987.
31. LANDGRAF, F. J. G. et al. **Effect of grain size, deformation, aging and anisotropy on hysteresis loss of electrical steels.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials, São Paulo, v. 215-216, p. 97-99, Dec. 2000.
32. KOO, K. M.; YAU, M. Y.; DICKON, H. L. **Characterization of pearlite grains in plain carbon steel by Barkhausen emission.** Materials Science and Engineering: A, Hong Kong, v. 351, p. 310-315, Jun. 2003.
33. PADOVESE, L. R.; MARTIN, N. E. A. **Time-frequency and Time-Scale analysis of Barkhausen noise signals.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part G, Journal of Aerospace. p. 577-588, 2009
34. PADOVESE, P. D. L. R. **Ladin:** Laboratório de Dinâmica e Instrumentação-USP, 2011. Disponível em:
<http://www.ladin.usp.br/END_BARKTECH.html>. Acesso em: 29 Abril 2014.
35. BUKKI-DEME, A. A. E. **Effect of anisotropic microstructure on magnetic Barkhausen noise in cold rolled low carbon steel.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Debrecen, Hungria, v. 322, p. 1748-1751, Jul. 2010.
36. DHAR, A.; CLAPHAM, L.; ATHERTON, D. L. **Influence of uniaxial plastic deformation on magnetic Barkhausen noise in steel.** NDT & E International, Kingston, v. 34, p. 507-514, Dec. 2001.
37. HILL, R.; GENG, R. S.; COWKING, A. **Acoustic and electromagnetic Barkhausen emission from iron and steel: application of the technique to weld quality assessment and NDE.** British Journal os NDT, Londres, v. 35, n. 5, p. 225-228, 1993.
38. ZERGOUG, M. et al. **Thermally affected characterization region by Barkhausen Noise.** Ultrasonics. v. 37, p. 703-707, 2000.

39. BENÍTEZ, J. **Estudio del ruido magnético de Barkhausen en aceros al carbono.** teses de Doutorado, santiago de cuba, 2008.
40. OPPENHEIM, A. V.; RONALD, W. S. **Discrete-Time Signal Processing.** 2rd. NJ: Prentice Hall: Upper Saddle River, 1999.
41. CAMPOS, M. A. **Métodos magnéticos não destrutivos para caracterização.** Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo São Paulo . São Paulo, p. 147. 2012.
42. GIRALDO, C. P. S. **Avaliação de juntas soldadas de aços carbono através do ruído magnético de Barkhausen.** USP. São Paulo, p. 122. 2007.
43. BROWN, S. **Measures of Shape: Skewness and Curtoses.** Measures of Shape: Skewness and Kurtosis, 2008. Disponível em: <<http://www.tc3.edu/instruct/sbrown/stat/shape.htm>>. Acesso em: 30 April 2014.
44. VISWANATHN, U. K.; K., D. G.; ASUNDI, M. K. **Metall. Trans. A**, v. 21, p. 2429-2442, 1990.
45. ZERGOUG, M. et al. **Relation between mechanical microhardness and impedance variations in eddy current testing.** NDT & E International, p. 65-72, 2004.
46. MERCIER, D. et al. **Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing.** Journal International, p. 652-660, dec. 2006.
47. LIU, K.; ZHAO, Z.; ZHANG, Z. **Eddy Assessment of the Cold Rolled Deformation Behavior os AISI 321 Stainless Steel.** Journal of Materials Engineering, Dec. 2011.
48. KHAN, S. H. et al. **Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reduction.** Computational Materials Science, Rawalpindi, Pakistan, v. 43, p. 623-628, Oct. 2008.
49. KHAN, S. H. et al. **Pearlite determination in plain carbon steel by eddy current method.** Journal of Materials Processing Technology, Lahore, Pakistan, v. 200, p. 316-318, May 2008.
50. UCHIMOTO, T. et al. **Eddy Current evaluation of irons for material characterization.** Journal of Magnetism Magnetic Materials, Moscow, p. 493-496, mar. 2003.
51. ROBERT, W.; CAHN; HAASEN, P. Physical Metallurgy . **Elsevier Science** , Amsterdam , v. I, 1996.
52. ADLER, H.; PFEIFFER, H. **The influence of grain size and impurities on the magnetic properties of the soft magnetic alloy 47,5% NiFe .** Magnetism, IEEE Transactions , v. 10, p. 172 – 174 , 1974.

53. DEGAUQUE, J. B. et al. **Influence of the grain size on the magnetic and magnetomechanical properties of high-purity iron** . Journal of Magnetism and Magnetic Materials , v. 26, p. 261–263 , Mar. 1982.
54. SABLİK, M. J. **Modeling the effect of grain size and dislocation density on hysteretic magnetic properties in steels**. Southwest Research Institute , San Antonio, Texas , Aug. 2000.
55. MAEDA, N. et al. **Degradation detection of materials used in nuclear power plant components applying probe-type eddy current sensor Part 1 detection of thermal embrittlement in duplex stainless steel**. Journal of JSNDI, v. 45, n. 8, p. 609, August 1996.
56. HABIBY, F. et al. **Austenite determination by eddy current measurements in a maraging steel**. NDT & E International, Rawalpindi, Pakistan, v. 25, p. 145-146, Jul. 1992.
57. YIN, W. et al. **Exploring the relationship between ferrite fraction and morphology and the electromagnetic properties of steel**. J Mater Sci, v. 42, p. 6854-6861, 2007.
58. PEREVERTOV, O. **Influence of the residual stress on the magnetization process in mild steel**. Journal of Physics D: Applied Physics, v. 40, n. 4, p. 949-954, Dec. 2007.
59. PASLEY, R. L. **Barkhausen effect - An indication of stress**. Mater. Eval., Amsterdam, v. 28, p. 157-161, 2003.
60. SEKINE, Y.; SOYAMA, H. **Evaluation of the surface of alloy tool steel treated by cavitation shotless peening using an eddy current method**. Surface and Coatings Technology, Aramaki, v. 203, p. 2254-2259, May 2009.
61. PRAXEDES, T. O. **Sistema Experimental para Realização de Ensaio Não destrutivos Magnéticos e sua Aplicação na Avaliação da Deformação Plástica do Aço A516 Grau 60**. [S.l.]: Dissertação de Mestrado, 2012.
62. GIROTTO, E. M.; SANTOS, A. V. **Medidas de resistividade elétricas DC em sólidos: como efetuá-la corretamente**. Scielo, São Paulo, v. 25, n. 4, July 2002.
63. KINSER, E. R. **Modeling microstructural effects on Barkhausen emission in surface-modified magnetic materials**. Magnetics, IEEE Transactions on , Iowa , v. 41, p. 3292 - 3294, oct. 2005.
64. KIKUCHI, H. et al. **Effect of Microstructure Changes on Barkhausen Noise Properties and Hysteresis Loop in Cold Rolled Low Carbon Steel**. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Morioka, Japan, v. 45, n. 6, p. 2744, Jul. 2009.
65. SABLİK, M. J. **Modeling the effect of grain size and dislocation density on hysteretic magnetic properties in steels** . Journal of applied physics ,

san antonio, texas , v. 89, n. 10, May 2001.

66. AMIRI, M. S.; KASHEF, M. **Application of eddy current nondestructive method for determination of surface carbon content in carburized steels.** NDT & E International, Mashhad, Iran, v. 42, p. 618-621, Oct. 2009.
67. GRIJALBA, F. A. F. **Desevolvimento de ensaio não destrutivo baseado no ruído magnético de Barkhausen para Caracterização de Tensões Elásticas e deformações plásticas em aç.** 161. ed. São Paulo: Tese de Doutorado, v. i, 2010.