



**Bruno Ribeiro de Araújo**

**Caracterização da Onda Emissora para Geração do Efeito de Barkhausen para Detecção de Precipitados Nanométricos em um Ensaio Eletromagnético**

**João Pessoa - PB  
Março de 2019**



**Bruno Ribeiro de Araújo**

# **Caracterização da Onda Emissora para Geração do Efeito de Barkhausen para Detecção de Precipitados Nanométricos em um Ensaio Eletromagnético**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como pré-requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletromagnetismo Aplicado

Edgard de Macedo Silva, Doutor

João Pessoa – PB, Março de 2019  
©Bruno Ribeiro de Araújo – braraujo.ee@gmail.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP  
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *campus* João Pessoa

A663c

Araújo, Bruno Ribeiro de.

Caracterização da onda emissora para geração do efeito de Barkhausen para a detecção de precipitados nanométricos em um ensaio eletromagnético / Bruno Ribeiro de Araújo. – 2019.

67 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB / Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Edgard de Macedo Silva.

1. Onda emissora - Caracterização. 2. Ruído Magnético de Barkausen - RBM. 3. Ensaio eletromagnético. 4. Precipitados nanométricos. I. Título.

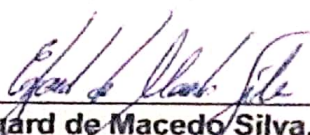
CDU 621.3.018.7

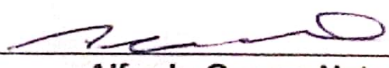
# Caracterização da onda emissora para geração do efeito de Barkhausen para detecção de precipitados nanométricos em um ensaio eletromagnético

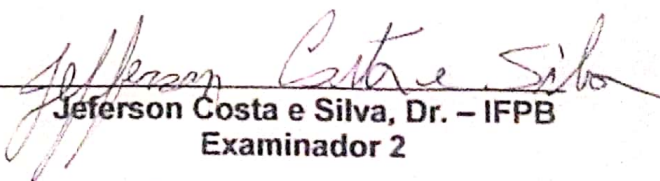
Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como pré-requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

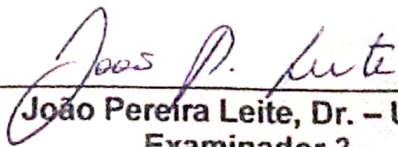
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_.

## BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Edgard de Macedo Silva, Dr. – IFPB  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Alfredo Gomes Neto, Dr. – IFPB  
Examinador 1

  
\_\_\_\_\_  
Jeferson Costa e Silva, Dr. – IFPB  
Examinador 2

  
\_\_\_\_\_  
João Pereira Leite, Dr. – UFPB  
Examinador 3

João Pessoa – PB  
Março de 2019

Dedico este trabalho ao meu orientador e grande amigo Edgard Silva por todo o incentivo e ajuda para que isso fosse possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Brindo e agradeço a vida por ter nascido do fruto do amor dos meus pais, pessoas amáveis, pacíficas e de valor. Desta união, minha irmã foi gerada, criatura inteligente e determinada a qual tenho muito apreço.

Agradeço ao meu cunhado que tem sido um irmão para mim.

Agradeço a minha namorada por ser minha companheira nos estudos e no amor. A sua família que me acolheu e me aconselhou bem.

Agradeço a todos que fizeram parte do grupo GSCMat que foi minha segunda família durante 6 anos. Ao IFPB pelo suporte financeiro com a bolsa de mestrado.

Agradeço em especial ao professor doutor Edgard, por ter sido meu amigo, conselheiro e grande motivador, o qual me orientou com maestria e que me ensinou com seu exemplo de pessoa, o caminho para uma vida afortunada. O meu muito obrigado!

## RESUMO

O ruído magnético de Barkhausen vem sendo estudado em ensaios eletromagnéticos para detecção de variações microestruturais em materiais ferromagnéticos. Formações de novas fases devido à imposição de ciclos térmicos, efeitos de deformações, tensões internas, por exemplo, servem como barreiras para o deslocamento das paredes dos domínios magnéticos. A interação entre esses e os pontos de ancoragem geram picos de tensões que são detectados. Os ensaios eletromagnéticos baseados na análise do ruído têm como princípio a aplicação de uma onda por uma bobina emissora e a captura da onda induzida em uma bobina receptora. O presente trabalho estuda os efeitos da aplicação de ondas emissoras de formato triangular e senoidal na detecção da formação de precipitados finos em um aço inoxidável duplex, em que uso daquela se justifica pelo trabalho predecessor, enquanto esta, pelo uso recorrente na literatura. Ondas das duas formas com frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz e amplitudes de 1 V, 3 V, 5 V, 7V e 9 V foram aplicadas com bobinas emissoras e receptoras posicionadas em superfícies opostas do material. As ondas com melhores amplitudes de medidas foram escolhidas para acompanhar a formação de precipitados obtidos na temperatura de 475 °C, em um aço SAF 2205. Os resultados mostram ser possível a detecção das novas fases com os dois tipos de ondas estudadas. As ondas triangulares detectaram o ruído de Barkhausen com todas as frequências e amplitudes estudadas. Contudo, a aplicação de ondas de forma senoidal, apesar de ser possível usar as mesmas frequências, teve o seu uso dependente da amplitude, ou seja, frequências de 5 Hz necessitam amplitudes superiores a 5 V e de 10 Hz amplitudes acima de 3 V. As demais frequências captaram acima de 1 V. As melhores ondas dos dois tipos foram determinadas como de 15 Hz e 7 V e foram capazes de acompanhar a formação de precipitados finos em um aço inoxidável duplex.

## ABSTRACT

The magnetic noise of Barkhausen has been studied in electromagnetic tests to detect microstructural variations in ferromagnetic materials. Formations of new phases due to the imposition of thermal cycles, effects of deformations, internal stresses, for example, serve as barriers for the displacement of the walls of the magnetic domains. The interaction between these and the anchor points generate voltage peaks that are detected. The principle of electromagnetic tests based on noise analysis is to apply a wave emitted by the emitter coil and to capture the induced wave in a receiver coil. The present work studies the effects of the application of triangular and sinusoidal emitting waves in the detection of the formation of fine precipitates in a duplex stainless steel, in which the use of the first one is justified by the predecessor work, and this one, by the recurrent use in the literature. Waves of both forms, with frequencies of 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz and 25 Hz and amplitudes of 1 V, 3 V, 5 V, 7 V and 9 V, were applied with transmitter and receiver coils positioned on opposite surfaces of the material. The waves with better amplitudes of measurements were chosen to follow the formation of precipitates obtained at the temperature of 475 °C, in a steel SAF 2205. The results show that it is possible to detect the new phases with the two types of waves studied. The triangular waves detected Barkhausen noise with all frequencies and amplitudes studied. However, the application of sinusoidal waves depends on the amplitude, although it is possible to use the same frequencies, in other words, frequencies of 5 Hz require amplitudes greater than 5 V, and frequencies of 10 Hz require amplitudes above 3 V. The other frequencies captured above 1 V. The best waves of the two types were determined as 15 Hz and 7 V and were able to track the formation of fine precipitates in a duplex stainless steel.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

		Pág.
Figura 2.1	(a) A parede do domínio começará a se mover em direção à partícula (local de fixação). (b) A parede de domínio atinge um local de fixação e é fixada. (c) A parede de domínio libera o local de fixação e gera um salto de Barkhausen.....	19
Figura 2.2	Salto de Barkhausen ao longo da curva inicial de magnetização..	20
Figura 2.3	Diagrama esquemático do sistema de medição do RMB para uma bobina receptora de superfície.....	21
Figura 2.4	Diagrama esquemático do sistema de medição do RMB para uma bobina receptora de envolvente.....	21
Figura 2.5	Diagramas esquemáticos. (a) Bobina emissora de único enrolamento (b) Bobina emissora de duplo enrolamento, enrolada em série de oposição.....	22
Figura 2.6	Configuração de medição .....	23
Figura 2.7	Imagem microscópica ótica da microestrutura de DP com 37% da fase de martensita (regiões escuras e claras representam a martensita e a ferrita, respectivamente) .....	24
Figura 2.8	Ilustração esquemática do sistema de medição do RMB .....	25
Figura 2.9	Propriedades mecânicas dos aços DF com diferentes percentuais de martensita em função das características do pico de RMB. Relações de altura dos picos dos perfis RMB e (a) LE, (b) LRT e (c) DV; e relações de posição de pico do RMB e (d) LE, (e) LRT e (f) .....	25
Figura 2.10	Micrografia realizada por microscópio eletrônico de varredura para (a) estrutura lamelar e (b) estrutura esferoidizada.....	27
Figura 2.11	Esquema do arranjo experimental usado para medição de ruído de Barkhausen .....	28
Figura 2.12	Perfil RMB das amostras .....	29
Figura 2.13	Valores de RMS e altura do pico em função do número de sequências .....	29

Figura 2.14	Observação óptica da martensita induzida em aço AISI 304L .....	30
Figura 2.15	(a) Diagrama esquemático do dispositivo experimental do ruído de Barkhausen. (b) Área de contato da sonda com o dispositivo de magnetização, a bobina receptora e o sensor Hall (vista inferior) .....	31
Figura 2.16	Valores de RMS e altura de pico em função do número de sequências .....	32
Figura 2.17	Resposta do ruído de Barkhausen versus campo magnético em função da deformação plástica para amostras de 200 $\mu\text{m}$ (amplificação logarítmica).....	33
Figura 2.18	Análise RMS do sinal de ruído de Barkhausen a uma frequência de magnetização de 50 Hz em função da densidade do fluxo magnético para diferentes distâncias entre as bobinas.....	34
Figura 2.19	Variação normalizada dos valores RMS do Ruído de Barkhausen dos sensores com densidade de fluxo a 50 Hz em aço silício a 3% de grão orientado .....	35
Figura 2.20	Microestrutura obtida por microscopia óptica do material como recebido (ataque Behara). . .....	36
Figura 2.21	Precipitado de $\alpha'$ em uma amostra de aço inoxidável duplex (pontos escuros).....	36
Figura 2.22	Desenho esquemático do experimento .....	37
Figura 2.23	Onda (a) triangular, (b) senoidal e (c) quadrada, com frequência de 5 Hz para amostras com precipitados .....	38
Figura 2.24	Medidas do valor RMS, para amostras com e sem precipitados, em função de diferentes amplitudes e das ondas com frequências de 5 Hz e (a) 25 Hz, (b) 50 Hz, (c) 75 Hz, (d) 100 Hz .....	40
Figura 3.1	Bancada experimental: gerador de sinais (1); cabos blindados (2); bobina emissora (3); amostra (4); bobina receptora (5); gaiola de Faraday (6); osciloscópio (7) e computador (8) .....	43
Figura 4.1	Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras triangulares com frequências de 5 Hz, 10 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V .....	49

Figura 4.2	Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras triangulares com frequências de 5 Hz, 15 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V .....	49
Figura 4.3	Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras triangulares com frequências de 5 Hz, 20 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V .....	50
Figura 4.4	Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras triangulares com frequências de 5 Hz, 25 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V .....	50
Figura 4.5	Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras triangulares com frequências de 15 Hz, 20 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V .....	51
Figura 4.6	Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras senoidais com frequências de 5 Hz e 10 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V .....	53
Figura 4.7	Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras senoidais com frequências de 5 Hz e 15 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V .....	54
Figura 4.8	Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras senoidais com frequências de 5 Hz e 20 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V .....	55
Figura 4.9	Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras senoidais com frequências de 5 Hz e 25 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V .....	55

Figura 4.10	Módulo da diferença das medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emisoras senoidais com frequências de 5, 10, 15, 20 e 25 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V .....	56
Figura 4.11	Valores de RMS para ondas triangulares e senoidais de frequência de 15 Hz e amplitudes de 5 V e 7 V .....	57
Figura 4.12	Valores de RMS para ondas emisoras de 15 Hz e 7 V de forma senoidal e triangular, em função do tempo de formação dos precipitados finos .....	59
Figura 4.13	Medidas de energia absorvida por impacto em função do tempo de envelhecimento .....	59

## LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1 Composição do AID UNS-S31803, como recebido, em % de peso.	43
Tabela 2 Comparativo entre as características do trabalho de Carvalho Filho (2018) e o atual .....	46

## LISTA DE SIGLAS

AID	Aço Inoxidável Duplex
B	Densidade de Fluxo Magnético
BRE	Bobina Receptora Envolvente
BRS	Bobina Receptora de Superfície
DF	Dupla Fase
FEM	Força Eletromotriz
GSCMat	Grupo de Simulação de Comportamento de Materiais
H	Campo Magnético Externo
R <sup>2</sup>	Coefficiente de Correlação
RMB	Ruído Magnético de Barkhausen
FFT	Transformada Rápida de Fourier
LRT	Limite de Resistência à Tração
HV	Dureza Vickers
LE	Limite de Escoamento

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 OBJETIVO GERAL.....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
2.1 RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN .....	19
2.2 SISTEMAS DE MEDIÇÃO DO RUÍDO DE BARKHAUSEN .....	20
2.3 APLICAÇÕES DO RMB.....	24
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
3.1 BANCADA EXPERIMENTAL .....	42
3.2 O MATERIAL .....	43
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL .....	44
3.4 PARÂMETRO PARA ANÁLISE DO RUÍDO DE BARKHAUSEN.....	44
3.5 DETERMINAÇÃO DA MELHOR ONDA PARA OBTENÇÃO DO RMB .....	45
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>47</b>
4.1 DETERMINAÇÃO DA CONDIÇÃO ÓTIMA PARA ENSAIO COM ONDA TRIANGULAR .....	47
4.2 DETERMINAÇÃO DA CONDIÇÃO ÓTIMA PARA ENSAIO COM ONDA SENOIDAL.....	52
4.3 APLICAÇÃO DA CONDIÇÃO ÓTIMA PARA ACOMPANHAMENTO DA FRAGILIZAÇÃO DE UM AID A 475 °C .....	57
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>61</b>
5.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS .....	62
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO A – GLOSSÁRIO .....</b>	<b>66</b>

**ANEXO B – MÉTODOS DE ANÁLISE ESTOCASTICA PARA O RUÍDO DE  
BARKHAUSEN.....67**



## 1. INTRODUÇÃO

O ruído magnético de Barkhausen (RMB) é um importante fenômeno magnético cujo sua medição tem sido considerada como uma técnica útil em aplicações diversas, como por exemplo avaliação não destrutiva de tensões micro e macro-residuais, detecção de fase deletéria, cálculo de diferentes porcentagens de perlita, investigação de diferentes tamanhos de grãos, identificação de diferentes estágios da deformação por tração e monitoramento de danos por fadiga. (GHANEI et al., 2014). Esse fenômeno é proveniente do deslocamento descontínuo das paredes dos domínios magnéticos, o qual ocorre abruptamente devido às barreiras (imperfeições, contornos de grão, inclusões, lacunas, deslocamentos, precipitados, etc.). Os saltos magnéticos gerados pelas movimentações das paredes são possíveis de serem relacionados a picos de tensão através do contato entre uma bobina receptora, responsável por detectar o campo induzido, e a superfície do material em estudo.

O RMB é gerado com o auxílio de uma bobina emissora de núcleo ferrítico e detectado com uma bobina receptora posicionadas na mesma superfície ou em superfícies opostas do material. Os parâmetros RMB dependem da frequência e da forma de onda do campo magnético de excitação. As frequências utilizadas estão na faixa de 0,1 Hz a 1 kHz e as formas de ondas triangulares e senoidais são as mais usadas.

Carvalho Filho (2018) realizou um ensaio eletromagnético baseado no ruído de Barkhausen para acompanhamento de transformações microestruturais em aço inoxidável duplex (AID) SAF 2205 e chegou à conclusão que os sinais com frequências inferiores a 25 Hz são preferíveis para se trabalhar com o ruído de Barkhausen com ondas triangulares, nas condições estudadas. Assim, propôs que um estudo mais detalhado fosse realizado nessa região. Logo, o presente trabalho dará continuidade à pesquisa do autor citado, a fim de completar a determinação dos parâmetros básicos do ruído magnético de Barkhausen para acompanhamento de formação de microestrutura no material estudado. Serão estudadas além das ondas de forma triangular, as senoidais que também são utilizadas na literatura. Em seguida, a melhor onda emissora entre as estudadas será utilizada para

acompanhamento da formação de precipitados finos em um aço inoxidável duplex na temperatura de 475 °C.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Determinar as características de uma onda emissora capaz de produzir o ruído de Barkhausen e acompanhar formações de precipitados finos em um aço SAF 2205.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar as características da onda emissora de forma triangular necessária para detectar o ruído de Barkhausen e acompanhar a formação de precipitados nanométricos;
- Determinar as características da onda emissora de forma senoidal necessária para detectar o ruído de Barkhausen e acompanhar a formação de precipitados nanométricos
- Acompanhar a formação de microestrutura em um aço inoxidável duplex na temperatura de 475 °C com as ondas ótimas obtidas.
- Correlacionar os resultados obtidos com as duas formas de onda estudadas.
- Publicar os resultados para a comunidade científica.

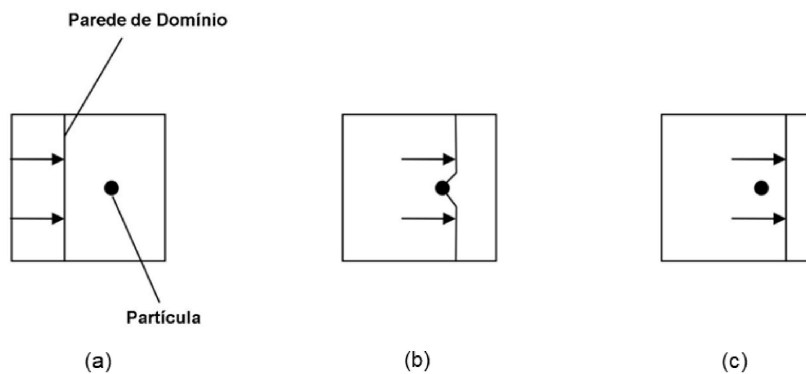
Este trabalho está dividido em quatro capítulos. A Revisão Bibliográfica é o segundo deles e descreve o princípio do ruído magnético de Barkhausen, assim como o sistema clássico de medição e suas aplicações, seguido da apresentação do trabalho que precede o atual estudo. Na sequência serão visto Materiais e Métodos, capítulo no qual é detalhada a bancada experimental de testes, o tipo e características do material utilizado, bem como a caracterização do material por técnicas consolidadas. Além disso, contém os procedimentos para determinação da melhor onda para obtenção do ruído de Barkhausen e por qual parâmetro de análise os dados serão tratados. O último ponto trata-se dos resultados e discussões e as conclusões alcançadas neste trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN

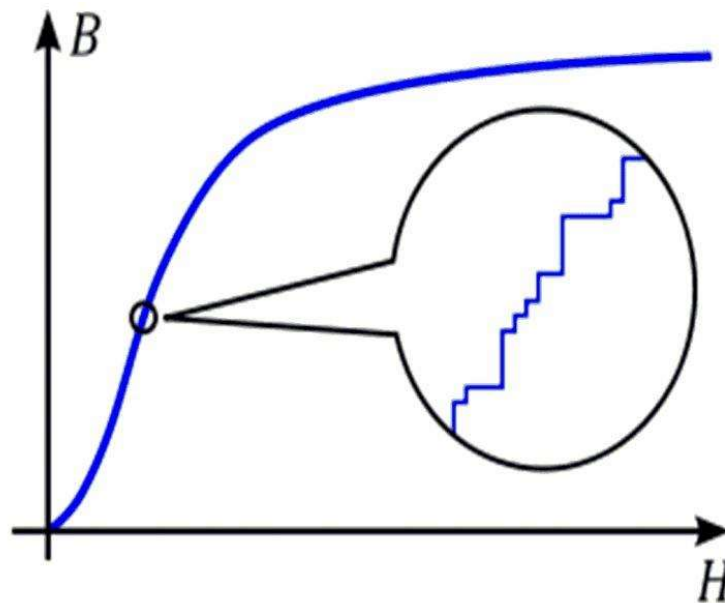
No processo de magnetização de materiais ferromagnéticos, as mudanças de magnetização não ocorrem de forma suave. Quando esses materiais são submetidos à aplicação de um campo magnético externo, variável e ininterrupto ( $H$ ), a densidade de fluxo magnético ( $B$ ) muda descontinuamente. Esse evento é justificado pelas movimentações das paredes dos domínios magnéticos que ocorrem abruptamente devido às barreiras (imperfeições, contornos de grão, inclusões, lacunas, deslocamentos, precipitados), as quais impedem o deslocamento. Esses defeitos irão prender a parede do domínio em movimento até que esta receba energia suficiente para romper tais barreiras. Uma representação desse efeito pode ser vista na Figura 2.1. Quando essa condição é alcançada, as paredes se deslocam gerando saltos magnéticos (Figura 2.2), os quais são possíveis relacionar a picos de tensão através do contato entre uma bobina receptora de enrolamento e a superfície do material, caracterizando, assim, um sinal denominado de ruído magnético de Barkhausen (RMB). Este fenômeno foi descoberto em 1917, entretanto publicado apenas dois anos depois. (CHUKWUCHEKWA, 2011; GHANEI et al., 2014; MOSES; PATEL; WILLIAMS, 2006)

**Figura 2.1 - (a) A parede do domínio começará a se mover em direção à partícula (local de fixação). (b) A parede de domínio atinge um local de fixação e é fixada. (c) A parede de domínio libera o local de fixação e gera um salto de Barkhausen.**



Fonte: CHUKWUCHEKWA, 2011.

Figura 2.2 – Saltos de Barkhausen ao longo da curva inicial de magnetização.



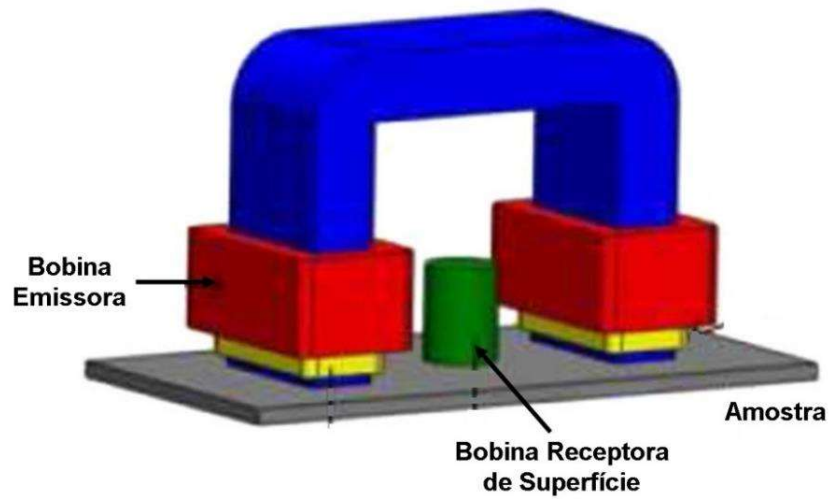
Fonte: CHUKWUCHEKWA, 2011.

## 2.2 SISTEMAS DE MEDIÇÃO DO RUÍDO DE BARKHAUSEN

O ruído magnético de Barkhausen é comumente gerado com o auxílio de um dispositivo de magnetização, o qual é composto de bobina posicionada em torno de um núcleo ferrítico em forma de U que mantém contato com as amostras a serem estudadas. Os parâmetros RMB dependem da frequência e da forma de onda do campo magnético de excitação. Na literatura, as frequências utilizadas estão na faixa de 0,1 Hz a 1 kHz. (CHUKWUCHEKWA, 2011; PAL'A; BYDŽOVSKÝ, 2014)

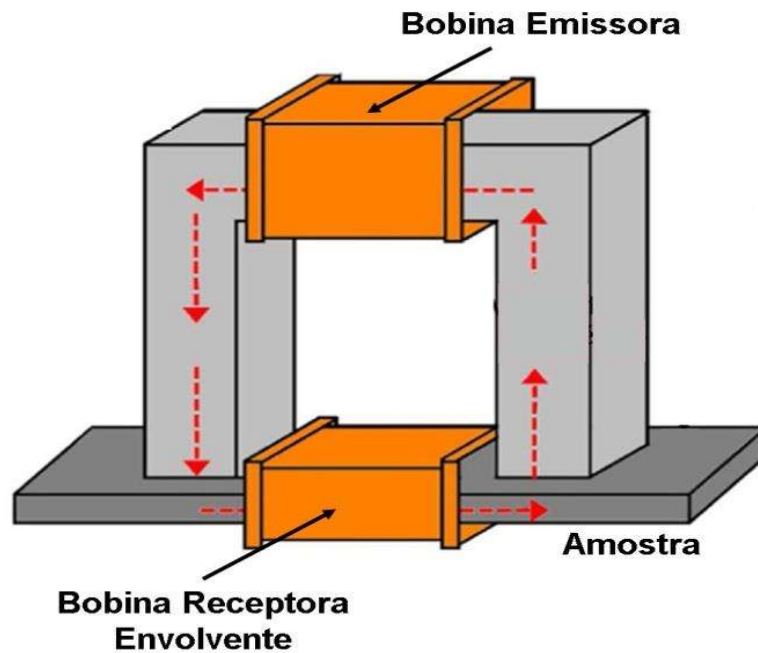
Existem dois tipos de técnicas de bobina receptora para medição do ruído de Barkhausen: de superfície e envolvente. A primeira, bobina receptora de superfície (BRS), possui um núcleo de ferrite, o qual age como um amplificador magnético de  $B$ , e seu eixo é posicionado perpendicularmente à superfície da amostra conforme a Figura 2.3. Na segunda técnica, a bobina denominada receptora envolvente (BRE) é enrolada em torno da amostra (Figura 2.4) e pode conter duas configurações de enrolamento: simples ou duplo. O diagrama esquemático destas configurações pode ser visualizado na Figura 2.5. (CHUKWUCHEKWA, 2011; KAHROBAEE; HEJAZI, 2017; MOSES; PATEL; WILLIAMS, 2006; SAMIMI; KRAUSE; CLAPHAM, 2016)

Figura 2.3 – Diagrama esquemático do sistema de medição do RMB para uma bobina receptora de superfície.



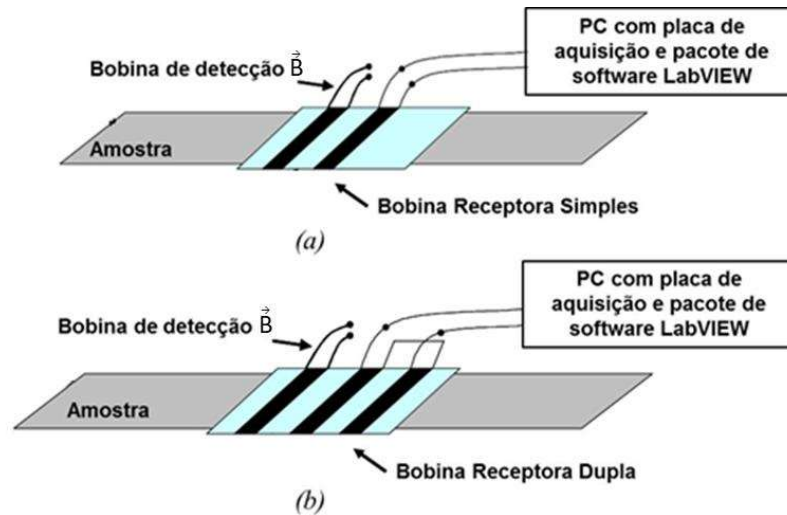
Fonte: Adaptado de SAMIMI; KRAUSE; CLAPHAM, 2016.

Figura 2.4 - Diagrama esquemático do sistema de medição do RMB para uma bobina receptora envolvente.



Fonte: Adaptado de KAHROBAEE; HEJAZI, 2017.

**Figura 2.5 - Diagramas esquemáticos. (a) Bobina receptora de único enrolamento (b) Bobina receptora de duplo enrolamento, enrolada em série e oposição**



Fonte: MOSES; PATEL; WILLIAMS, 2006.

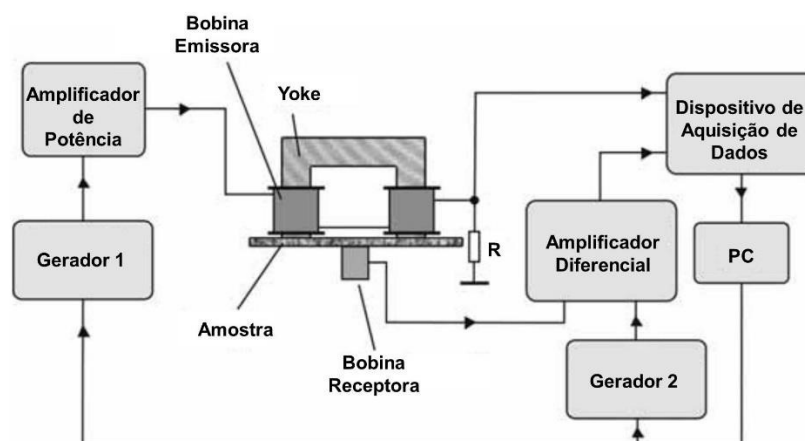
Na configuração de enrolamento simples, geralmente o componente de frequência limita a maioria das informações do RMB. Já na segunda configuração, o enrolamento duplo é realizado em série e em sentido oposto, com a finalidade de cancelar o componente de frequência de magnetização. (MOSES; PATEL; WILLIAMS, 2006)

Para obter apenas o ruído magnético de Barkhausen do sinal de saída da bobina receptora, este deve ser filtrado usando um filtro analógico e / ou digital, o qual faz-se necessário uma escolha apropriada da frequência de corte dado que pretende-se suprimir o componente contínuo perturbador do sinal da força eletromotriz (FEM) e simultaneamente preservar toda a informação útil (RMB). (PAL'A; BYDŽOVSKÝ, 2014)

Após a etapa da filtragem, é necessário tratar os dados estocásticos do RMB a fim de interpretá-lo. Os parâmetros frequentemente usados incluem o valor da raiz média quadrada (RMS, do inglês *root-mean-square*), soma de amplitudes, espectro de potência, Kurtosis e energia do ruído de Barkhausen. Outros métodos em uso são a FFT, a média, desvio padrão, a altura do pico, a posição e a largura dos perfis do RMB. (GHANEI et al., 2014; MOSES; PATEL; WILLIAMS, 2006)

Pal'a; Bydžovský (2014) propôs um método simples de medir o ruído de Barkhausen em dois estágios com o propósito de remover o componente de frequência de magnetização e manter o ruído de Barkhausen. O método de medição de dois estágios do RMB consiste em duas medições sucessivas do sinal da força eletromotriz. Em que, no primeiro momento o sinal capturado apenas pela bobina receptora fica gravado no gerador 2. Na segunda etapa, o gerador 2 transmite o sinal contido em sua memória e o dispositivo de aquisição de dados efetua a diferença deste sinal com o advindo do gerador 1. Logo, no caso ideal, os componentes contínuos dos sinais FEM serão subtraídos, restando apenas o equivalente a um sinal RMB. Para tal, o autor utilizou a configuração de medição representada na Figura 2.6, a qual usou um sinal senoidal de frequência de 50 Hz, excitando as amostras até a saturação. Previamente a cada medição o espécime foi desmagnetizado com a aplicação de um sinal senoidal cuja amplitude diminui exponencialmente para um valor próximo de zero. A bobina receptora de superfície fica posicionada na face oposta do dispositivo de magnetização perpendicularmente à superfície do corpo de prova e captura o sinal de saída que passa por um filtro passa-altas digital Butterworth de quarta ordem com uma frequência de corte que variou entre 2 kHz a 50 kHz. Foram utilizados 15 ciclos de magnetização.

**Figura 2.6 - Configuração de medição.**



**Fonte: PAL'A; BYDŽOVSKÝ, 2014.**

O autor afirma que o método proposto é capaz de remover o componente contínuo do sinal RMB sem usar qualquer filtragem, simplificando assim a medição, dado que elimina a etapa de escolha da frequência de corte, a qual muda de

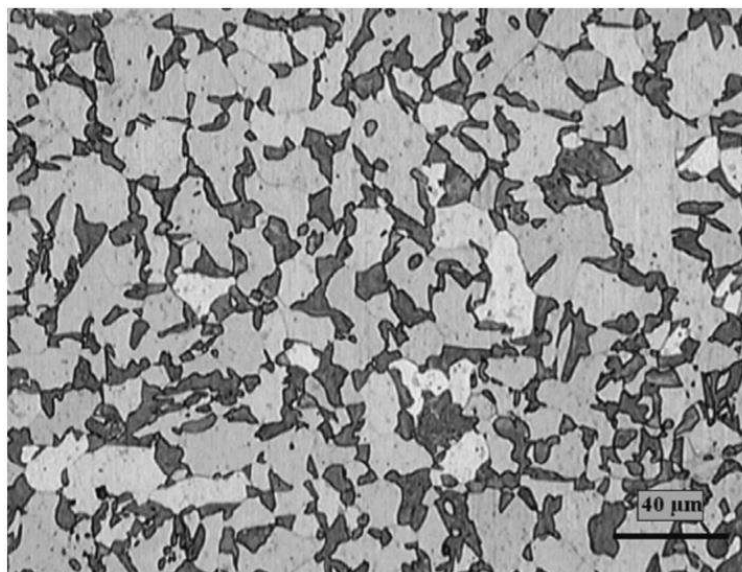


situação para situação. Logo, o objetivo principal que foi remover o componente contínuo do sinal FEM sem usar filtros foi alcançado. (PAL'A; BYDŽOVSKÝ, 2014)

## 2.3 APLICAÇÕES DO RMB

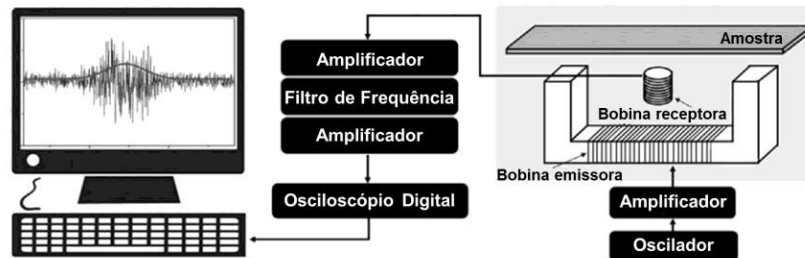
Ghanei et al (2014) utilizou o sistema de medição com bobina receptora de superfície (BRS) em seu estudo de caracterização da microestrutura e de propriedades mecânicas de aço com duas fases (DF). As fases que compõem este aço podem ser observadas na micrografia da Figura 2.7 em que as regiões escuras e claras representam a martensita e a ferrita, respectivamente. No processo de indução aplicou uma corrente de formato senoidal de baixas frequências (1 a 11 Hz, em intervalos de 1 Hz) a fim de diminuir a influência das correntes parasitas. O autor aplicou a análise de regressão entre as propriedades do material e as saídas do RMB, obtendo 7 Hz como a frequência ótima em decorrência ao maior valor do coeficiente de correlação ( $R^2$ ). O sinal capturado foi filtrado por um filtro passa banda (3–200 kHz) e empregou-se os parâmetros de posição e altura dos picos de RMB obtidos com a média de 10 sinais. A ilustração esquemática do sistema de medição pode ser visualizada na Figura 2.8.

**Figura 2.7 Imagem microscópica ótica da microestrutura de DF com 37% da fase de martensita (regiões escuras e claras representam a martensita e a ferrita, respectivamente).**



Fonte: GHANEI, S. et al., 2014.

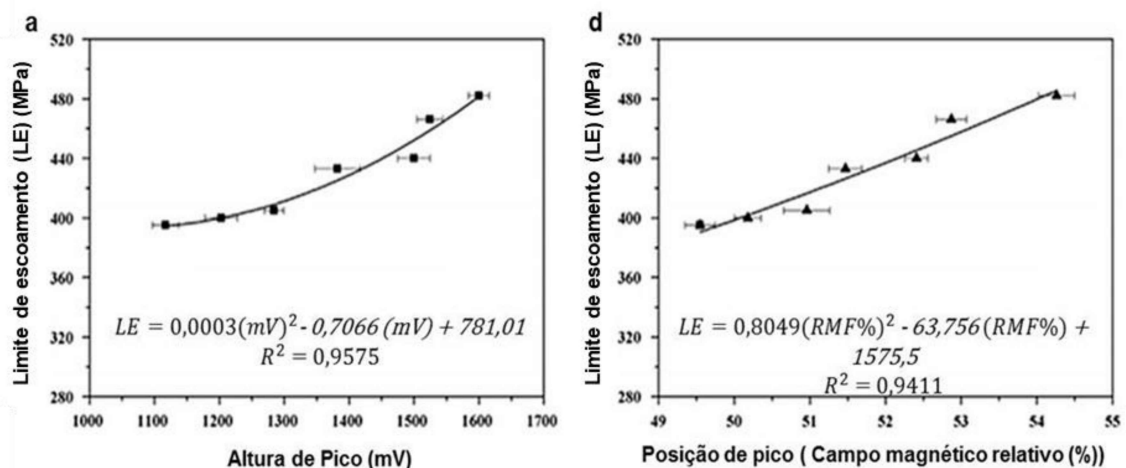
Figura 2.8 - Ilustração esquemática do sistema de medição do RMB.

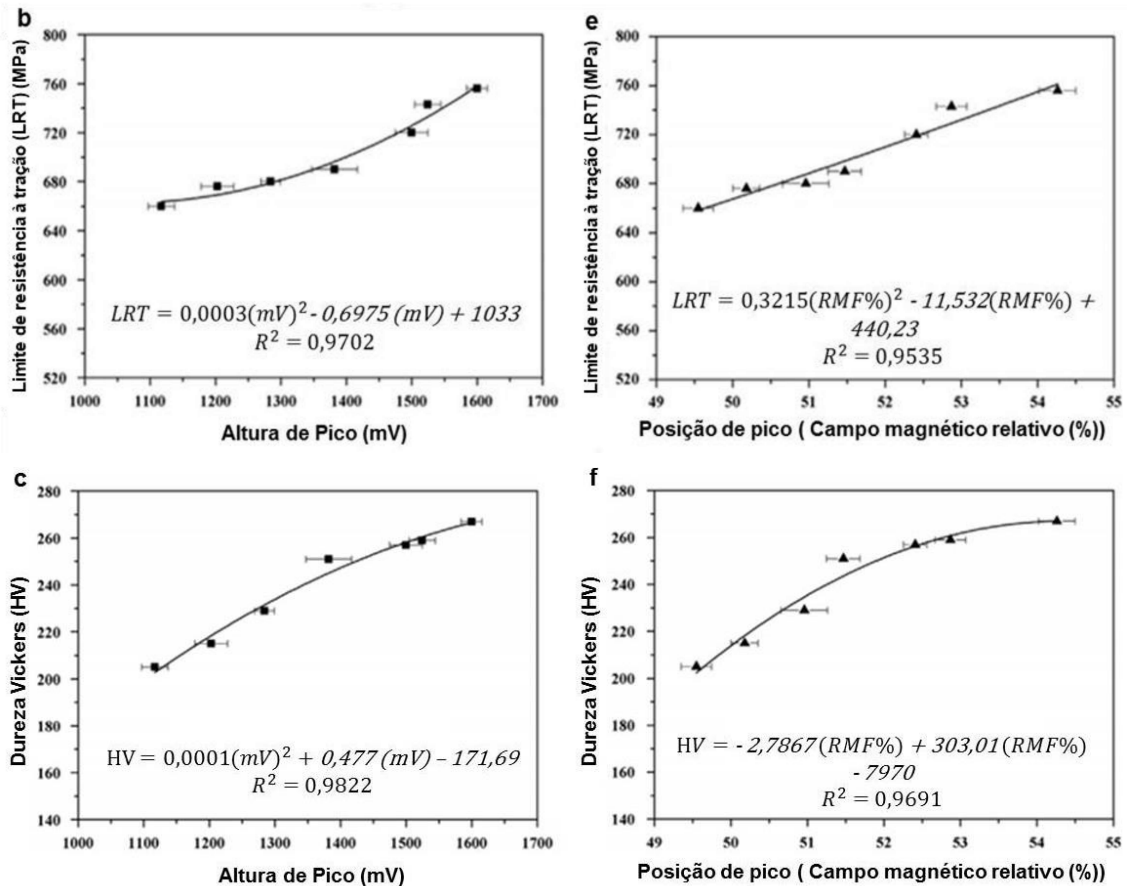


Fonte: GHANEI, S. et al., 2014.

O autor verificou que as intensidades da altura e da posição do pico de RMB são diretamente proporcionais às propriedades mecânicas dos aços de dupla fase (DF) investigadas. Foram resultados do trabalho o limite de escoamento (LE), limite de resistência à tração (LRT) e dureza Vickers (HV), assim como pode ser visto na Figura 2.9. O comportamento observado foi atribuído ao impedimento do deslocamento das paredes devido à alta densidade de discordâncias e tensões internas na estrutura da ferrita, bem como a alta densidade dos limites de cristal das placas de martensita. Por fim, concluiu-se que o RMB foi capaz de realizar a caracterização não destrutiva da microestrutura e propriedades mecânicas do aço DF. (GHANEI et al., 2014)

Figura 2.9 - Propriedades mecânicas dos aços DF com diferentes percentuais de martensita em função das características do pico de RMB. Relações de altura dos picos dos perfis RMB e (a) LE, (b) LRT e (c) DV; e relações de posição de pico do RMB e (d) LE, (e) LRT e (f) DV.



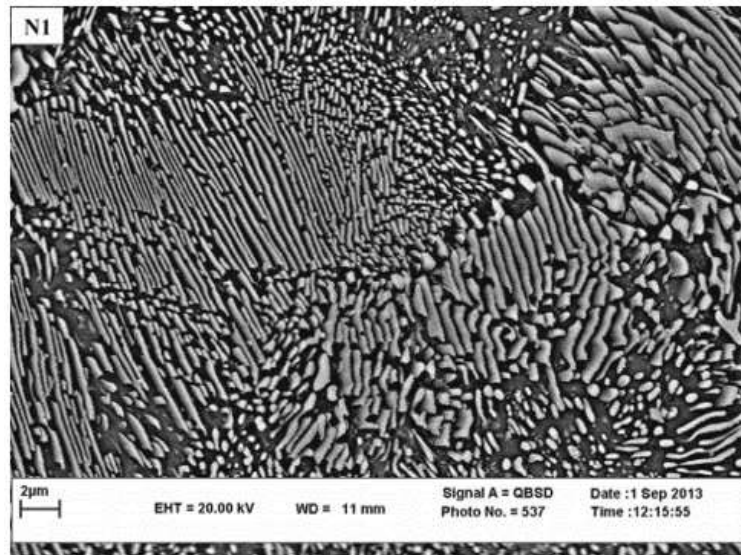


Fonte: GHANEI, S. et al., 2014.

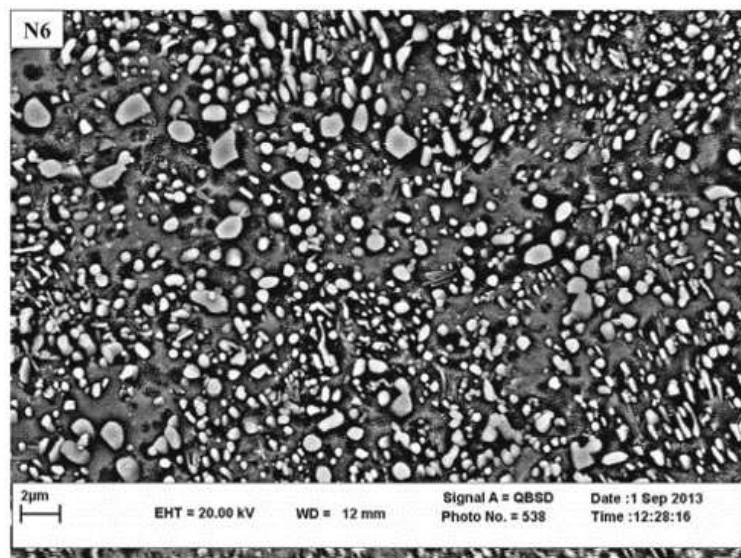
Jarrahi; Kashefi; Ahmadzade-Beiraki (2015) investigou a aplicabilidade da técnica de ruído de Barkhausen na avaliação de propriedades de usinagem de peças de aço de alto carbono com diferentes graus de esferoidização. Esta técnica consiste em aplicar um tratamento térmico no material de estrutura lamelar (Figura 2.10 (a)) com o intuito de esferoidizar a estrutura, dado que a forma de menor energia por unidade de volume que é a esfera (Figura 2.10 (b)), facilitando assim o deslocamento das paredes dos domínios magnéticos.

Uma onda senoidal em baixa frequência (4,5 Hz), advinda de um amplificador de potência e de um gerador de forma de onda, foi aplicado no dispositivo de excitação. Para o módulo de aquisição optou-se pela bobina receptora envolvente (BRE). O sinal de saída foi amplificado, filtrado por um filtro passa-altas a 150 Hz e posteriormente digitalizado através de uma placa Analógico-Digital (A/D) e um computador que ficou responsável pela interface. Três ciclos do sinal foram analisados por dois parâmetros de tensão RMS e perfil de Ruído de Barkhausen. O esquema do arranjo experimental pode ser visualizado na Figura 2.11.

Figura 2.10 - Micrografia realizada por microscópio eletrônico de varredura para (a) estrutura lamelar e (b) estrutura esferoidizada



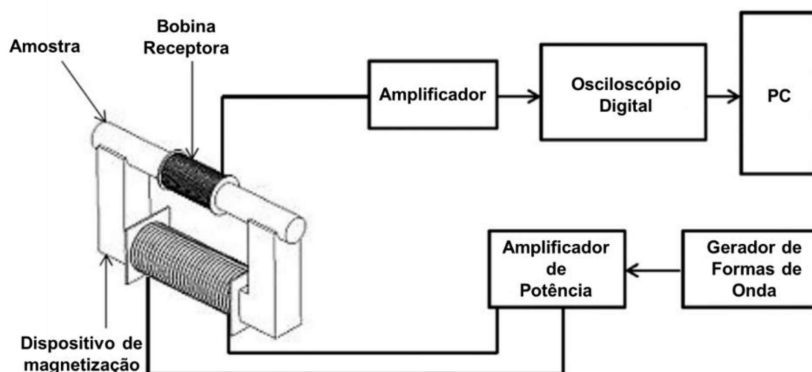
(a)



(b)

Fonte: JARRAHI; KASHEFI; AHMAZADE-BEIRAKI, 2015.

Figura 2.11 - Esquema do arranjo experimental usado para medição de ruído de Barkhausen.

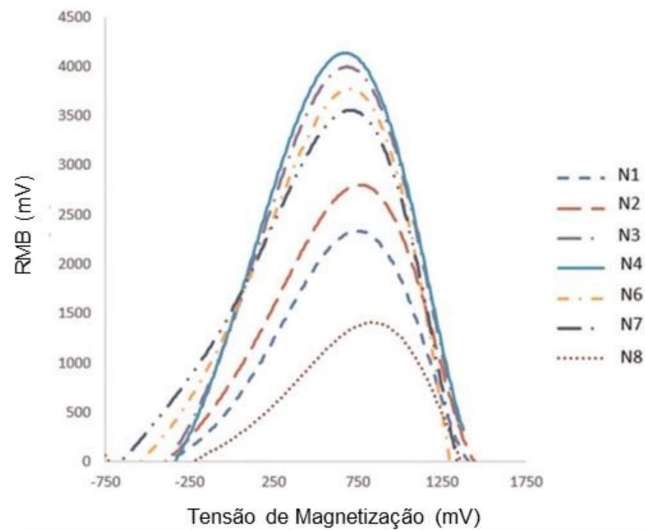


Fonte: JARRAHI; KASHEFI; AHMADZADE-BEIRAKI, 2015.

Todas as amostras foram normalizadas a 885 °C durante 30 min, das quais uma permaneceu normalizada, enquanto as sete demais passaram por dois ciclos de aquecimento consecutivos para produzir vários graus de esferoidização nomeados por ni (i é o número de ciclos de aquecimento repetidos ou seqüências de esferoidização ).

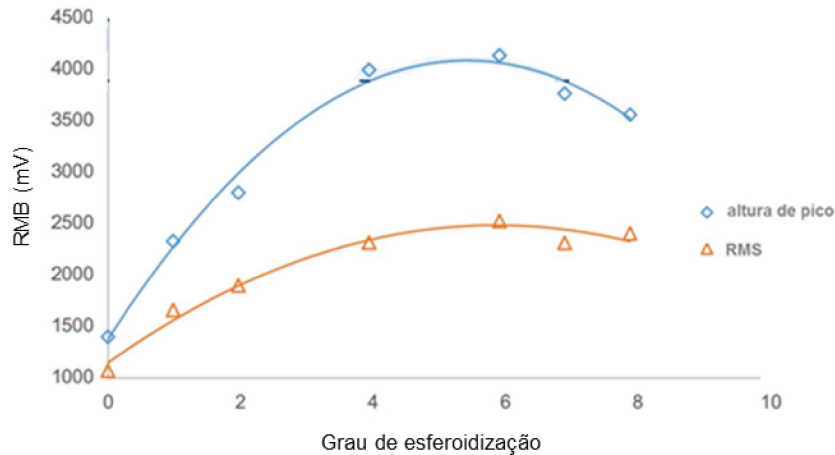
Os parâmetros perfis, altura do pico e da tensão RMB exibiram uma dependência similar do grau de esferoidização. Inicialmente mostraram um aumento e posteriormente diminuíram nos dois últimos ciclos de aquecimento (N7 e N8). Os perfis derivados dos sinais de Barkhausen das amostras, são apresentados na Figura 2.12, assim como a variação da altura do pico e da tensão RMB com as seqüências de esferoidização estão representadas na Figura 2.13.

Figura 2.12 – Perfil RMB das amostras.



Fonte: JARRAHI; KASHEFI; AHMADZADE-BEIRAKI, 2015.

Figura 2.13– Valores de RMS e altura do pico em função do número de sequências.



Fonte: JARRAHI; KASHEFI; AHMADZADE-BEIRAKI, 2015.

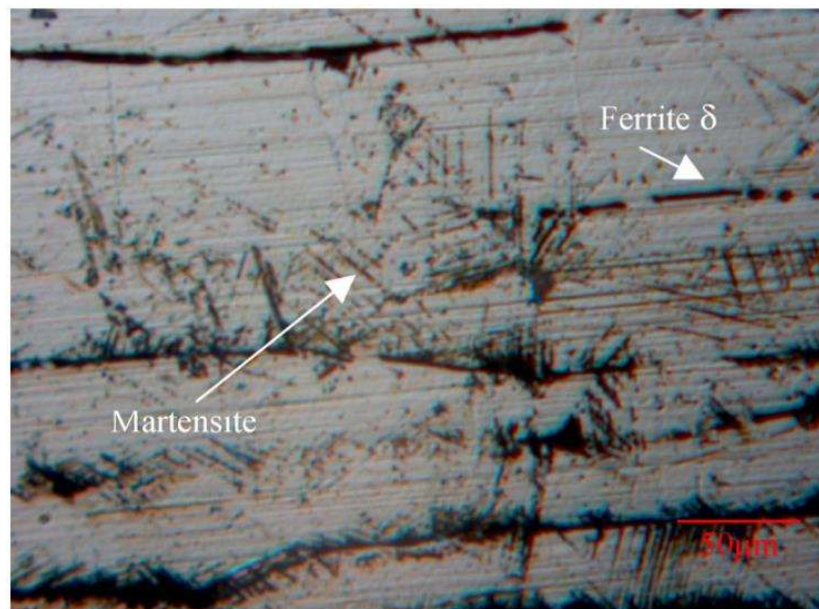
O autor chega a conclusão que a boa resolução do valor da altura do pico na detecção do grau de esferoidização fornece uma ferramenta para determinar o tratamento térmico ideal e consequentes propriedades de usinagem. (JARRAHI; KASHEFI; AHMADZADE-BEIRAKI, 2015)

Kleber; Barroso (2010) em sua investigação sobre o aço inoxidável austenítico AISI 304L a *Shot Peening* por meios de ruído magnético de Barkhausen utilizou uma corrente triangular de excitação (55Hz, 40V, 2A) proveniente de um

gerador de ondas. Para tal, foram aplicadas diferentes condições de *shot peening* no aço austenítico para transformar a austenita em martensita com diferentes profundidades, como pode ser visto na micrografia da Figura 2.14.

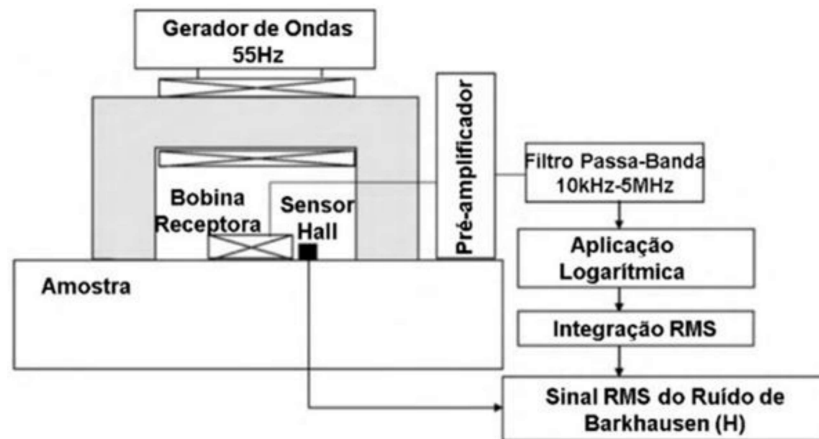
O campo magnético aplicado foi medido por um sensor Hall localizado dentro da área de detecção da sonda. A técnica de medição de RMB escolhida foi a da bobina receptora de superfície (BRS), em que a tensão induzida é pré-amplificada com ganho de 40 dB e selecionada através de um filtro passa-faixa na faixa de frequência de 10 kHz a 5 MHz. O autor operou com um dispositivo analógico de média quadrática (RMS) acoplado a um amplificador logarítmico de ganho de 40 dB, com um tempo de integração de 1 ms para obter o envelope do sinal. Um amplificador logarítmico foi adotado por possuir uma melhor sensibilidade a eventos de Barkhausen quando comparados a um amplificador linear. Por fim, foram calculados 100 sinais RMS para cada medição adquiridos por uma placa de aquisição de dados (DAQ) conectada a um computador com uma taxa de amostragem de 160 Hz. O diagrama esquemático, assim como uma fotografia do equipamento é apresentado na Figura 2.15.

**Figura 2.14. Observação óptica da martensita induzida em aço AISI 304L.**

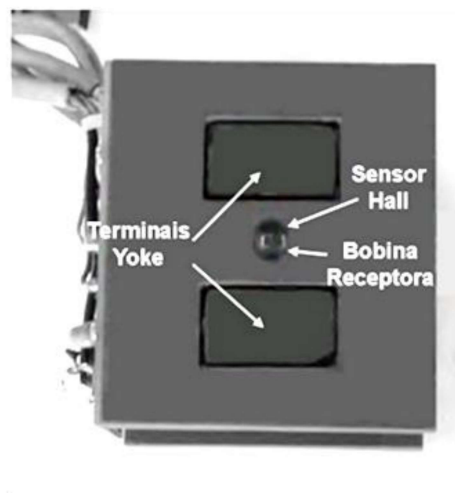


**Fonte: KLEBER; BARROSO, 2010.**

Figura 2.15 - (a) Diagrama esquemático do dispositivo experimental do ruído de Barkhausen.  
(b) Área de contato da sonda com o dispositivo de magnetização, a bobina receptora e o sensor Hall (vista inferior).



(a)



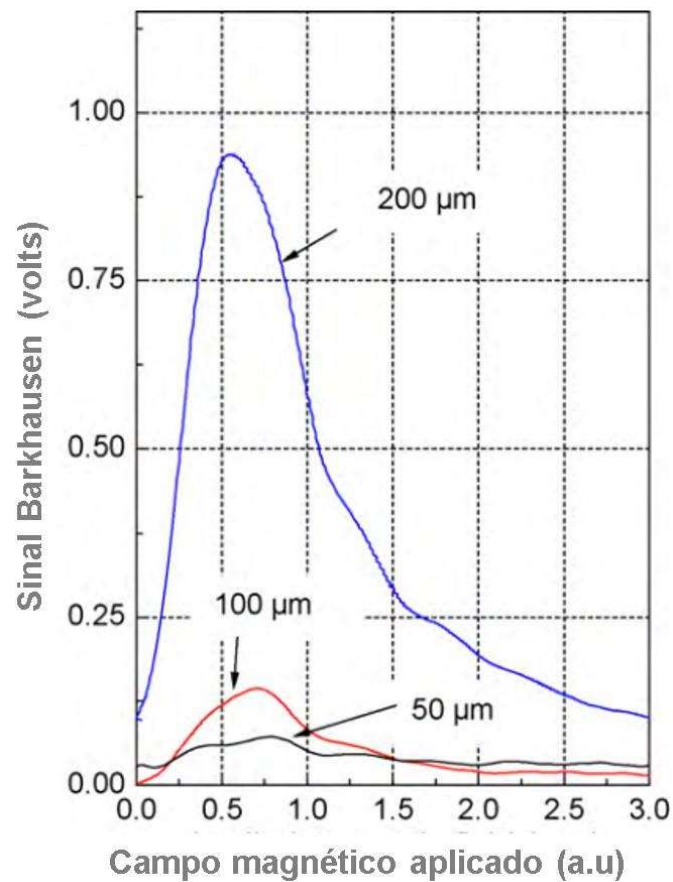
(b)

Fonte: Adaptado KLEBER; BARROSO, 2010.

As medições realizadas nas amostras anteriormente ao processo de *shot peening* não mostraram nenhuma emissão de ruído de Barkhausen. Entretanto, após tal processo, as medições nas amostras com três espessuras diferentes da camada de martensita (50, 100 e 200  $\mu\text{m}$ ), revelaram a atividade RMB caracterizada por um sinal em forma de pico único, como pode ser visto na Figura 2.16. Nota-se da figura que quanto mais espessa a camada de martensita, maior será o sinal.



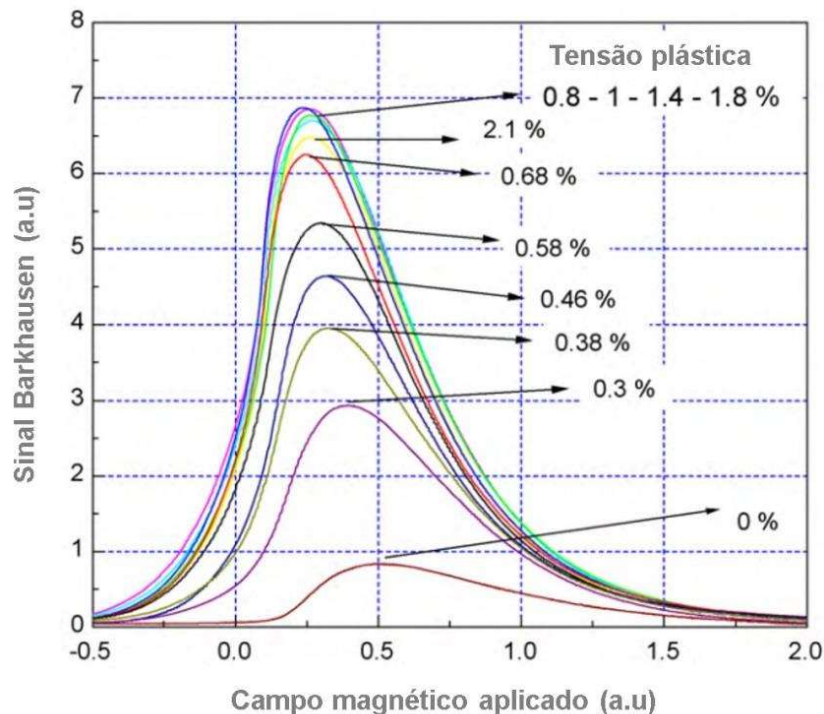
Figura 2.16 - Valores de RMS e altura de pico em função do número de sequências.



Fonte: Adaptado KLEBER; BARROSO, 2010.

Na Figura 2.17, o sinal de ruído de Barkhausen para uma amostra com uma camada de 200 μm de *shot peened* para o estado inicial e depois de diferentes níveis de tensão plástica é apresentado. Um aumento acentuado da amplitude é claramente visível até cerca de 0,8% da deformação plástica, e além deste valor ela tende a saturar. Ambas as medições foram realizadas para amostras com camadas de 100 e 50 μm de *shot peened* e as tendências observadas são semelhantes.

Figura 2.17 - Resposta do ruído de Barkhausen versus campo magnético em função da deformação plástica para amostras de 200  $\mu\text{m}$  (amplificação logarítmica).



Fonte: Adaptado KLEBER; BARROSO, 2010.

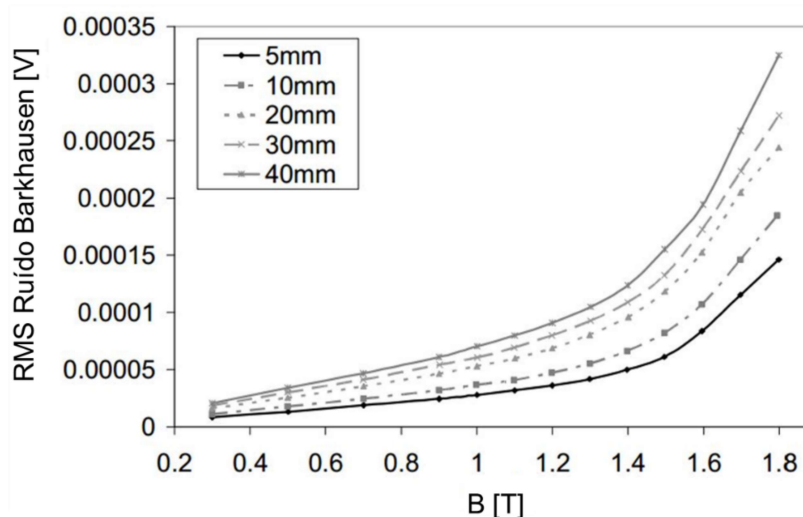
O autor chega as seguintes conclusões: (1) diferentes condições de *shot peening* induziram diferentes respostas de Barkhausen em relação à profundidade do tratamento e (2) o ruído de Barkhausen aumentou com a intensidade do processo de *shot peening*, que é devido ao efeito combinado do aumento da fração volumétrica de martensita e do estresse residual. Por fim, o ruído magnético de Barkhausen foi usado com sucesso para caracterizar e monitorar a martensita induzida por deformação, criada por *shot peening*, em aço austenítico AISI 304L. (KLEBER; BARROSO, 2010)

Um estudo das técnicas de medição do ruído de Barkhausen para a bobina receptora de superfície (BRS) e a bobina receptora envolvente (BRE) em aço para fins elétrico foi realizado por Moses; Patel; Williams (2006). Os autores pretendiam destacar como o método de detecção pode influenciar a interpretação do sinal e para tal, utilizaram o efeito da distância entre duas bobinas. Aplicaram na excitação uma onda de formato senoidal de frequência de 50Hz e densidades de fluxo de pico na faixa de 0,3 a 1,8 T. Na técnica de bobina receptora envolvente, as duas

configurações de enrolamento (simples e duplo) foram utilizadas. Em todas as técnicas, o módulo de aquisição incluiu também uma bobina para detectar a densidade de fluxo, denominada bobina de detecção. O sinal de saída passou por um filtro de alta frequência *Butterworth* digital de quarta ordem com uma frequência de corte de 3,5 kHz e em seguida foram calculados os parâmetros para interpretação do RMB (RMS) para 10 ciclos de magnetização.

Nos resultados o autor constata que o valor RMS do ruído de Barkhausen tende a aumentar a medida que a distância entre as bobinas cresce, como pode ser visto na Figura 2.18.

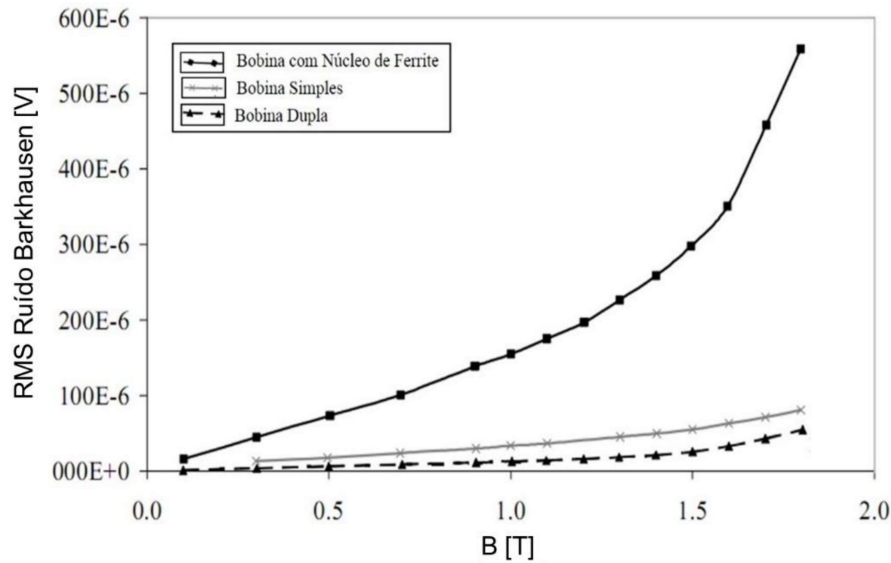
**Figura 2.18 - Análise RMS do sinal de ruído de Barkhausen a uma frequência de magnetização de 50 Hz em função da densidade do fluxo magnético para diferentes distâncias entre as bobinas**



Fonte: MOSES; PATEL; WILLIAMS, 2006.

Os resultados também revelam que as medidas das duas configurações de bobinas têm comportamentos semelhantes apesar de operarem em direções perpendiculares. As amplitudes dos valores de RMS do Ruído de Barkhausen para a bobina receptora de superfície são maiores em comparação com a bobina de enrolamento e crescem mais rapidamente em alta densidade de fluxo, conforme pode ser visto na Figura 2.19.

**Figura 2.19 - Variação normalizada dos valores RMS do Ruído de Barkhausen dos sensores com densidade de fluxo a 50 Hz em aço silício a 3% de grão orientado**



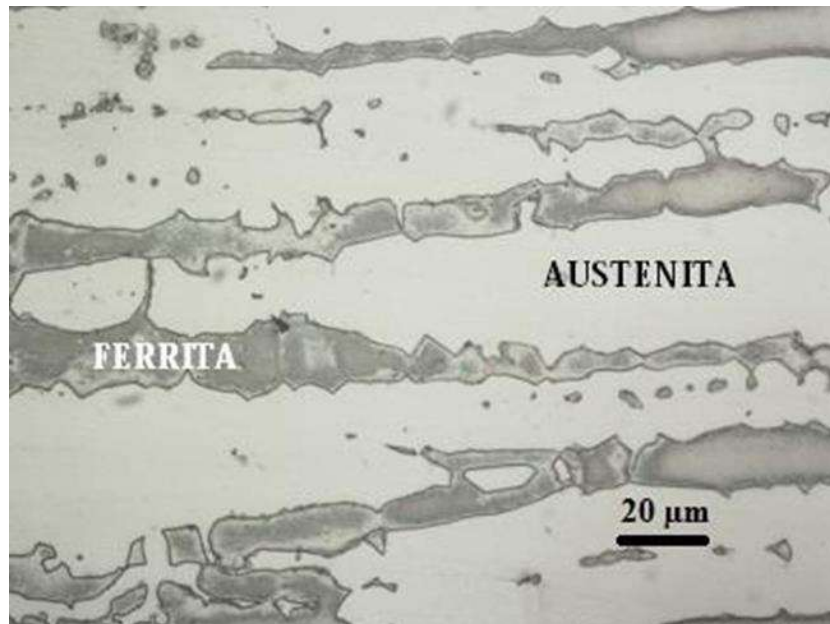
**Fonte: MOSES; PATEL; WILLIAMS, 2006.**

Moses; Patel; Williams (2006) chegaram as seguintes conclusões: (1) o método BRS parece ser uma ordem de magnitude mais sensível a eventos de Barkhausen do que o método BRE, principalmente em altas densidades de fluxo e (2) para o método de bobina dupla, o sinal RMB depende da geometria da bobina receptora e da densidade de fluxo induzida. (MOSES; PATEL; WILLIAMS, 2006)

Carvalho Filho (2018) realizou um ensaio eletromagnético baseado no ruído de Barkhausen para acompanhamento de transformações microestruturais em aço inoxidável duplex SAF 2205. A microestruturura do aço em questão é composta pelas fases ferrita (ferromagnética) e austenita (paramagnética) como pode ser visto na micrografia da Figura 2.20. Quando esse material é submetido a temperaturas inferiores a 550 °C formam precipitados nanométricos no interior da fase ferrita (Figura 2.21), os quais somente podem ser observados por microscopia eletrônica de transmissão. (OTÁROLA, T. et al., 2005)

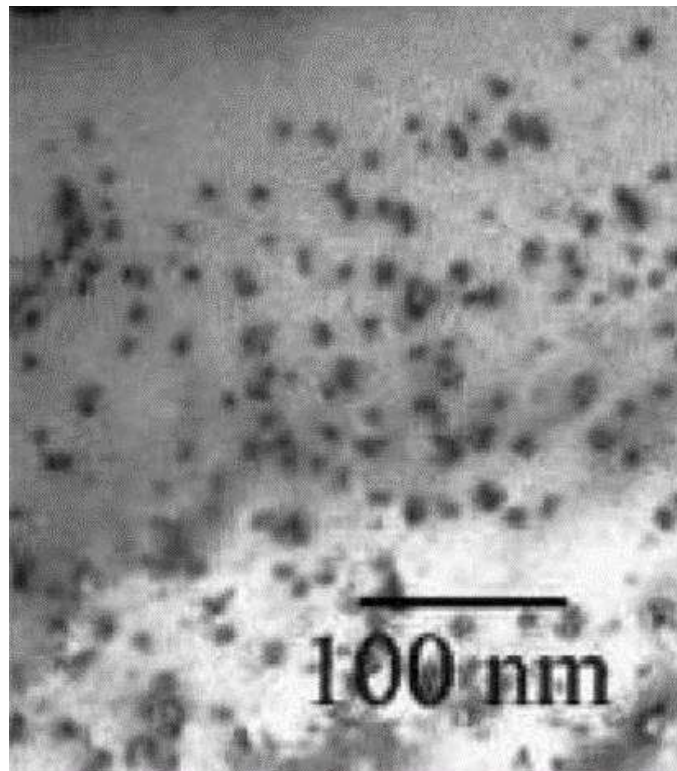
O autor utilizou duas bobinas de superfície cada uma posicionada em uma das faces da amostra conforme a Figura 2.22. O material a ser estudado foi posicionado entre as bobinas.

Figura 2.20 - Microestrutura obtida por microscopia óptica do material como recebido (ataque Behara).



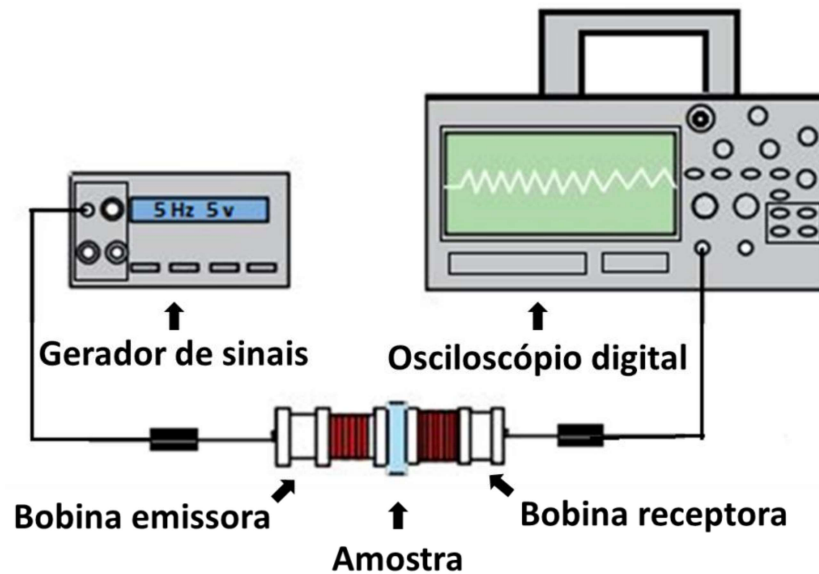
Fonte: GENEROSO,2014

Figura 2.21- Precipitado de  $\alpha'$  em uma amostra de aço inoxidável duplex (pontos escuros).



Fonte: OTÁROLA, T. et al., 2005

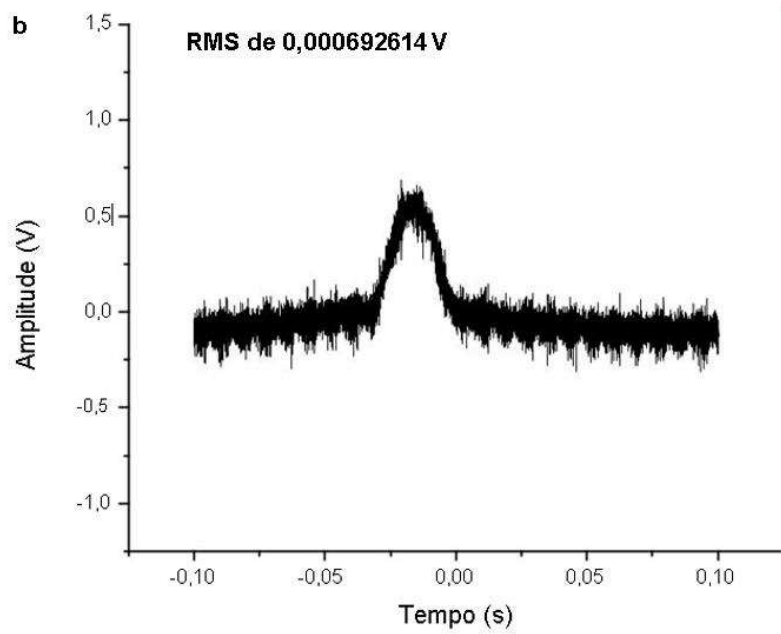
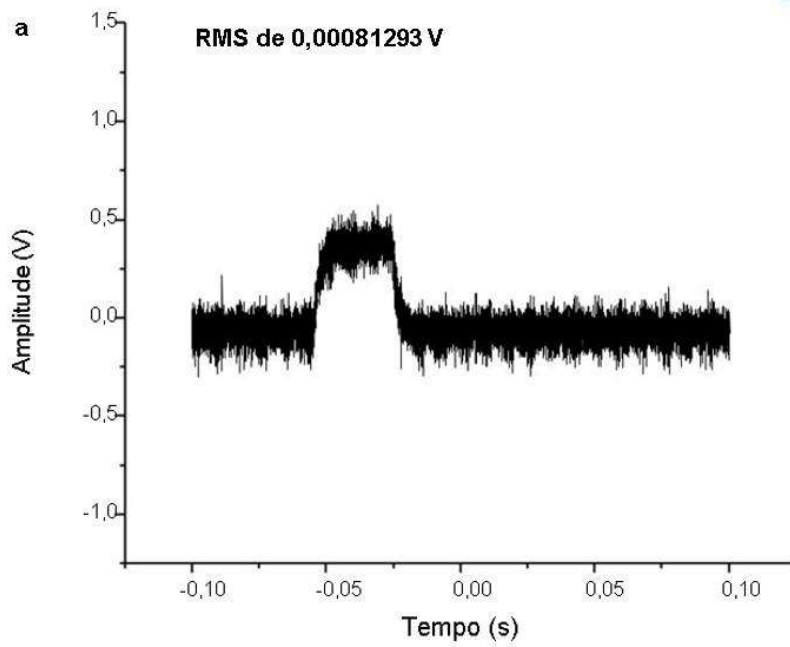
Figura 2.22 - Desenho esquemático do experimento.

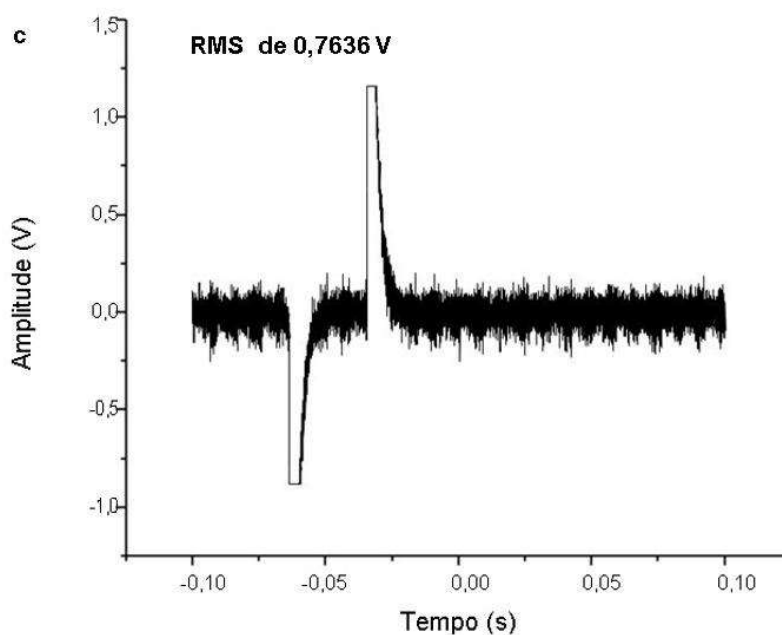


Fonte: Adaptado de CARVALHO FILHO, 2018.

Carvalho Filho (2018) determinou, na primeira etapa, a forma da onda a ser utilizada. Para tal, utilizou ondas de mesma amplitude e frequência de 5 Hz nas formas quadrada, senoidal e triangular, como pode ser visto na Figura 2.23. Ele optou por uma amostra sem tratamento térmico e outra submetida a um tratamento térmico na temperatura de 475 °C por 100 horas e resfriamento ao ar. O autor aplicou um filtro passa altas digital de 3,5 kHz no sinal de saída e usou o valor RMS como parâmetro de análise, apresentando a onda triangular como a ideal entre as estudadas, devido ao maior valor de RMS.

Figura 2.23 - Onda (a) triangular, (b) senoidal e (c) quadrada, com frequência de 5 Hz para amostras com precipitados.



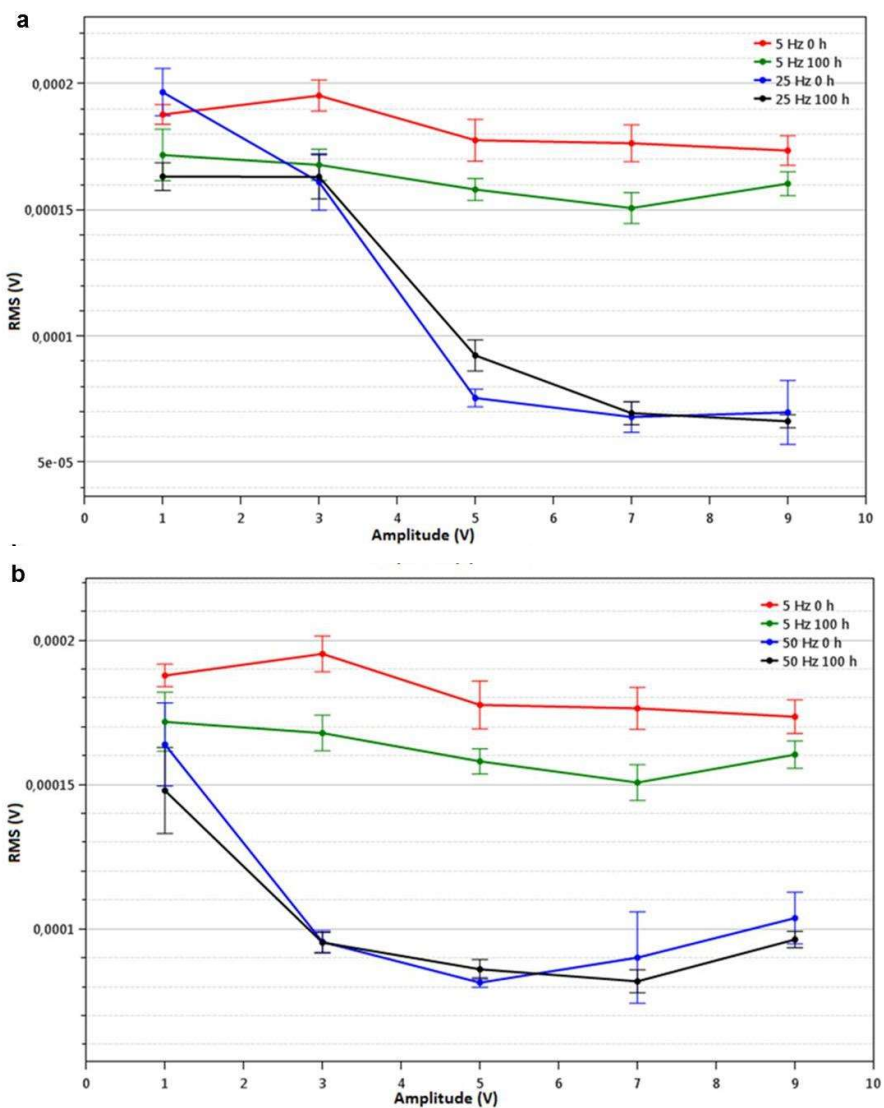


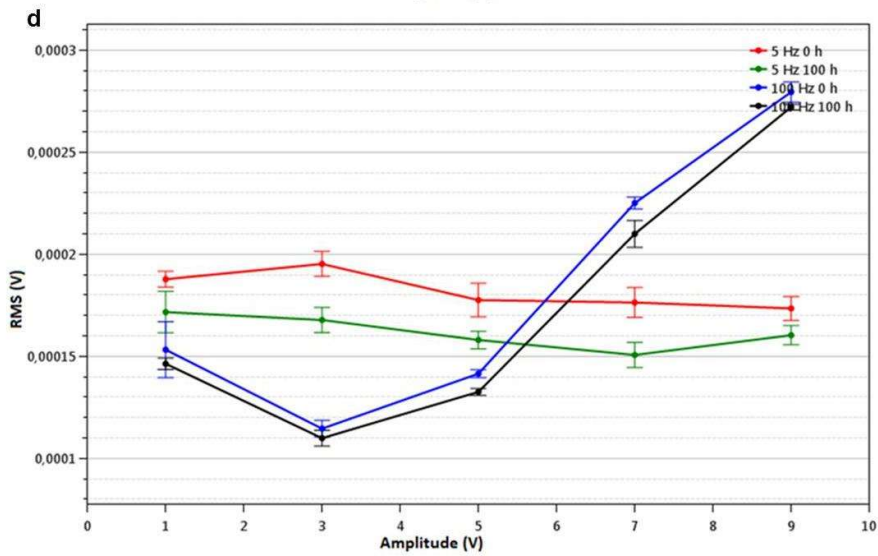
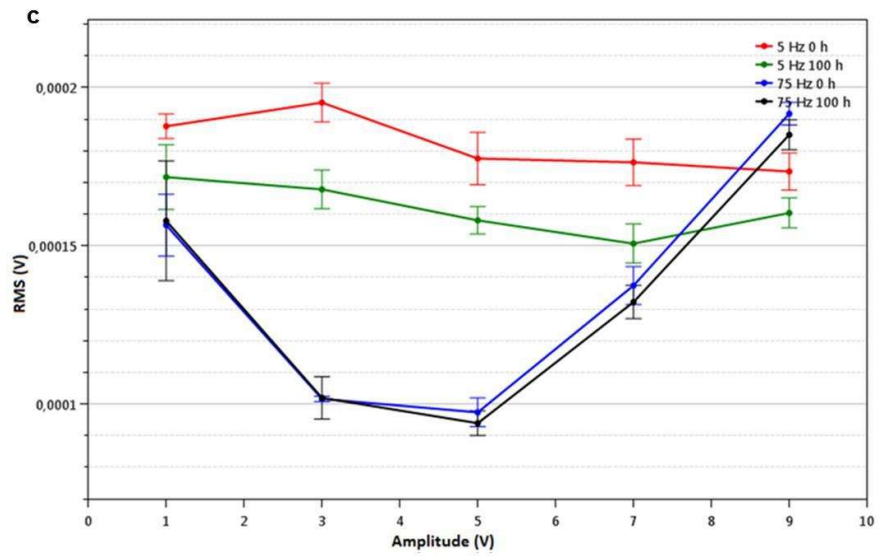
Fonte: CARVALHO FILHO, 2018.

Em etapa posterior, determinou a frequência e a amplitude da onda ideal. Para isso, ondas triangulares com as frequências de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz e amplitudes de 1 V, 3 V, 5 V e 9 V foram geradas e aplicadas a bobina emissora. O sinal foi capturado pelo conjunto bobina receptora e osciloscópio com tempo de aquisição de 2 s. A Figura 2.24 apresenta medidas do valor RMS, para amostras tratadas e não tratada, em função de diferentes amplitudes e frequências. Pode-se observar que a maior diferença dos valores RMS entre a condição com e sem tratamento foram obtidas para as ondas de 5 Hz, a qual teve os melhores resultados, e ondas de 25 Hz com amplitudes abaixo de 3 V. Para as demais frequências, não houve uma diferença significativa entre as condições com e sem tratamento. Estes resultados apontam que a região com frequências inferiores a 25 Hz é preferível para se trabalhar com o ruído de Barkhausen nas condições estudadas.



Figura 2.24 - Medidas do valor RMS, para amostras com e sem precipitados, em função de diferentes amplitudes e das ondas com frequências de 5 Hz e (a) 25 Hz, (b) 50Hz, (c) 75 Hz, (d) 100Hz.





Fonte: CARVALHO FILHO, 2018.

Por fim, o autor propôs estudar um número maior de frequências e amplitudes para ondas aplicadas na região abaixo de 25 Hz, a fim de obter maior precisão na característica da onda estudada, o qual é o propósito do presente trabalho.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho propõe-se definir as características da onda necessária para detecção de precipitados finamente dispersos pela técnica do RMB. Para tal, será utilizado um aço SAF 2205 e os resultados serão correlacionados com o ensaio de energia absorvida por impacto (Charpy).

#### 3.1 BANCADA EXPERIMENTAL

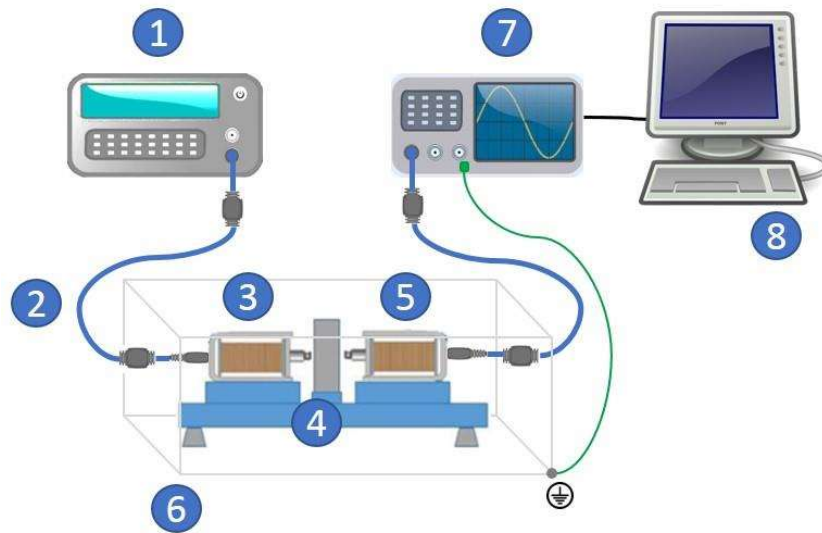
A bancada experimental é constituída de dois módulos: módulo de emissão e módulo de aquisição. O módulo de emissão é composto por um gerador de função Minipa MFG-4205B e uma bobina emissora. O gerador de função transmite para a bobina emissora uma onda de formato triangular, sendo este, o tipo de onda que indica a maior presença de ruído gerado da interação entre movimento das paredes dos domínios e microestrutura, quando comparada a onda senoidal e quadrada (CARVALHO FILHO, 2018). A bobina emissora tem por função impor um campo magnético na amostra de aço inoxidável duplex.

O módulo de aquisição é constituído por uma bobina receptora, um osciloscópio e um computador. A bobina denominada de receptora foi posicionada no lado oposto da peça com a finalidade de detectar o campo induzido gerado pela bobina emissora e transmitir o sinal a um osciloscópio (da marca Agilent Technologies modelo DSO-X 2012A). Os dados são capturados com o auxílio de um *pendrive* conectado ao osciloscópio que posteriormente é acoplado a um computador, o qual tratará os dados pelo programa denominado “Análise Barkhausen” que foi desenvolvido particularmente para este trabalho.

As bobinas utilizadas são idênticas e têm 19,5 mm de comprimento, 6000 espiras de fios de cobre esmaltado n° 38 envoltas sobre um núcleo de aço AISI 4140.

Utiliza-se uma gaiola de Faraday e cabos blindados a fim de diminuir a interferência de sinais provenientes do meio. O esquema da bancada experimental pode ser visualizado na Figura 3.1.

**Figura 3.1 - Bancada experimental: gerador de sinais (1); cabos blindados (2); bobina emissora (3); amostra (4); bobina receptora (5); gaiola de Faraday (6); osciloscópio (7) e computador (8).**



Fonte: modificado de LIMA (2018).

### 3.2 O MATERIAL

O experimento utilizou amostras de aço inoxidável duplex SAF 2205 (UNS S31803) de formato retangular nas dimensões de 30 x 20 x 7,5 mm, as quais foram usinadas por FRANÇA NETO (2011) e fazem parte do acervo de materiais Grupo de Simulação de Comportamento dos Materiais IFPB (GSCMat).

As amostras foram envelhecidas na temperatura de 475 °C com tempos de envelhecimento de 1, 4, 8, 12, 39 e 100 horas. Para este tratamento foi utilizado um forno do tipo mufla, marca Jung, capacidade máxima de 1200 °C e dimensões de 160 x 160 x 350 mm. Foi utilizada a técnica de espectômetro de emissão óptica para determinação da composição química que pode ser vista na Tabela 1.

**Tabela 1 - Composição do SAF 2205, como recebido, em % de peso.**

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Co</b>
0,055	1,333	0,019	0,002	0,458	21,823	6,085	0,130
<b>Cu</b>	<b>Mo</b>	<b>N</b>	<b>Nb</b>	<b>Al</b>	<b>Sn</b>	<b>Ce</b>	<b>Fe</b>
0,191	3,609	0,180	0,028	0,013	0,012	0,020	66,496

Fonte: FRANÇA NETO, 2011

Este material foi utilizado por apresentar a formação de uma única fase sobre a condição de envelhecimento supracitada, logo, toda variação do sinal é proveniente dessa fase. O AID SAF 2205 é usado como padrão para desenvolvimento de novos ensaios eletromagnéticos no GSCMat.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Os resultados obtidos do ensaio eletromagnético foram comparados com o ensaio de energia absorvida por impacto (Charpy). Este ensaio foi escolhido para correlação com os obtidos pelo ensaio eletromagnético, dado que esta é uma técnica indireta para acompanhamento da presença desses precipitados e por ser consolidada (CARVALHO FILHO, 2018). Este material teve a observação dos precipitados manométricos obtidos por microscopia eletrônica de transmissão.

#### 3.3.1 Ensaio de impacto

O ensaio de impacto Charpy foi realizado com o objetivo de avaliar a energia absorvida do material como recebido e nas condições de envelhecimento. Esse ensaio foi realizado à temperatura ambiente em uma máquina universal para ensaios de materiais, da Wolperp/Amsler, modelo PW 30/15k (FRANÇA NETO, 2011) e os resultados foram arquivados no banco de dados do GSCMat, de onde foram resgatados para uso no presente trabalho.

### 3.4 PARÂMETRO PARA ANÁLISE DO RUÍDO DE BARKHAUSEN

O valor da Raiz Média Quadrática (RMS – do inglês *root mean square*) é escolhido neste trabalho como parâmetro de medição devido a sua simplicidade e uso sucessivo na literatura para interpretar o RMB (GHANEI, S. et al., 2014; KLEBER; BARROSO, 2010; MOSES; PATEL; WILLIAMS, 2006). O valor RMS é calculado conforme Equação 1.

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

Em que,  $N \rightarrow$  número do elemento na sequência de medição;

$x_i \rightarrow$  amplitudes do ruído de Barkhausen.

### 3.5 DETERMINAÇÃO DA MELHOR ONDA PARA OBTENÇÃO DO RMB

Carvalho Filho (2018) utilizou duas amostras do AID SAF 2205 (0h – sem precipitado – e 100h – com precipitado – de tratamento térmico a 475 °C) e um esquema de medição similar ao do presente trabalho para determinar a melhor onda para obtenção do ruído de Barkhausen. O autor aplicou na bobina emissora, através do gerador de sinais, ondas de formato triangular com frequências de 5, 25, 50, 75 e 100 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V. Os sinais foram adquiridos com tempos de 2s. Em seguida aplicou-se um filtro passa alta de 3 kHz e calculou-se a diferença dos valores de RMS entre a condição com e sem tratamento. O trabalho gerou a seguinte conclusão: ondas com frequências de 5 e 25 Hz provaram ser recomendadas para trabalhar com o ruído de Barkhausen, dado a sua capacidade de produzir diferença de medidas entre as amostras com e sem precipitados.

Deu-se continuidade ao estudo de Carvalho Filho (2018) com o intuito de obter-se uma maior precisão na característica da onda estudada. Logo, foi aplicada na bobina emissora, através do gerador de sinais, ondas de formato triangular e senoidal com frequências de 5, 10, 15, 20 e 25 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V. Inicialmente realizou-se 10 medições para cada arranjo para as amostras de 0h e 100h afim de detectar os parâmetros que produzam a maior diferença de RMS entre a condição com e sem tratamento. Uma vez definido o melhor parâmetro, este foi aplicado nas amostras envelhecidas na temperatura de 475 °C com tempos de envelhecimento de 1, 4, 8, 12, 39 e 100 horas. Desta vez capturou-se 50 sinais de cada condição em um intervalo de 2s e amostrado em 20.000 pontos com o propósito de aumentar a confiabilidade dos resultados.

A Tabela 2 permite uma comparação entre o estudo de Carvalho Filho (2018) e o prosseguimento do presente trabalho. Os resultados obtidos do ensaio

eletromagnético serão correlacionados com os resultados das técnicas consolidadas (seção 3.3).

**Tabela 2 – Comparativo entre as características do trabalho de Carvalho Filho (2018) e o atual.**

	CARVALHO FILHO (2018)	TRABALHO ATUAL
MATERIAL	AID SAF 2205 (UNS S31803)	
PARÂMETRO DE ANÁLISE	RMS	
DETERMINAR A MELHOR ONDA	Amostras sem precipitados (0h) e com precipitados (100h)	
CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS	Ensaio de dureza e o ensaio de energia absorvida por impacto	Ensaio de energia absorvida por impacto
TIPO DE ONDA EMISSORA	Triangular	Triangular e Senoidal
FREQUÊNCIAS (Hz)	5, 25, 50,75 e 100	5, 10, 15, 20 e 25
AMPLITUDES (V)	1, 3, 5, 7 e 9	1, 3, 5, 7 e 9
APLICAÇÃO DA MELHOR ONDA	Amostras tratadas na temperatura de 475 °C nos tempos de 1, 4, 8, 12, 39 e 100h	

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Carvalho Filho (2018) estudou as características de uma onda emissora para acompanhamento de precipitados finos em um aço inoxidável duplex e concluiu em seu estudo que a melhor região de trabalho está entre 5 e 25 Hz, assim o presente trabalho trata-se de uma continuação do estudo supracitado e concentra-se na região sugerida pelo autor a fim de identificar a melhor característica de onda a ser utilizada. Na literatura, frequentemente são usadas ondas de excitação que variam de 0,4 a 125 Hz. Esta larga faixa de frequência encontrada se deve a diversidade de dispositivos e tipos de bobinas utilizadas. (CARVALHO FILHO, 2018).

Nos estudos de Carvalho Filho (2018) foram utilizadas ondas de forma triangular. Contudo optou-se por também realizar o estudo da forma senoidal por também ser muito utilizada (GHANEI et al., 2014; JARRAHI, KASHEFI, AHMADZADE-BEIRAKI, 2015), a fim de compararmos o comportamento das duas formas.

### 4.1 DETERMINAÇÃO DA CONDIÇÃO ÓTIMA PARA ENSAIO COM ONDA TRIANGULAR

Nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 são apresentados os resultados do estudo com ondas triangulares de frequências de 5, 10, 15, 20 e 25 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V a fim de determinar qual é a melhor região de trabalho. Essas apresentam a variação dos valores de RMS da onda com frequências 5 Hz em conjunto com os das frequências de 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz, respectivamente. O objetivo é ver a evolução dos valores de RMS das diversas frequências em relação à de 5 Hz para amostras na condição como recebida (sem presença de precipitados) e tratada por 100 h na temperatura de 475° C (com precipitados).

Os aços inoxidáveis duplex SAF 2205 apresentam na condição como recebida uma microestrutura formada por 50 % de uma fase ferromagnética denominada de ferrita e 50 % de outra fase paramagnética conhecida como austenita. Esses aços quando submetidos a ciclos térmicos abaixo de 600° C formam precipitados nanométricos finamente dispersos na fase ferrita. Estes são paramagnéticos e aumentam a rigidez do material comprometendo a resistência ao



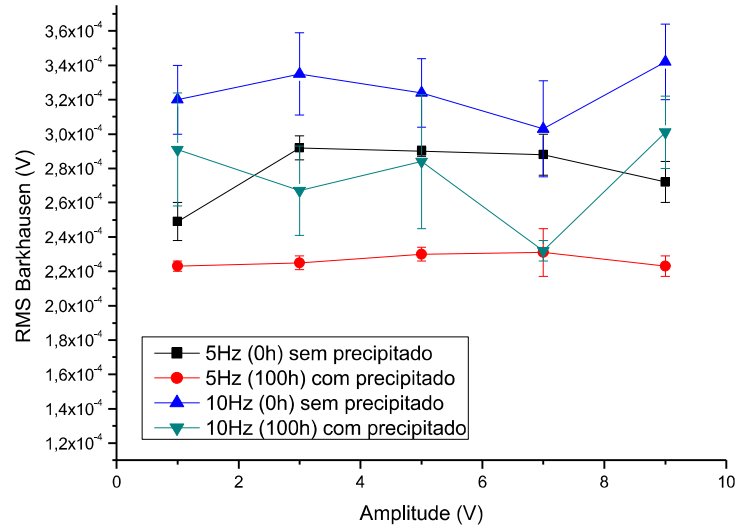
impacto (SILVA 2009, 2016, TAVARES 2010). O tratamento de 100 h empregado é suficiente para ter a formação desses precipitados consolidados dentro do material e foi escolhido para testar a capacidade do ensaio em detectar a sua presença (SILVA 2009).

As Figuras 4.1 até 4.4 mostram que os valores de RMS para as ondas com frequências de 5 Hz para as condições com e sem precipitados são paralelos para as amplitudes estudadas. Como a única diferença para as duas condições é a presença de precipitados, este comportamento deve-se a presença deles. Esse comportamento paralelo, entre as condições com e sem a nova fase, se mantém até a frequência de 20 Hz (Figura 4.3) e também se mostra presente na frequência de 25 Hz (Figura 4.4) até a amplitude de 5 V. Acima desta amplitude os valores decrescem e a diferença diminui. Carvalho obteve resultados semelhantes para a frequência de 25 Hz.

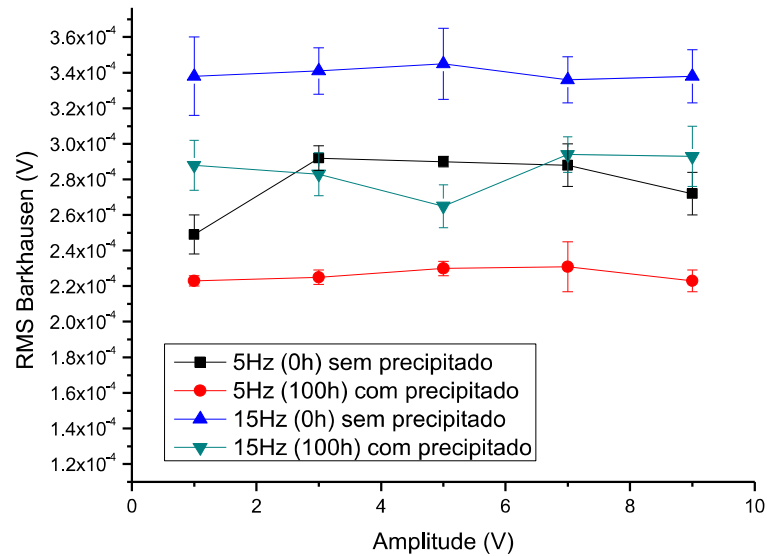
Nota-se das Figuras 4.1 até 4.4, que as medidas de RMS obtidas para a condição sem a presença de precipitados possuem valores maiores do que com a formação deles. O ruído magnético de Barkhausen é proveniente da interação do movimento das paredes dos domínios magnéticos com os pontos de ancoragem, que no caso são as partículas formadas durante o tratamento. Estas parecem dificultar o movimento daquelas e reduzir o ruído. Além disso, o paramagnetismo dessas partículas também deve contribuir com a redução dos valores de RMS (SILVA 2016).

Outro fato a se observar é que os resultados tanto para a condição com e sem precipitado os valores de RMS apresentam aumento para frequências de 5, 10, 15 e 20 Hz, posteriormente caindo com a aplicação de 25 Hz. A redução dos valores de RMS para as duas condições estudadas, a partir de 25 Hz, é atribuída ao aumento da frequência varrer um volume maior do material e detectar melhor a presença da fase paramagnética austenita, que contribui para redução desses valores. Este comportamento foi estudado por Carvalho Filho (2018) que observou este comportamento para as frequências de 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz.

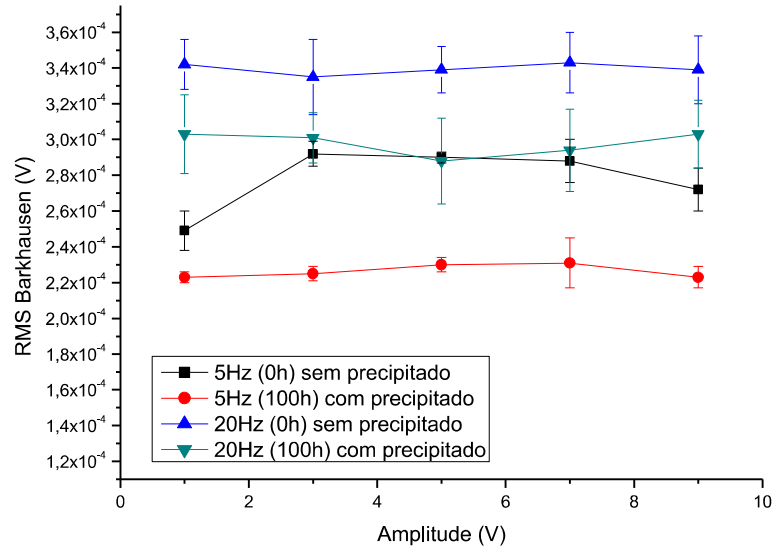
**Figura 4.1 - Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras triangulares com frequências de 5 Hz, 10 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.**



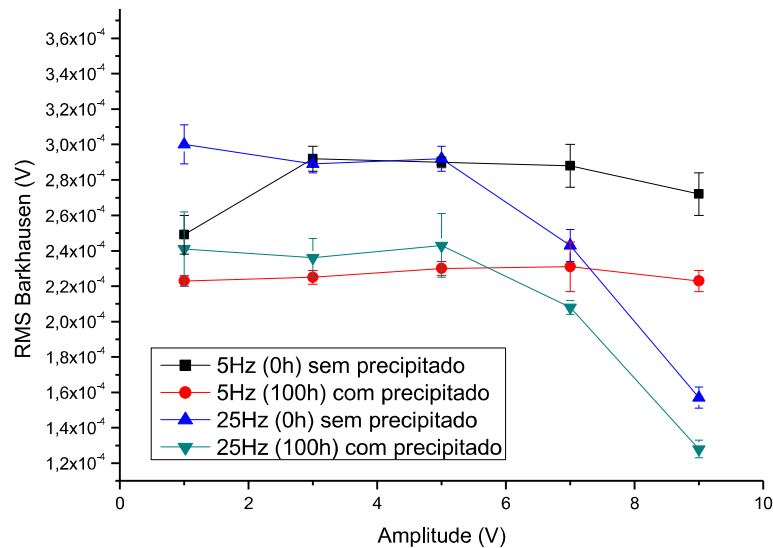
**Figura 4.2 - Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras triangulares com frequências de 5 Hz, 15 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.**



**Figura 4.3 - Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras triangulares com frequências de 5 Hz, 20 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.**



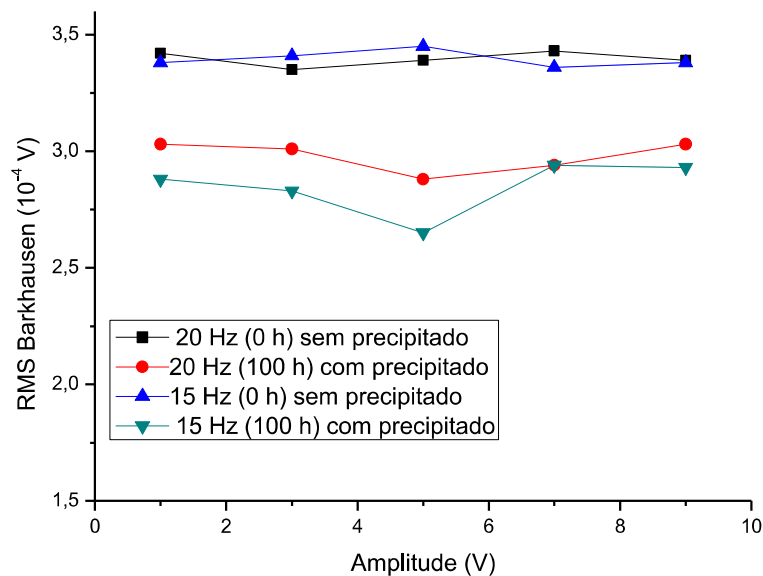
**Figura 4.4 - Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras triangulares com frequências de 5 Hz, 25 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.**



As Figuras 4.1 a 4.4 mostram um aumento dos valores de RMS, tanto para as amostras com e sem precipitados, até a frequência de 20 Hz. Estes, reduzem

para a frequência de 25 Hz. A faixa de maiores valores de RMS parecem ficar entre as frequências de 15 Hz e 20 Hz. A Figura 4.5 apresenta a variação dos valores de RMS para essas duas frequências em função da amplitude. Nota-se da Figura 4.5 que a região de maior amplitude de medida entre a condição com e sem precipitado foi a da onda triangular de 15 Hz e 5 V.

**Figura 4.5 - Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras triangulares com frequências de 15 Hz, 20 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.**



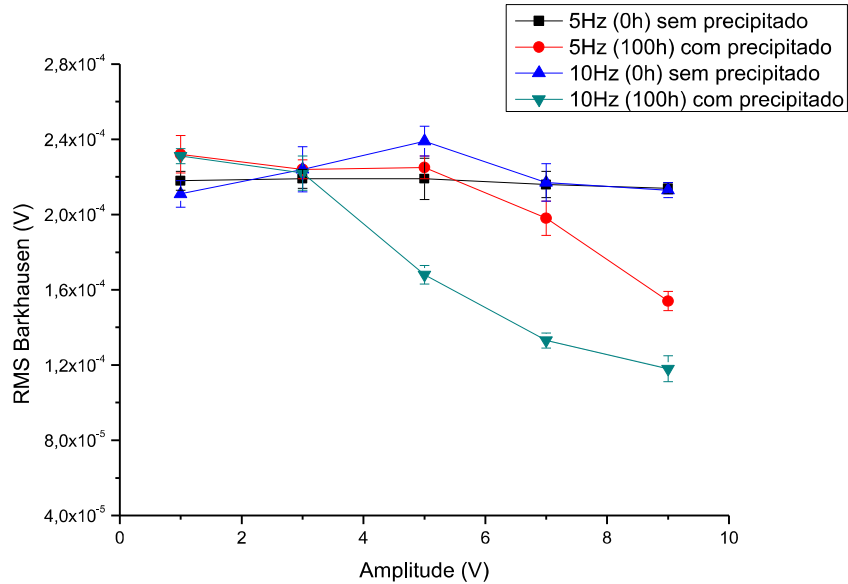
Na próxima seção serão apresentados os resultados dos estudos realizados com a onda senoidal que também é utilizada para ensaios eletromagnéticos baseados em medidas do ruído de Barkhausen. O objetivo é saber qual das duas ondas melhor acompanha a formação de precipitados finos dentro do material, bem como identificar as características da onda ótima emissora.

## 4.2 DETERMINAÇÃO DA CONDIÇÃO ÓTIMA PARA ENSAIO COM ONDA SENOIDAL

Nesta seção será analisada a aplicação de ondas senoidais na faixa de frequência até 25 Hz. Serão estudadas ondas com frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz com as amplitudes de 1 V, 3 V, 5 V, 7 V e 9 V.

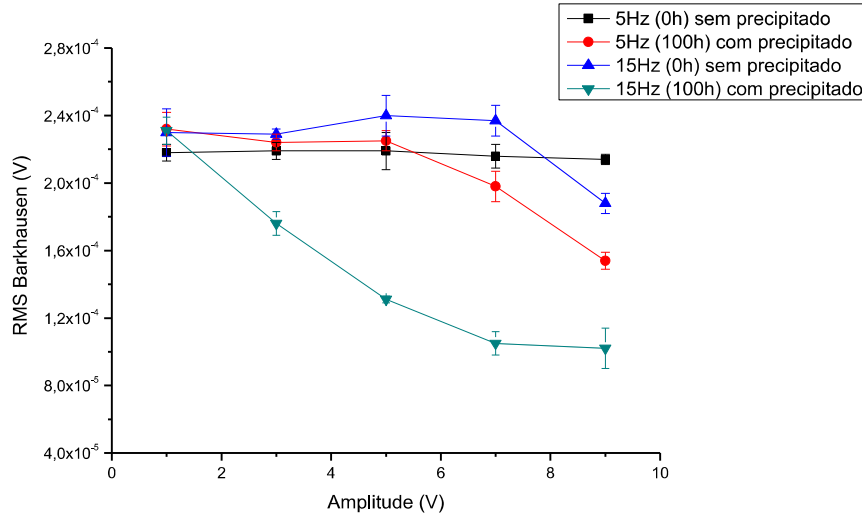
Na Figura 4.6 temos a variação das medidas de RMS para as ondas senoidais de 5 Hz e 10 Hz, em função das amplitudes destas, para amostras sem precipitados finos (0 h) e com a presença destes (100 h). Os resultados obtidos da aplicação das ondas com frequência de 5 Hz mostram que, para amplitudes até 5 V, não há variação nas medidas com e sem a formação da nova fase. Os valores de RMS até 5 V são independentes da amplitude da onda estudada e não apresentam variações suficientes entre as duas condições. Contudo, para valores de 7V e 9 V, as medidas não variaram para amostras como recebidas e tiveram uma queda para as tratadas. Esta diferença deve-se à presença dos precipitados. O mesmo comportamento foi observado para a frequência de 10 Hz. Porém, a queda dos valores de RMS iniciou para a amplitude de 3 V, indicando que com 10 Hz é necessário aplicar uma onda com uma amplitude superior a de 3 V para podermos estudar a presença dos precipitados.

**Figura 4.6 - Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras senoidais com frequências de 5 Hz e 10 Hz (e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.**



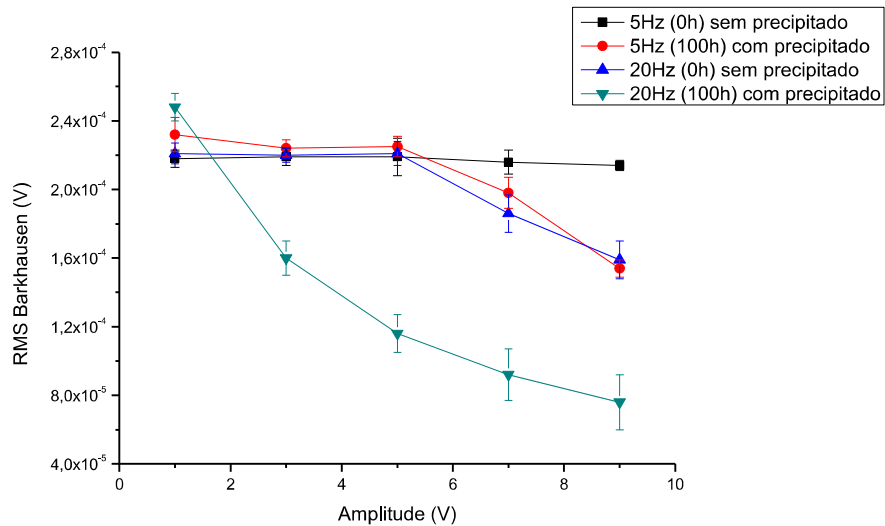
Na Figura 4.7 temos os resultados obtidos para a frequência de 15 Hz. Para a condição sem tratamento os valores de RMS não variam até 7 V e caem para amplitudes de 9 V. Esta queda deve ser associada ao aumento da frequência e amplitude conseguir varrer um volume maior do material e detectar a presença maior do paramagnetismo da fase austenita, pois nesta condição não temos precipitados. Todavia, ao analisarmos as medidas da condição tratada, observa-se queda nos valores para amplitudes acima de 1 V, entre as amplitudes estudadas. Isto indica que com esse valor de frequência pode-se detectar a diferença entre as amostras com as amplitudes de 3 V a 9 V, entre as analisadas.

**Figura 4.7 - Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras senoidais com frequências de 5 Hz e 15 Hz amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.**

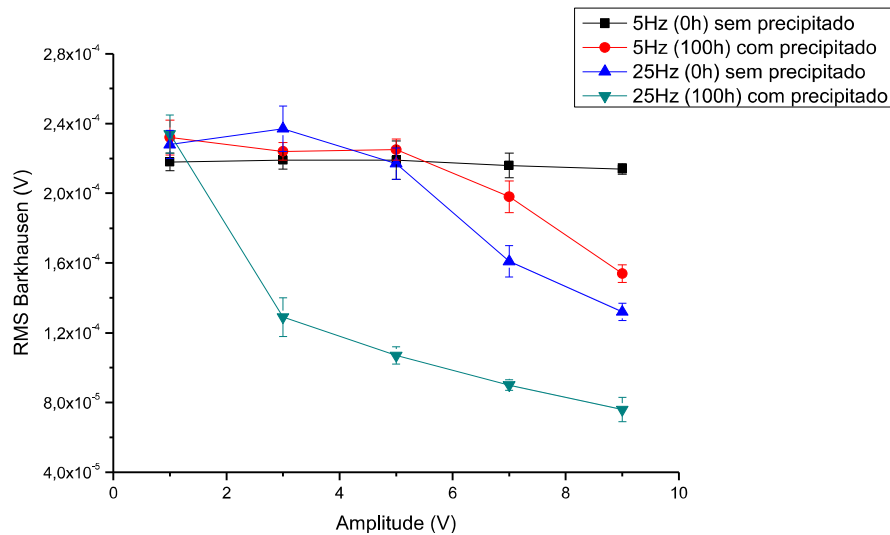


O comportamento das ondas com frequência de 20 Hz e 25 Hz são apresentadas na Figuras 4.8 e 4.9. Nota-se um comportamento semelhante ao da de 15 Hz, sendo que, enquanto a condição sem tratamento, para a frequência de 15 Hz, tem seus valores de RMS reduzidos a partir da amplitude de 7 V, as de 20 Hz e 25 Hz reduzem com 5 V e 3 V, respectivamente. Este comportamento está associado ao aumento de frequência varrer um volume maior do material e percebermos a contribuição da fase austenita em reduzir os valores de RMS.

**Figura 4.8 - Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras senoidais com frequências de 5 Hz e 20 Hz amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.**



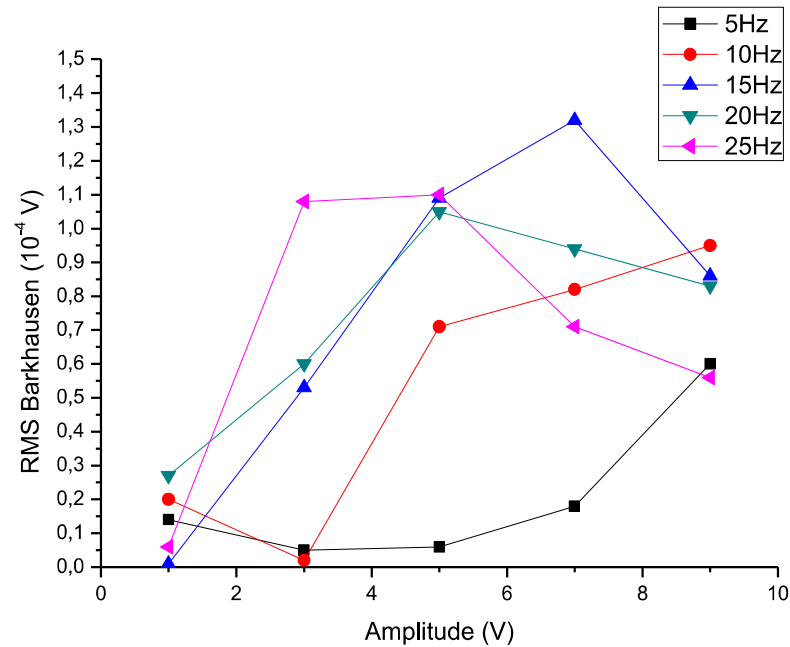
**Figura 4.9 - Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras senoidais com frequências de 5 Hz e 25 Hz amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.**



Afim de se determinar a frequência e amplitude que resulte na maior amplitude de medida, o módulo das diferenças dessas condições com e sem precipitados para as frequências estudadas são apresentadas na Figura 4.10.



**Figura 4.10 – Módulo da diferença das medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras senoidais com frequências de 5, 10, 15, 20 e 25 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.**



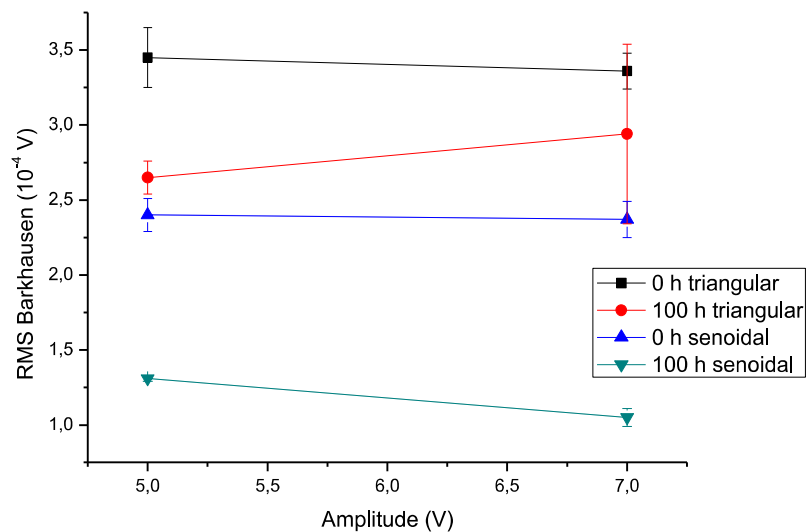
Pode-se observar da Figura 4.10 que a onda emissora de 5 Hz somente consegue detectar variações microestruturais, para os valores de amplitudes estudadas, acima de 5 V, enquanto que a de 10 Hz começa após 3 V. As ondas com 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz iniciam após 1 V. O aumento da frequência produz uma varredura maior da estrutura do material e com isso reduz o valor da amplitude necessária.

Os resultados das variações dos RMS na Figura 4.10, para as ondas com frequências de 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz, apresentam um aumento nos valores até um pico, seguida de redução. O pico ocorre para as amplitudes de 7 V, 5 V e 3 V para as frequências 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz, respectivamente. Esta queda deve-se ao fluxo magnético dentro do material começar ser influenciada pela presença das ilhas paramagnéticas de austenita dentro do material. A onda que apresentou maior amplitude de medida com a forma senoidal foi a 15 Hz e 7 V entre as estudadas.

Na Figura 4.11 se tem os valores de RMS para as ondas senoidais com frequência de 15 Hz e amplitudes 5 V e 7 V, bem como os resultados obtidos com a onda triangular de mesma frequência e amplitudes. Nota-se, que para as condições de medidas realizadas no presente trabalho tanto pode-se usar a amplitude de 5 V

quanto a de 7 V quando se leva em consideração as faixas de erro. Além disso, podemos destacar que a onda senoidal possui uma maior amplitude de medida ao ser comparada com a triangular, apesar desta ter valores de RMS superiores aos da senoidal.

**Figura 4.11 – Valores de RMS para ondas triangulares e senoidais de frequência de 15 Hz e amplitudes de 5 V e 7 V.**



### 4.3 APLICAÇÃO DA CONDIÇÃO ÓTIMA PARA ACOMPANHAMENTO DA FRAGILIZAÇÃO DE UM AID A 475 °C

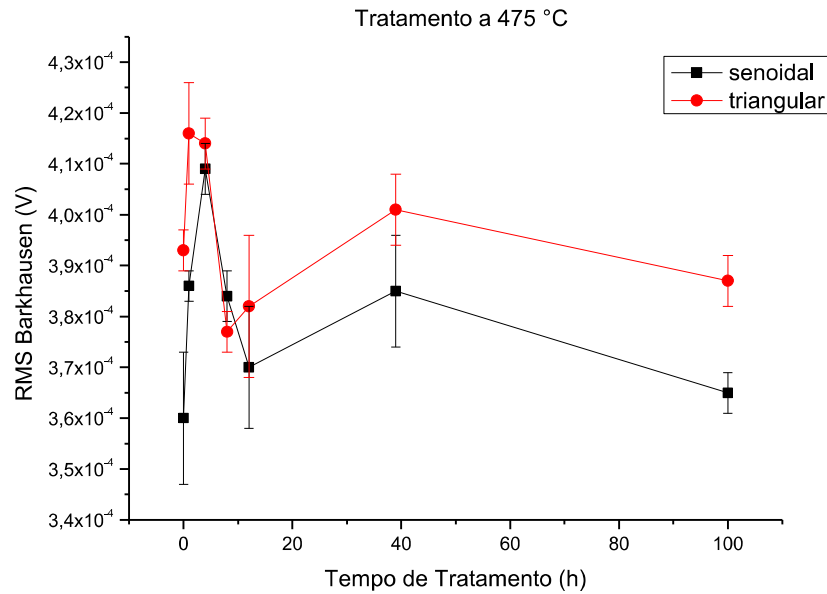
Na Figura 4.12 temos a variação das medidas de RMS para ondas emissoras de 15 Hz e 7 V de forma senoidal e triangular, em função do tempo de formação dos precipitados finos em um aço inoxidável duplex. Nota-se um comportamento similar para as duas curvas, com valores superiores para onda triangular. Isto parece estar associado a esse tipo de onda, a qual apresenta uma variação de sentido menos suave que a senoidal. As paredes dos domínios magnéticos ao serem bloqueadas pelos pontos de ancoragem, que são os precipitados, provocam assim mais ruído com a onda triangular.

A Figura 4.12 apresenta um pico inicial para tempos em torno de 4 horas e em seguida uma queda com tendência de estabilização. Silva (2009) estudou este mecanismo de formação da nova fase. Neste tipo de material, inicialmente temos

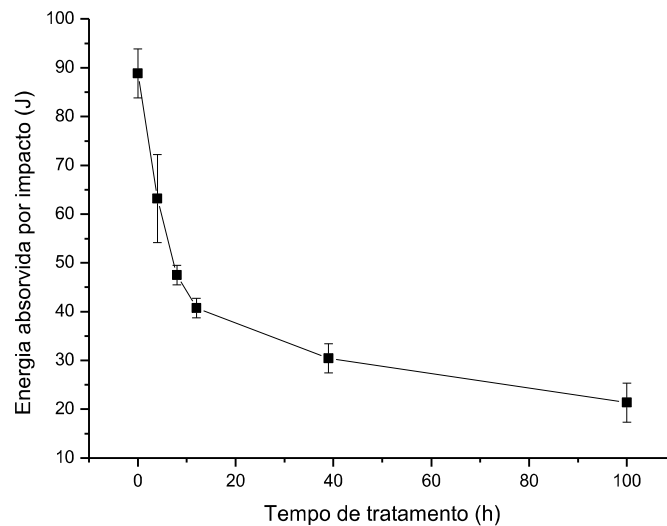
duas fases, a austenita (paramagnética) e ferrita (ferromagnética), sendo que ocorrem transformações somente na ferrita. Esta se decompõe formando uma fase paramagnética de composição próxima da ferrita, que é chamada de  $\alpha'$ . Esta se forma inicialmente coerente com a matriz ferrita e ao perder essa coerência tem a partir daí a consolidação da sua composição. Isto dá indícios de que o pico inicial se deve ao ponto da queda de coerência, onde o tamanho da nova fase é suficiente para bloquear com mais eficiência o movimento das paredes dos domínios magnéticos. A região de estabilização corresponde ao patamar observado depois de 24 horas.

A fim de melhor entender o comportamento do material estudado, a Figura 4.13 mostra a variação das medidas de energia absorvida por impacto em função do tempo de envelhecimento, para o mesmo. Nota-se, que a energia decresce e estabiliza em um patamar. Este comportamento está associado à formação da nova fase e sua consolidação, que aumenta a dureza do material e reduz a sua capacidade de absorver energia (SILVA 2009, 2016, TAVARES 2010). O ensaio de impacto, no entanto, não possui sensibilidade para acompanhar a queda de coerência da formação da nova microestrutura. Contudo, o ensaio eletromagnético apresentado consegue detectar esse momento.

**Figura 4.12 – Valores de RMS para ondas emissoras de 15 Hz e 7 V de forma senoidal e triangular, em função do tempo de formação dos precipitados finos.**



**Figura 4.13 – Medidas de energia absorvida por impacto em função do tempo de envelhecimento**



**Fonte: Banco de dado do GSCMat.**

O presente trabalho buscou determinar a frequência e amplitude ótimas a serem aplicadas em uma bobina emissora para obter-se o ruído de Barkhausen em amostra com a formação de precipitados finos. Observou-se que tanto as ondas

senoidais quanto triangulares podem ser utilizadas para o presente trabalho. A seguir serão apresentadas as conclusões obtidas.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho estudou as características de uma onda emissora capaz de produzir o ruído de Barkhausen e acompanhar a formação precipitados finos em um ensaio eletromagnético com bobinas posicionadas em superfícies oposta no material. As seguintes conclusões foram obtidas:

- As ondas de formato triangulares, na faixa de frequência estudada, foram capazes de detectar a formação de precipitados finos dentro do material. Estas apresentaram um comportamento similar entre a condição com e sem a formação da nova fase para as amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.
- Ondas triangulares com frequência de 25 Hz e amplitudes acima de 5 V, entre as estudadas, apresentam uma redução nos valores de RMS devido provavelmente a capacidade de varrer um volume maior do material e sofrer interferência das fases austenita, que é paramagnética. Este efeito também foi observado em ondas senoidais para frequência a partir de 15 Hz.
- A onda triangular de 15Hz e amplitude de 7 V apresentou maiores amplitudes de medidas e foi escolhida para acompanhar a formação de precipitados finos em um aço inoxidável duplex na temperatura de 475 °C.
- As ondas senoidais mostram ser capazes de também acompanhar a formação de precipitados. Contudo, para frequência de 5Hz são necessárias amplitudes acima de 5 V e para 10 Hz acima de 3V. As demais frequências a partir de 3 V.
- Tanto as ondas de forma senoidal quanto a triangular foram capazes de acompanhar a formação de precipitados finos e o comportamento da energia absorvida nas temperaturas estudadas.
- O ensaio eletromagnético foi capaz de acompanhar a formação da fase  $\alpha'$ , indicando o momento da sua formação (perda de coerência com a matriz), que não é possível através do ensaio de impacto.
-

## 5.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar o efeito da geometria das amostras na interação entre onda e material.

## REFERÊNCIAS

CARVALHO FILHO, J.A. **Ensaio eletromagnético baseado no ruído de Barkhausen para acompanhamento de formação de transformações microestruturais**, 61 f. Dissertação de mestrado. Instituto Federal da Paraíba - IFPB, 2018.

CHUKWUCHEKWA, N. **Investigation of magnetic properties and Barkhausen noise of electrical steel**. 194 f. Tese de doutorado. Cardiff University, 2011.

FRANÇA NETO, F. A., **Estudo de uma nova técnica não destrutiva, baseada em medidas de permeabilidade magnética, para acompanhamento da fragilização de um aço inoxidável duplex**, 105 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba - UFPB, 2011

GENEROSO, D.J; DAMIN,K.V.S, **Aços Inoxidáveis Duplex visão geral: da história metalurgia física**, 134 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Instituto Federal de Santa Catarina-IFSC, 2014

GHANEI, S. et al. Nondestructive characterization of microstructure and mechanical properties of intercritically annealed dual-phase steel by magnetic Barkhausen noise technique. **Materials Science and Engineering A**, v. 607, p. 253–260, 2014.

JARRAHI, F.; KASHEFI, M.; AHMADZADE-BEIRAKI, E. An investigation into the applicability of Barkhausen noise technique in evaluation of machining properties of high carbon steel parts with different degrees of spheroidization. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 385, p. 107–111, 2015.

KAHROBAEE, S.; HEJAZI, T. H. A RSM-based predictive model to characterize heat treating parameters of D2 steel using combined Barkhausen noise and hysteresis loop methods. **Journal of Magnetism and Magnetic**



**Materials**, v. 433, p. 131–140, 2017.

KLEBER, X.; BARROSO, S. P. Investigation of shot-peened austenitic stainless steel 304L by means of magnetic Barkhausen noise. **Materials Science and Engineering A**, v. 527, n. 21–22, p. 6046–6052, 2010.

LIMA, L.G. **Estudo da influência de precipitados finamente dispersos na interação campo magnético e material**. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal da Paraíba – IFPB, 2018.

MOSES, A. J.; PATEL, H. V.; WILLIAMS, P. I. AC Barkhausen noise in electrical steels: Influence of sensing technique on interpretation of measurements. **Journal of Electrical Engineering**, v. 57, n. 8 SUPPL, p. 3–8, 2006.

OTÁROLA, T. et al. Embrittlement of a superduplex stainless steel in the range of 550-700 °C. **Engineering Failure Analysis**, v. 12, n. 6 SPEC. ISS., p. 930–941, 2005.

PAL'A, J.; BYDŽOVSKÝ, J. Two-stage method of Barkhausen noise measurement. **International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics**, v. 46, n. 3, p. 583–591, 2014.

SAMIMI, A. A.; KRAUSE, T. W.; CLAPHAM, L. Multi-parameter Evaluation of Magnetic Barkhausen Noise in Carbon Steel. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 35, n. 3, p. 1–8, 2016.

SILVA, E. M. et al. Phase transformations evaluation on an UNS S31803 duplex stainless steel based on nondestructive testing. **Materials Science & Engineering**. n. 516, p. 126-130, 2009.

SILVA, E.M.S. et al. Evaluation of the magnetic permeability for the microstructural characterization of a duplex stainless steel. **Journal of Testing**

**Evaluation.** n. 44, p 1106-1111, 2016.

TAVARES, S. S. M. et al. Magnetic detection of sigma phase in duplex stainless steel UNS S31803. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 322, n. 17, p. L29–L33, 2010.

## ANEXO A – GLOSSÁRIO

*Shot Peening* *Shot peening* é um processo de trabalho a frio, em que um componente é bombardeado, em alta velocidade, com material esférico. O propósito deste processo é aumentar a resistência do componente contra trincas e fadigas, que normalmente se originam na superfície devido ao estresse da tensão aplicada

**Martensita** Martensita é uma fase metaestável composta por ferro que está supersaturada com carbono e que é o produto de uma transformação sem difusão da austenita. É formada quando ligas ferro - carbono austenitizadas são resfriadas rapidamente ou bruscamente. É uma estrutura monofásica, tetragonal de corpo centrado, porque se encontra em equilíbrio, resultante de uma transformação sem difusão da austenita.

Perlita

## ANEXO B – MÉTODOS DE ANÁLISE ESTOCASTICA PARA O RUÍDO DE BARKHAUSEN

Como o ruído de Barkhausen é de natureza estocástica, a análise estatística é necessária para sua interpretação. Os parâmetros de análise que são frequentemente usados para interpretar o ruído de Barkhausen incluem o valor efetivo, a soma das amplitudes, o espectro de potência e a Kurtosis.

O valor RMS é fácil de medir e é o parâmetro mais medido do ruído de Barkhausen. Isso é calculado a partir de:

$$rms \Psi = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2} \quad (1)$$

em que  $N$  = número de elementos na sequência de entrada e  $X_i$  são as amplitudes de ruído de Barkhausen.

A soma das amplitudes dos picos de ruído de Barkhausen também é conveniente, mas não conta picos ocorrendo simultaneamente nem leva em conta a contribuição de picos de diferentes magnitudes, enquanto a medição do espectro de potência contém tal informação. O espectro de energia é calculado da seguinte forma:

$$S_k(f) = X_k \cdot X_k^{compl.conj.} = |X_k(f)|^2 \quad (2)$$

onde  $X_k(f) = \text{FFT} ( X_k )$  e  $k$  é o índice do componente de frequência (harmônico) para o qual a potência foi calculada.

Kurtosis é um parâmetro que descreve o pico de uma distribuição de ruído de Barkhausen em relação a uma distribuição normal. Kurtosis é calculada a partir de:

$$Kurtosis \sigma^4 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (X_i - \mu)^4 \quad (3)$$

onde  $N$  é o número de elementos em  $X_i$  e  $\mu$  representes o valor médio da sequência. (MOSES; PATEL; WILLIAMS, 2006)