



**Izaura Luiz Viegas**

**Estudo da Aplicação de Ondas Senoidais para  
Detecção da Fase Sigma pela Análise do Ruído de  
Barkhausen**

**João Pessoa - PB  
Dezembro de 2019**



**Izaura Luiz Viegas**

# **Estudo da Aplicação de Ondas Senoidais para Detecção da Fase Sigma pela Análise do Ruído de Barkhausen**

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, Dr.  
Orientador

**João Pessoa - PB  
Dezembro de 2019**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Nilo Peçanha - IFPB, *campus* João Pessoa.

V656e Viegas, Izaura Luiz.

Estudo da aplicação de ondas senoidais para detecção da fase sigma pela análise do ruído de Barkhausen / Izaura Luiz Viegas. – 2019.

58 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2019.

Orientação : Prof. D.r Edgard de Macedo Silva.

1. Aço inoxidável Duplex 2. Ensaio não destrutivo  
3. Ruído magnético de Barkhausen. 4. Fase sigma. I.Título

CDU 620.179(043)

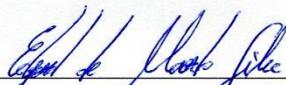
Lucrecia Camilo de Lima  
Bibliotecária  
CRB 15/132

# Estudo da Aplicação de Ondas Senoidais para Detecção da Fase Sigma pela Análise do Ruído de Barkhausen

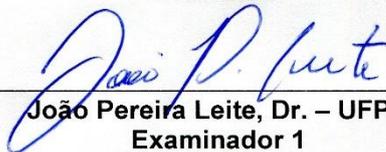
Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como pré-requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Dissertação de Mestrado defendida e Aprovada em 12/12/2019.

BANCA EXAMINADORA



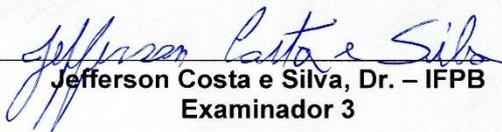
Edgard de Macedo Silva, Dr. – IFPB  
Orientador



João Pereira Leite, Dr. – UFPB  
Examinador 1



Alfredo Gomes Neto, Dr. – IFPB  
Examinador 2



Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB  
Examinador 3

João Pessoa - PB  
Dezembro de 2019

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Ser Supremo, o meu bom Deus, por me permitir saúde e bom ânimo, por me guiar nesta linda trajetória acadêmica e por colocar pessoas certas no momento mais necessário para a realização deste feito.

Ao Senhor orientador da pesquisa, Professor Dr. Edgard de Macedo Silva, por me conduzir nos estudos e por me receber como integrante do grupo de estudos e pesquisa GSCMat do IFPB (Grupo de Simulação e Comportamento de Materiais-IFPB).

Ao IFPB, o meu berço de conhecimento, assim como a toda equipe de Professores do PPGEE.

Agradecimentos especiais aos Professores: Prof.<sup>a</sup> Dra. Silvana Luciene Cunha Costa, Prof.<sup>a</sup> Dra. Susete Élide, Prof. Dr. Gil Luna Rodrigues (in memoriam) e ao Prof. Dr. Francisco de Assis Nobre, por me inspirarem a seguir essa trajetória de estudos.

A todos os colegas de estudos com quem cultivei amizade e que tenho admiração por representarem uma juventude produtiva e que alavancam a pesquisa para o desenvolvimento do país.

Aos meus familiares, os irmãos Luiz Viegas, os quais sempre acreditam na minha capacidade acadêmica e que me tomam como referência para as suas carreiras.

“Nós somos feitos da mesma  
matéria de que são feitos nossos  
sonhos”.

Willian Shakespeare

## RESUMO

A maneira como os materiais são empregados requer especificações capazes de garantir segurança e durabilidade em seu uso. A partir desta necessidade de emprego dos materiais e com a finalidade de melhor caracterizar as suas condições e propriedades mecânicas é que estudos e técnicas de ensaios mecânicos, destrutivos e não destrutivos, são desenvolvidas. Dentre diversas técnicas de ensaio não destrutivo, surgiu o ensaio eletromagnético que utiliza a análise do Ruído Magnético de Barkhausen (RMB). No corrente estudo, utiliza-se o RMB para detectar a presença da fase deletéria denominada de fase sigma ( $\sigma$ ) em um Aço Inoxidável Duplex (AID) SAF 2205. Essa fase  $\sigma$  na microestrutura de um AID começa a precipitar a partir de temperaturas por volta de 600°C e um percentual volumétrico em torno de 5% desta fase  $\sigma$  é capaz de comprometer características estruturais e mecânicas do material diminuindo a resistência à corrosão e a sua tenacidade. No presente trabalho foi realizado um estudo do uso de ondas emissoras de forma senoidal para detecção da presença da fase sigma e utilizada posicionamento das bobinas emissora e receptora em superfícies opostas, disposição essa que permite a varredura de um volume maior de material. Ondas com frequências de 5 Hz, 15 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz, e 100 Hz e amplitude variando de 1 V a 9 V foram empregadas em amostras de 4 mm e 8 mm de espessura. O estudo mostrou que os valores do parâmetro da raiz média quadrática (RMS) utilizada sofre influência do paramagnetismo da fase sigma e da formação de Ruído Magnético de Barkhausen, sendo estes dependentes da frequência e amplitude da onda emissora. Ao observar a razão entre a variação do módulo da diferença dos valores RMS entre as duas condições das amostras (uma com a presença da fase deletéria e outra sem a presença da fase deletéria sigma no material) em relação às medidas RMS das amostras que apresentam a fase sigma demonstrou diferenças de medidas de 60 % e foram obtidas com frequências de 5 Hz e 15 Hz para amostras de 4 mm, enquanto que para amostras de 8 mm obteve-se, essa diferença para frequências até 50 Hz, mostrando assim ser o ensaio eficaz para aplicação.

**Palavras-chave:** Aço Inoxidável Duplex (AID), Ensaio Não Destrutivo (END), Fase sigma ( $\sigma$ ), Ruído Magnético de Barkhausen (RMB).

## ABSTRACT

The way in which the materials are used requires specifications capable of guaranteeing safety and durability in their use. Based on this need to use materials and in order to better characterize their mechanical conditions and properties, studies and techniques for mechanical tests (destructive and non-destructive) are developed. Among several non-destructive testing techniques, the electromagnetic test that uses Magnetic Barkhausen Noise (MBN) analysis emerged. In the current study, MBN is used to detect the presence of the deleterious phase called the sigma phase ( $\sigma$ ) in a Duplex Stainless Steel (AID) SAF 2205. This phase  $\sigma$  in the microstructure of an AID begins to precipitate from thermal variations around 600°C approximately and a volumetric percentage around 5% of this phase  $\sigma$  is able to compromise the structural and mechanical characteristics of the material, reducing corrosion resistance and toughness. In the present work, a study was made of the use of emitting waves in a sinusoidal way to detect the presence of the sigma phase and the positioning of the emitting and receiving coils on opposite surfaces was used, which allows the scanning of a larger volume of material. Waves with frequencies of 5 Hz, 15 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz, and 100 Hz and amplitude ranging from 1 V to 9 V were used in samples of 4 mm and 8 mm. The study showed that the values of the mean square root (RMS) parameter used are influenced by the sigma phase paramagnetism and the formation of Magnetic Barkhausen Noise, which are dependent on the frequency and amplitude of the emitting wave. When observing the ratio between the variation of the module of the difference of the RMS values between the two conditions of the samples (one with the presence of the deleterious phase and the other without the presence of the deleterious sigma phase in the material) in relation to the RMS measures of the samples that present the sigma phase demonstrated differences in measurements of 60% and were obtained with frequencies of 5 Hz and 15 Hz for samples of 4 mm, while for samples of 8 mm it was obtained, this difference for frequencies up to 50 Hz, showing thus to be the test effective for application.

**Keywords:** Duplex Stainless Steel (AID), Non-Destructive Testing (NDT), Sigma Phase ( $\sigma$ ), Magnetic Barkhausen Noise (MBN).

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Esquema de um sistema rudimentar para detecção de RMB.....	20
Figura 2	Curva de magnetização característica para materiais ferromagnéticos....	20
Figura 3	Variação do sinal devido a presença do ruído de Barkhausen ao longo da curva inicial de magnetização.....	22
Figura 4	Diagrama esquemático do sistema de medição do RMB para uma bobina receptora envolvente.....	23
Figura 5	Diagrama esquemático do sistema de medição do RMB para uma bobina receptora de superfície.....	24
Figura 6	Esquema simplificado para detecção e medição dos parâmetros característicos relativos a ensaios com RMB.....	24
Figura 7	Micrografia de um AID SAF 2205 tratada termicamente a 800°C durante 15 minutos, vista por meio de MO.....	27
Figura 8	Micrografia de um AID SAF 2205 tratada termicamente a 800°C durante 15 minutos, vista por meio de MEV.....	27
Figura 9	Microestrutura da amostra tratada com solução eletrolítica (a). Microestrutura da amostra envelhecida termicamente por 2h a 800°C (b). Microestrutura da amostra envelhecida termicamente por 2h a 900°C (c).....	29
Figura 10	Configuração da bancada experimental para medição do RMB.....	30
Figura 11	Ruído de Barkhausen da amostra recebida.....	31

Figura 12	Ruído de Barkhausen das amostras tratadas a 800 ° C - a) 1h; b) 24h...	31
Figura 13	Ruído de Barkhausen das amostras tratadas a 900 ° C - a) 1h; b) 24h...	32
Figura 14	Variação da intensidade do sinal de Barkhausen Noise com o tempo durante a espera isotérmica a 800 ° C e 900 ° C.....	33
Figura 15	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).....	34
Figura 16	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 10Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.....	35
Figura 17	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 15Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.....	36
Figura 18	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 20Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.....	37
Figura 19	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 25Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.....	37
Figura 20	Bancada experimental: gerador de sinais (1); osciloscópio (2); bloco de emissão e captação de sinais (3); computador para aquisição e tratamento de dados (4).....	38

Figura 21	Bloco de emissão e recepção do sinal – detalhe interior. Bobina emissora do sinal (1); bobina receptora do sinal (2); amostra do material (3); carcaça do bloco com aterramento (4); amostra do material em geometria circular (5).....	39
Figura 22	Variação dos valores RMS do ruído na bobina receptora em função da frequência e amplitude da onda aplicada na bobina emissora. Amostras com 8mm de espessura.....	43
Figura 23	Variação do RMS do sinal na bobina receptora, em função da amplitude da onda na bobina emissora, para as frequências de 25 Hz e 50 Hz em amostras com e sem a formação da fase sigma. Amostras com 8mm de espessura.....	44
Figura 24	Medidas RMS do ruído na bobina receptora em função das amplitudes das ondas emissoras, para as frequências de 50 Hz e 75 Hz, para amostras com e sem a formação da fase sigma. Amostras com 8mm de espessura.....	45
Figura 25	Medidas RMS do ruído na bobina receptora em função das amplitudes das ondas emissoras, para as frequências de 75 Hz e 100 Hz, para amostras com e sem a formação da fase sigma. Amostras com 8mm de espessura.....	45
Figura 26	Medidas da razão entre o módulo da diferença e o valor RMS da amostra com fase sigma, em função das frequências das ondas emissoras para as amplitudes de 1 V a 9 V. Amostras com 8mm de espessura.....	46
Figura 27	Medidas da razão entre o módulo da diferença e o valor de RMS da amostra com fase sigma, em função das amplitudes das ondas emissoras, para frequências de 5 Hz, 15 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz. Amostras com 8 mm de espessura.....	47

Figura 28	Medidas RMS do ruído na bobina receptora em função das amplitudes das ondas emissoras, para as frequências de 5 Hz e 15 Hz, para amostras com e sem a formação da fase sigma. Amostras com 4 mm de espessura.....	48
Figura 29	Medidas RMS do ruído na bobina receptora em função das amplitudes das ondas emissoras, para as frequências de 15 Hz e 25 Hz, para amostras com e sem a formação da fase sigma. Amostras com 4 mm de espessura.....	49
Figura 30	Medidas RMS do ruído na bobina receptora em função das amplitudes das ondas emissoras, para as frequências de 25 Hz e 75 Hz, para amostras com e sem a formação da fase sigma. Amostras com 4 mm de espessura.....	50
Figura 31	Medidas RMS do ruído na bobina receptora em função das amplitudes das ondas emissoras, para as frequências de 25 Hz e 100 Hz, para amostras com e sem a formação da fase sigma. Amostras com 4 mm de espessura.....	51
Figura 32	Medidas da razão entre o módulo da diferença e o valor de RMS da amostra com fase sigma, em função das amplitudes das ondas emissoras, para frequências de 5 Hz, 15 Hz, 25 Hz, 75 Hz e 100 Hz. Amostras com 4 mm de espessura.....	52

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1.	Profundidades aproximadas dos sinais do RMB em dependência de suas frequências de emissão.....	26
Tabela 2.	Resumo da metodologia empregada.....	41

## LISTA DE SIGLAS

AID -	Aço Inoxidável Duplex
B -	Campo Magnético Induzido ou Densidade do Fluxo Magnético
BE -	Bobina Emissora
BR -	Bobina Receptora
END -	Ensaio Não Destrutivo
GSCMat -	Grupo de Simulação e Comportamento de Materiais
H -	Intensidade de Campo Magnético Aplicado
MO -	Microscopia Óptica
MEV -	Microscopia Eletrônica de Varredura
RMB-	Ruído Magnético de Barkhausen
$\sigma$ -	Fase Sigma
$\delta$ -	Ferrita

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	17
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
2.1	RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN (RMB).....	19
2.2	EFEITO DA ESPESSURA NAS MEDIDAS DO RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN.....	25
2.3	AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX E A FORMAÇÃO DA FASE SIGMA EM SUA MICROESTRUTURA.....	26
2.4	ESTUDO DA MICROESTRUTURA DE UM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX ATRAVÉS DO RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN.....	28
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>38</b>
3.1	BANCADA EXPERIMENTAL.....	38
3.2	O MATERIAL.....	40
3.3	ENSAIO ELETROMAGNÉTICO.....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>42</b>
4.1	ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA DE 8 mm.....	42
4.2	ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA DE 4 mm.....	47
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os avanços nos estudos sobre as formas de se processar os materiais e a busca por melhoramentos para seus empregos e funcionalidades levaram a técnicas e ensaios para análise dos materiais (CULLITY, 2011). Dentre muitas técnicas para ensaio de materiais e caracterização de suas propriedades os Ensaios Não Destrutivos (END) eletromagnéticos que analisam o Ruído Magnético de Barkhausen são bastante utilizados e servem para monitorar o comportamento de propriedades específicas dos materiais quando sujeitos a variações de campos magnéticos (MARTÍNEZ-ORTIZ, 2016; ANDRADE, 2016). Ensaios que utilizam RMB são úteis, pois representam, através da variação dos pulsos elétricos, as interações que ocorrem no interior de um material entre o movimento das paredes dos domínios magnéticos, microestrutura e conseqüentemente sobre as suas propriedades macroscópicas (KRAUSE; MAKAR; ATHERTON, 1994; WHITE; KRAUSE; CLAPHAM, 2007; NORMANDO, 2010).

O Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) é um fenômeno magnético originado dos choques entre as paredes dos domínios magnéticos com pontos de ancoragem como: os contornos de grãos, precipitados e lacunas existentes na microestrutura do material. O RMB é utilizado em técnicas de ensaios não destrutivos (END) e servem como base quantitativa, ao se analisar os picos de tensões gerados. São usados em vários estudos que tratam da análise do comportamento de tensões mecânicas em microestruturas de materiais ferromagnéticos, análise de anisotropia e detecção de direção de mais fácil magnetização (CARVALHO FILHO, 2018; HE, 2018; ANDRADE, 2016) como também, há a sinalização de alguns estudos da sua aplicação em análise de comportamento de outros tipos de materiais, como os paramagnéticos (ARAÚJO, 2019).

Através da captação e análise dos RMB é possível traçar uma correlação entre as propriedades de um material e a sua microestrutura. Como por exemplo, com a observação dos RMB é possível analisar comportamento de materiais que passaram por processo de envelhecimento térmico, traçar o perfil da concentração de precipitados na microestrutura do material e a sua influência sobre as propriedades mecânicas de materiais, analisar as fragilidades do material, estudar como se

comportam os materiais que passaram por variações de esforços mecânicos e se essas variações geraram algum tipo de estresse mecânico ou fadiga (SERNA-GIRALDO, 2007; GHANEI et al, 2014; CARVALHO FILHO, 2018).

A geração do Ruído de Barkhausen depende da emissão de uma onda em uma bobina emissora e detecção dela, após interagir com o material, em uma bobina receptora. De acordo com alguns autores (KAHROBAEE; HEJAZI, 2017; SAMIMI; KRAUSE; CLAPHAM, 2016; CARVALHO FILHO, 2018), existem algumas formas de medição de RMB que dependem da configuração da bancada e da finalidade e peculiaridade de cada experimento, tendo em vista que a captação de sinais de RMB é utilizada em diferentes estudos. Comumente, são utilizados dois sistemas de medição de RMB: um com a bobina receptora envolvendo o material da amostra (KAHROBAEE; HEJAZI, 2017) e outro com a bobina receptora do sinal perpendicular à superfície do material (SAMIMI; KRAUSE; CLAPHAM, 2016). Neste trabalho, utiliza-se uma nova configuração da bancada (CARVALHO FILHO, 2018) em que a bobina receptora do sinal se posiciona numa superfície oposta a da posição da bobina emissora da onda, o que permite a varredura de um volume maior de material, quando comparado com a utilização de bobinas receptoras de superfícies e envolventes (KAHROBAEE; HEJAZI, 2017; SAMIMI; KRAUSE; CLAPHAM, 2016). Quanto às faixas de frequência e formatos das ondas utilizadas para a detecção dos RMB, nos sistemas descritos nas literaturas, geralmente frequências na faixa de 0,1Hz a 1kHz com sinais de ondas de formato triangular e senoidal são utilizadas (ARAÚJO, 2019).

Vários autores vêm estudando as características e propriedades de materiais ferromagnéticos a partir da geração do RMB (HUALLPA, 2016; GHANEI et al., 2014). Alguns estudos foram realizados utilizando amostras de Aço Inoxidável Duplex (AID) tipo SAF 2205. Esse tipo de aço apresenta em sua composição estrutural percentuais volumétricos da fase austenítica e ferrítica distribuídas quase que de forma proporcional, no entanto, ao se elevar a temperatura a partir de 600°C começa a surgir uma fase indesejada por ser rica em cromo e possuir alta dureza, fase denominada sigma. Essa fase paramagnética surge da transformação da fase ferrítica, que é ferromagnética e compromete as propriedades mecânicas como a tenacidade do material além da diminuição da resistência à corrosão (FIALHO, 2015).

Neste trabalho foi realizado um estudo em amostras de um Aço Inoxidável Duplex (AID) tipo SAF 2205. A partir da geração do Ruído Magnético de Barkhausen através da emissão de ondas de forma senoidal foi possível detectar a presença da fase fragilizante sigma presente neste tipo de material. Também foi observada a capacidade de uma bobina receptora, posicionada na superfície oposta do material, detectar a presença da fase paramagnética sigma.

## **1.1 OBJETIVO GERAL**

Determinar a capacidade de detecção da fase sigma em um aço inoxidável duplex, através da aplicação de ondas emisoras de forma senoidal e com bobina receptora posicionada na superfície oposta dessa.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Estudar a capacidade da aplicação de onda emissora senoidal, para geração do ruído de Barkhausen, com amostras circulares de diferentes espessuras, em um ensaio eletromagnético com bobina receptora posicionada na superfície oposta da emissora.

Determinar a capacidade de obtenção do Ruído de Barkhausen em amostras circulares com diferentes espessuras, com e sem a presença da fase sigma, em um aço inoxidável duplex.

## **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Este estudo foi realizado em três etapas elencadas em capítulos que discorrem da seguinte forma: uma revisão bibliográfica que aborda os RMB em sua forma conceitual, prosseguindo para a apresentação de métodos e formas práticas de medição de RMB em valores RMS. Por conseguinte, é observada a correlação entre os valores medidos dos RMB e as influências que tenham sido ocasionadas devido a mudança da geometria e das dimensões dos corpos de prova e se essa variação interfere ou não, na identificação dos parâmetros que caracterizam e relacionam a microestrutura e suas às propriedades macroscópicas do material. Sequencialmente será mostrado no trabalho, a apresentação dos materiais e métodos que foram utilizados para o END. Nesta etapa, é descrita a bancada de testes, os materiais utilizados e os procedimentos realizados para a aquisição dos dados. Os resultados

e discussões realizados com espessuras fixadas para as amostras são apresentados com as devidas considerações.

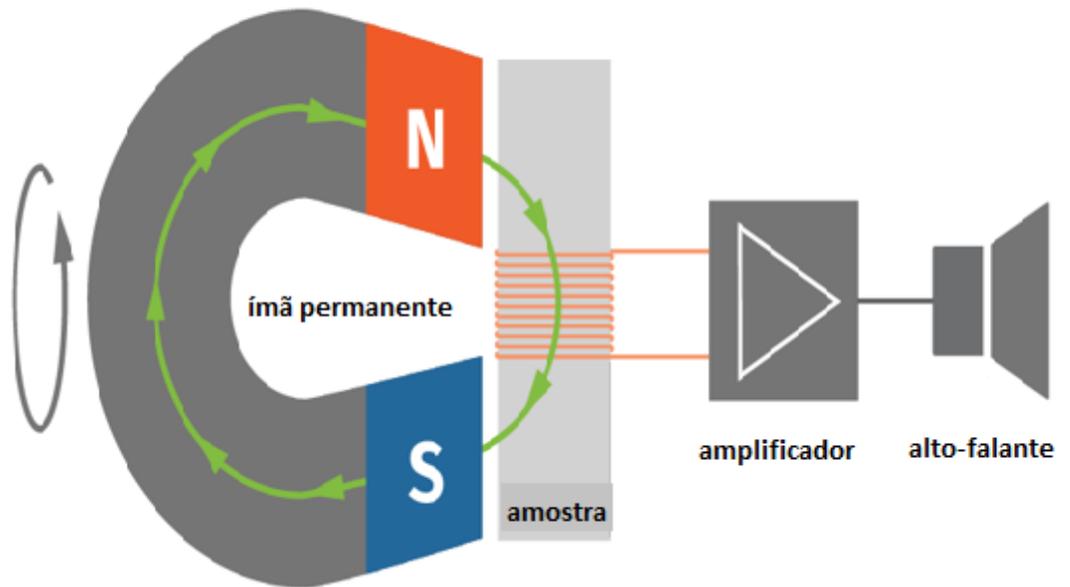
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para este estudo foi realizada uma revisão bibliográfica, acerca da temática em questão, dividida em quatro seções do Capítulo 2 e que tratam dos seguintes tópicos: a seção 2.1 descreve o histórico, o conceito e as formas de se medir os Ruídos Magnéticos de Barkhausen (RMB); a seção 2.2 mostra a relação existente entre a espessura da amostra e a profundidade eletromagnética atingidas pelos RMB em função de alguns parâmetros da onda emitida e de algumas características e grandezas relacionadas ao próprio material ferromagnético da amostra; a seção 2.3 discorre sobre a caracterização e como se forma a fase sigma em um AID ; a seção 2.4 relata estudos da microestrutura de AID com a utilização de RMB e a identificação de precipitados microestruturais que interferem nas propriedades mecânicas deste tipo de aço.

### 2.1 RUÍDOS MAGNÉTICOS DE BARKHAUSEN (RMB)

Em 1919, Heinrich Barkhausen descobriu um fenômeno relacionado à variação da densidade do fluxo magnético ( $B$ ) quando um material ferromagnético era permeado por um campo magnético variável e crescente. Um modelo de como se deu a detecção dos ruídos em sua forma mais primária, pode ser visto na Figura 1. Durante o experimento, Barkhausen observou que, ao magnetizar uma barra de ferro, envolta por uma bobina que estava ligada aos terminais de um amplificador acústico conectado a um alto-falante, era possível detectar pulsos de tensão elétrica através dos sons emitidos ao alto falante do sistema. Esses pulsos traduziam a ocorrência de movimento das paredes dos domínios magnéticos constituintes do material (FRANCO, 2010).

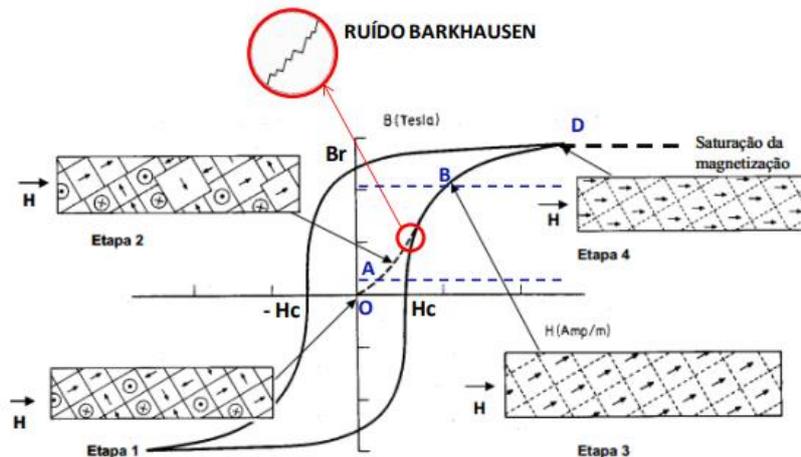
Figura 1. Esquema de um sistema rudimentar para detecção de RMB



Fonte: Adaptado <https://test-systems.es/noticias/analisis-del-ruido-magnetico-de-barkhausen>

A Figura 2 ilustra uma curva de histerese magnética representativa do fenômeno relativo aos RMB. Nota-se ao amplificar a curva de magnetização um comportamento serrilhado devido aos saltos abruptos das paredes dos domínios magnéticos ao superarem os pontos de ancoragem do material (SERNA-GIRARDO, 2007; ANDRADE, 2016).

Figura 2. Curva de magnetização característica para materiais ferromagnéticos.



Fonte: Adaptado de SERNA-GIRARDO, 2007.

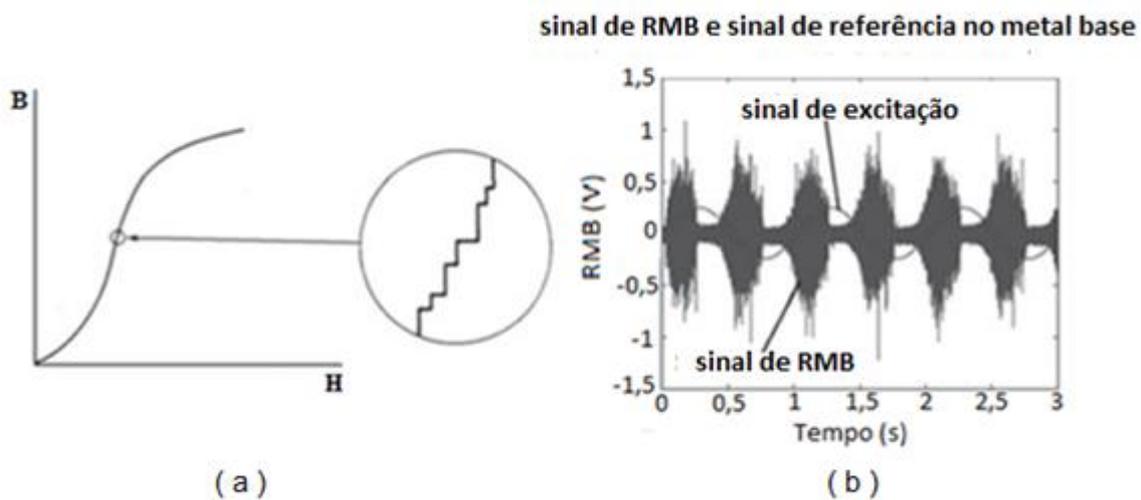
Ao analisar uma curva de magnetização para um material ferromagnético, como a apresentada na Figura 2, pode-se perceber que na região O-A desta curva, o campo magnético aplicado ( $H$ ) se relaciona de forma diretamente proporcional quando comparado ao valor da densidade de fluxo magnético ( $B$ ). Este fato se dá justamente porque esta é uma região onde ocorre a reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos constituintes do material. Com uma crescente variação do valor da intensidade de campo magnético ( $H$ ) aplicado, a partir do ponto A da curva de magnetização (Figura 2), as paredes dos domínios magnéticos passam a superar os pontos de ancoragem e ocorre a geração do ruído de Barkhausen. Os domínios magnéticos passam para região de irreversibilidade e tendem para a direção de fácil magnetização. Na região B-D, os domínios magnéticos passam por uma rotação da direção de fácil magnetização e alinham-se integralmente à direção do campo aplicado, atingindo o ponto de saturação. (SERNA-GIRARDO, 2007; ANDRADE, 2016).

Os estudos dos ruídos detectados na região de irreversibilidade dos movimentos dos domínios magnéticos são indicadores para avaliação não destrutiva de materiais por estarem relacionados às propriedades mecânicas. Tais ruídos e a sua correlação com as propriedades do material servem para monitorar e identificar falhas previamente, além de servir como aporte a prevenção de danos permanentes ao material, que são passíveis de ocorrer devido à concentração de precipitados ou microestruturas indesejáveis capazes de provocar rupturas ou até mesmo desgaste por fadiga devido às tensões internas residuais. (GHANEI et al., 2014).

Quando um campo magnético variável é aplicado a um material ferromagnético, o mesmo fica sujeito a uma variação de fluxo magnético que é capaz de demonstrar o quanto as paredes dos domínios magnéticos e as imperfeições (como precipitados, discordâncias e contornos de grão) presentes na microestrutura do material, interagem entre si. Tais interações, geram sinais que se apresentam sob forma de picos de tensões elétricas. Esses picos estão diretamente correlacionados ao que foi denominado de Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) e são perceptíveis ao se observar a região íngreme de uma curva de magnetização de um material ferromagnético (ARAÚJO, 2019).

Um exemplo de como se comporta a variação de um sinal de excitação gerado sobre um metal tomado como referência e o sinal de RMB pode ser observado nas Figuras 3(a) e 3(b). A Figura 3(a) apresenta uma curva de magnetização de um material ferromagnético considerando a densidade de fluxo magnético (B) em função do campo aplicado (H) e é comparada a um gráfico na Figura 3(b). A Figura 3(b) mostra o comportamento do RMB quantificado em unidade de tensão elétrica em função do tempo e denota uma comparação entre o sinal ou a onda de excitação que permeia o material e o sinal de RMB detectado. O experimento foi realizado com a finalidade de averiguar a existência de variações microestruturais em juntas soldadas de aço (SERNA-GIRALDO, 2010).

**Figura 3. Variação do sinal devido a presença do ruído de Barkhausen ao longo da curva inicial de magnetização.**



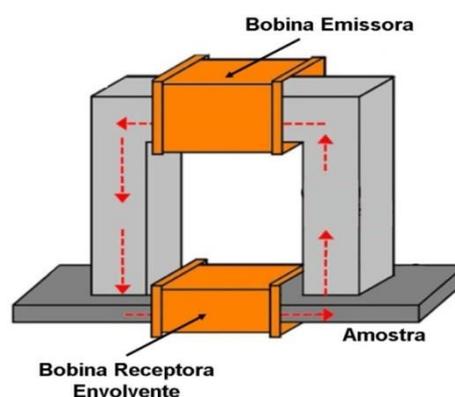
Fonte: Adaptado SERNA-GIRALDO, 2010.

De maneira geral, o RMB é detectado através de um sistema que utiliza dispositivos eletromagnéticos. O sistema para detecção e medição de RMB é basicamente formado por duas bobinas que são posicionadas ao redor de um núcleo de ferrita de geometria em 'U' e que fica em contato direto com a amostra a ser analisada. A partir desta configuração do sistema, uma bobina emissora (BE) gera uma onda eletromagnética que atravessa o material da amostra. Após a passagem desta onda pelo material da amostra, uma segunda bobina, comumente denominada

de bobina receptora (BR) é utilizada para a captação da onda e seus parâmetros característicos. Como os ruídos estão relacionados a frequência e a forma da onda do campo excitante, geralmente se utiliza um sistema capaz de regular estas frequências de emissão para encontrar a frequência ideal de magnetização que depende das condições de cada experimento. Usualmente a frequência ideal para a magnetização e detecção dos RMB se situam na ordem de 0,1Hz a 1kHz, segundo é mostrado em alguns estudos (CHUKWUCHEKWA, 2011; CARVALHO FILHO, 2018).

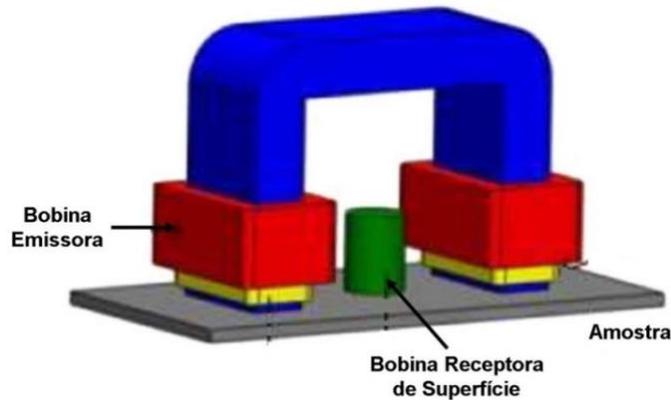
De acordo com os autores (KAHROBAEE; HEJAZI, 2017; SAMIMI; KRAUSE; CLAPHAM, 2016) existem duas formas de medição de RMB que dependem da configuração da bancada e da finalidade e peculiaridade de cada experimento, tendo em vista que a captação de sinais de RMB é utilizada em diferentes estudos. Podem ser encontradas na literatura, técnicas de medição de RMB que utilizam a bobina receptora de duas formas: uma envolvendo o corpo de prova (Figura 4), podendo ser de enrolamento simples cuja frequência de trabalho pode limitar as informações relativas aos RMB ou de enrolamento duplo que pode minimizar ou cancelar a frequência de magnetização devido à disposição dos enrolamentos que ficam em sentidos opostos e conectados em série entre si; E a outra (Figura 5), com a bobina receptora disposta perpendicularmente à superfície do corpo de prova e tendo esta, um núcleo de ferrite para amplificar campo magnético.

**Figura 4. Diagrama esquemático do sistema de medição do RMB para uma bobina receptora envolvente.**



**Fonte: Araújo, 2019. Adaptado de KAHROBAEE; HEJAZI, 2017.**

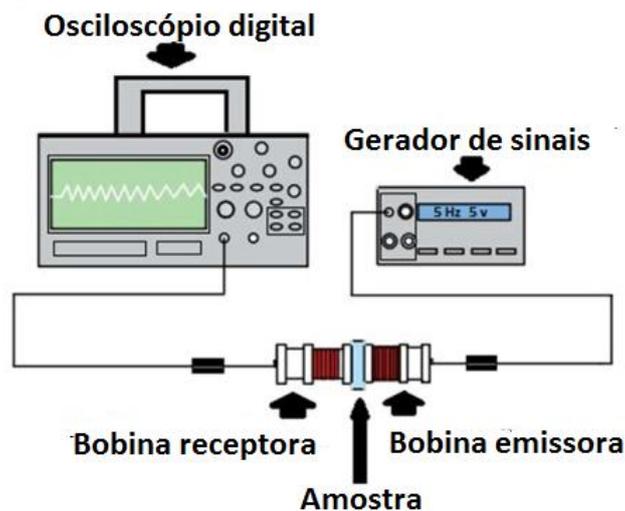
Figura 5. Diagrama esquemático do sistema de medição do RMB para uma bobina receptora de superfície.



Fonte: Araújo, 2019. Adaptado de SAMIMI; KRAUSE; CLAPHAM, 2016.

Em recente estudo sobre detecção e medição de RMB em valores de RMS, Carvalho Filho (2018) utilizou um esquema simplificado (Figura 6), com a disposição de uma bobina receptora posicionada na superfície oposta da emissora para detecção de RMB e com essa configuração possibilitou o uso de amostras de diferentes geometrias e de diferentes dimensões, sendo esse um diferencial em relação aos sistemas de medição de RBM utilizados anteriormente.

Figura 6. Esquema simplificado para detecção e medição dos parâmetros característicos relativos a ensaios com RMB



Fonte: Adaptado: Carvalho Filho, 2018.

## 2.2 EFEITO DA ESPESSURA NAS MEDIDAS DO RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN

Não são fixados na literatura valores de referência que delimitem valores máximos ou mínimos de frequência para detecção do RMB, no entanto, alguns trabalhos foram realizados utilizando valores desde 1 kHz a 2 kHz até dezenas de kHz, entre 100 kHz e 200 kHz. No entanto, o interessante é que foi observado, que para valores de frequências mais altas os sinais do RMB estão relacionados a locais mais próximos a superfície do material e que para frequências mais baixas estes tipos de ruídos podem ser detectados tanto nas maiores como nas menores profundidades. A profundidade da medição do RMB foi analisada em alguns estudos (CHIKAZUMI,1996; JILES D.C,2000) e foi comprovado que os sinais de RMB são dependentes da frequência da onda emitida. A equação 1 relaciona a profundidade de penetração da onda eletromagnética em função da frequência do sinal, condutividade e permeabilidade magnética.

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

**Fonte: Adaptado: Franco,2010.**

Considerando que:

$\delta$  = Profundidade de penetração da onda eletromagnética (m)

$f$  = Frequência do sinal

$\sigma$  = Condutividade do material

$\mu_0$  = permeabilidade magnética do vácuo

$\mu_r$  = permeabilidade relativa do material

A partir da Equação 1 e considerando um aço cujas características são: permeabilidade relativa de 50 a 5000; condutividade elétrica de  $5 \cdot 10^6$  a  $10 \cdot 10^6$  / $\Omega \cdot m$  e permeabilidade magnética do vácuo  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  H/ m é possível determinar faixas de profundidade em função da frequência de emissão da onda, como mostra a Tabela 1.

**Tabela 1. Profundidades Aproximadas dos Sinais do RMB Em Dependência de Suas Frequências de Emissão.**

<b>Frequência de emissão (KHz)</b>	<b>Faixa de profundidade <math>\delta</math> (mm)</b>
0,01	0 – 10.00
0,05	0 – 4.50
0,1	0 – 3.20
0,5	0 – 1.40
1	0 – 1.00
5	0 – 0.45
10	0 – 0.32
50	0 – 0.14
100	0 – 0.10
500	0 – 0.045

**Fonte: Franco,2010. Adaptado D.C., JILES, 2000**

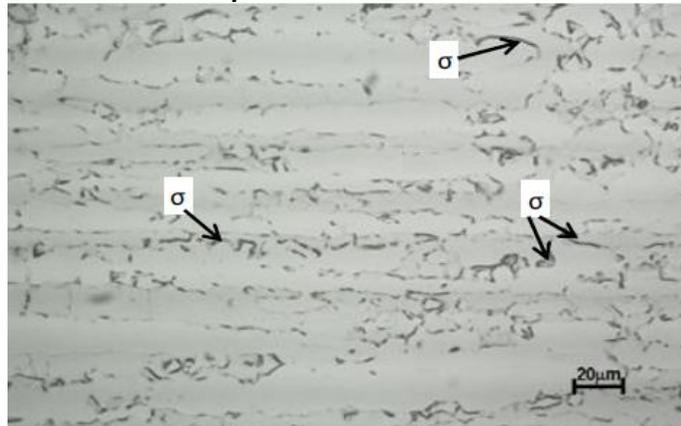
### 2.3 AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX E A FORMAÇÃO DA FASE SIGMA EM SUA MICROESTRUTURA

O Aço Inoxidável Duplex SAF 2205 (UNS S31803) se caracteriza por apresentar em sua composição estrutural percentuais volumétricos iguais das fases austenítica e ferrítica. Este material ao ser submetido a ciclos térmicos a partir de 600°C tem a formação de uma fase indesejada denominada de sigma, que possui dureza de 900 HV e é rica em cromo. A elevada dureza compromete a capacidade de absorver energia por impacto (tenacidade) e o elevado teor em cromo leva ao empobrecimento da matriz desse elemento e redução da resistência à corrosão. Essa fase surge devido à transformação da fase ferrítica em sigma, elevando o percentual de paramagnetismo da liga, pois a fase austenita também possui esta característica. (FIALHO, 2015).

Com a finalidade de observar e identificar visualmente a fase sigma em um AID as Figuras 7 e 8 mostram como se apresenta a precipitação dessa fase deletéria em amostras tratadas durante 15 minutos a 800°C. A Figura 7 mostra a micrografia de um Aço Inoxidável Duplex (AID) SAF 2205 por meio de microscopia óptica (MO) que passou por um processo de envelhecimento térmico a 800°C durante 15 minutos. Na

Figura 7 nota-se a fase sigma e observa-se que a mesma se precipita nas interfaces dos contornos de grãos (FIALHO, 2015).

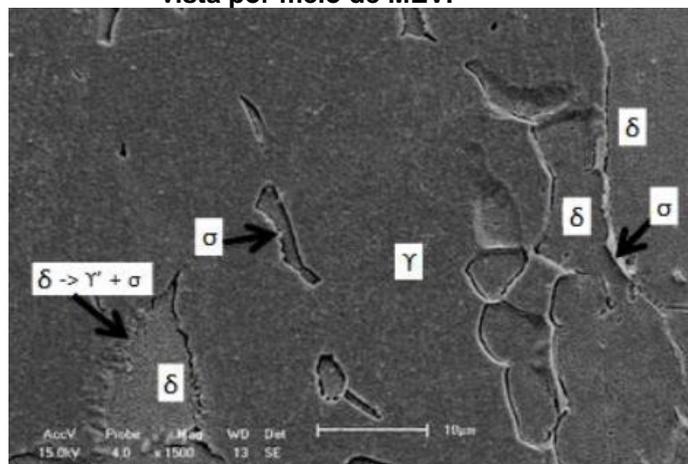
**Figura 7. Micrografia de um AID SAF 2205 tratada termicamente a 800°C durante 15 minutos, vista por meio de MO.**



Fonte: Fialho, 2015.

A Figura 8 mostra a micrografia, através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), de um Aço Inoxidável Duplex (AID) SAF 2205 tratado termicamente a 800°C durante 15 minutos. Na Figura 8 é possível identificar a formação da fase sigma ( $\sigma$ ) a partir da decomposição da ferrita ferromagnética ( $\delta$ ) (FIALHO, 2015).

**Figura 8. Micrografia de um AID SAF 2205 tratada termicamente a 800°C durante 15 minutos, vista por meio de MEV.**



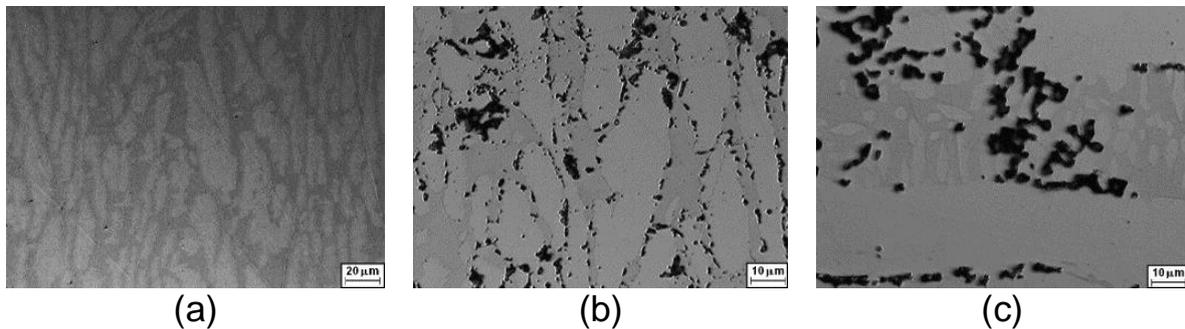
Fonte: Fialho, 2015.

## 2.4 ESTUDO DA MICROESTRUTURA DE UM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX ATRAVÉS DO RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN

Normando (2010), em seu estudo, enfatizou o uso de ultrassom, correntes de Foucault e Ruído Magnético de Barkhausen com técnicas de ensaios não destrutivos para detecção da fase sigma em um AID UNS S31803 (SAF 2205). O objetivo principal foi o acompanhamento da transformação da ferrita ferromagnética em fase sigma ( $\sigma$ ) observando o comportamento da porcentagem e da dureza da ferrita em amostras de AID UNS S31803 com dimensões 300mm x 300mm x 10 mm, que foram submetidas a tratamento térmico de 800°C e 900°C durante 5, 15, 30 e 120 minutos, com a finalidade de obter diferentes quantidades da fase sigma, assim como foi realizada a metalografia convencional das amostras para identificar a presença das fases deletérias na estrutura do material observando que a estrutura metalográfica mostra regiões mais escuras indicando a presença da fase  $\sigma$  (GHOSH, S. K.; MONDAL,S; 2008). A Figura 9 mostra a microestrutura das amostras do AID UNS S31803 utilizadas no estudo.

Na Figura 9 (a) observa-se a microestrutura do material após um ataque eletrolítico em solução de KOH a 10%, o que mostra um suave contraste entre a austenita e a ferrita. É perceptível a diferença entre as regiões austeníticas que são mais claras das regiões ferríticas que são mais escuras. A Figura 9 (b) refere-se à microestrutura da amostra envelhecida termicamente a 800°C por um período de 2h enquanto a Figura 9 (c) mostra a microestrutura da amostra após um envelhecimento térmico de 2h a uma temperatura de 900°C. Ambas micrografias das amostras (mostradas nas Figuras 9 (b) e 9 (c)) e que foram envelhecidas termicamente, apresentam uma acentuação das regiões mais escuras o que indica que o ataque químico permitiu a revelação da fase deletéria sigma. (NORMANDO, 2010).

**Figura 9. Microestrutura da amostra tratada com solução eletrolítica (a). Microestrutura da amostra envelhecida termicamente por 2h a 800°C (b). Microestrutura da amostra envelhecida termicamente por 2h a 900°C (c).**



**Fonte: Normando, 2010.**

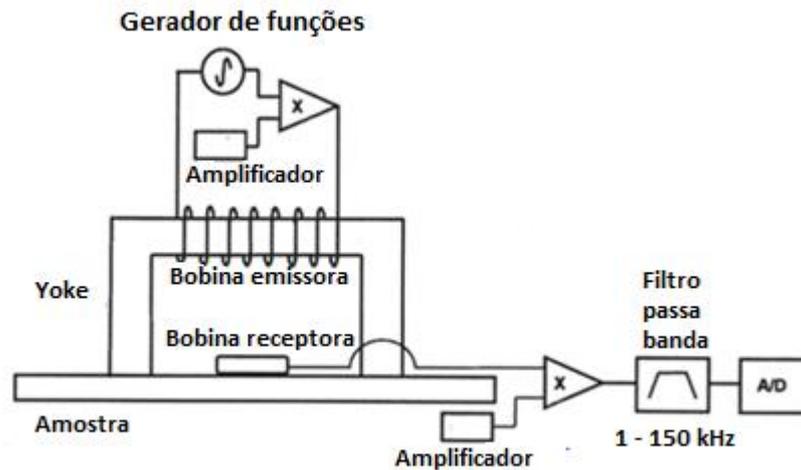
Foi realizada a comparação entre os resultados obtidos pelas técnicas de ultrassom, corrente de Foucault e por ruído magnético de Barkhausen e constatado que os três métodos utilizados são eficazes e promissores para detecção e quantificação de precipitações da fase deletéria  $\sigma$ .

HUALLPA (2016) estudou a evolução da formação da fase deletéria sigma no AID SAF2205 (DIN 1.4462 / UNS S31803) a partir de análise magnética deste tipo de aço e observou o comportamento do ruído magnético de Barkhausen (RMB) em função do aumento do tempo de tratamento térmico do material. Foi constatada diminuição de fases ferromagnéticas e conseqüentemente a diminuição significativa dos ruídos o que indicou que a fração volumétrica de ferrita ferromagnética diminuiu em função do aumento da temperatura e do tempo do tratamento térmico para valor de temperatura de 800°C a 900°C. Foram feitos tratamentos térmicos por 1h, 8h e 24h e o resfriamento feito com água. Para o estudo foram analisadas amostras de AID SAF2205 (DIN 1.4462 / UNS S31803) com dimensões (30x30x3) mm e direção dos grãos orientadas paralelamente a face (30x30) mm, sendo essa a direção de laminação.

Para a medição do sinal do RMB, o autor HUALLPA (2016) utilizou uma configuração de bancada para o experimento com sistema de medição do RMB que apresenta uma bobina receptora perpendicular a superfície do material da amostra, conforme mostra a Figura 10. O sinal foi gerado a partir de uma onda senoidal de 10Hz e um campo magnético de  $\pm 1,2 \times 10^4$  A / m. Utilizou-se um filtro passa-banda

(1-150 kHz) e foi definido o nível de dez medições de tensão RMS do RMB e eliminados ruídos não pertencentes ao sinal quando se definiu o nível inferior de tensão através de uma janela de tempo com os ruídos de fundo e foram consideradas para a análise apenas as tensões RMB de amplitude maior que o limite inferior.

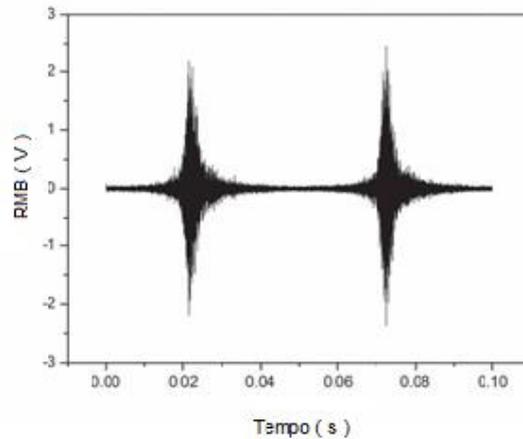
**Figura 10. Configuração da Bancada Experimental para medição do RMB**



**Fonte: Adaptado Huallpa (2016)**

As Figuras de 11 a 13 mostram o comportamento dos RMB em função do tempo, obtidos durante a medição, para as amostras que não passaram por tratamento térmico assim como para as amostras que foram sujeitas a tratamento. A Figura 11 refere-se às amostras que não apresentam a fase sigma em sua composição e mostram valores dos picos dos ruídos mais sobressalientes devido à presença de um maior percentual de ferrita no material.

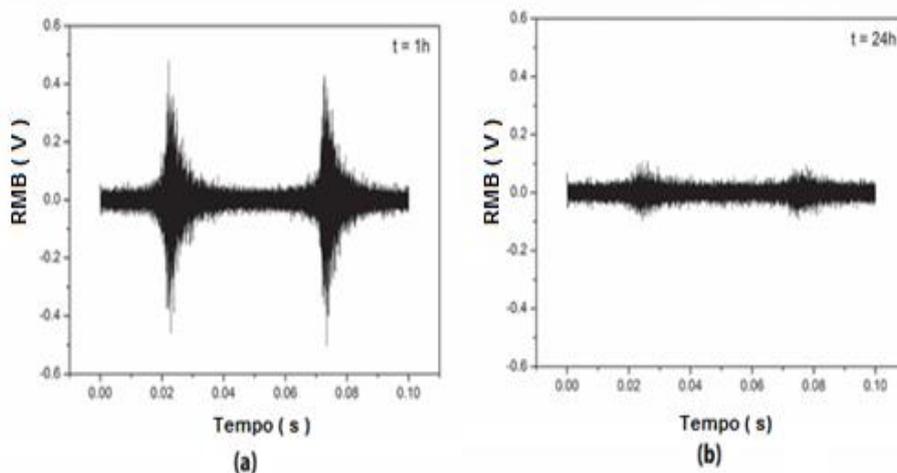
**Figura 11. Ruído de Barkhausen da amostra recebida.**



**Fonte: Adaptado : Huallpa (2016)**

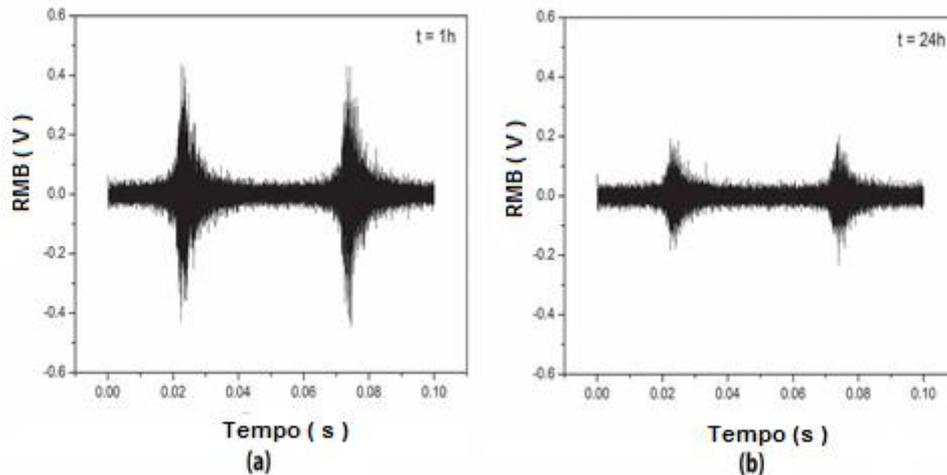
As Figuras 12 e 13 fazem um comparativo entre os picos dos RMB para as amostras que foram tratadas termicamente: a 800°C por um período de 1h e 24h (Figura 12) e a 900°C por um período de 1h e 24h (Figura 13). Os resultados das medições dos ruídos RMB observados nas Figuras de 12 a 13, para as amostras que passaram por um tratamento térmico comprovam a ocorrência da diminuição dos picos dos ruídos em função da transformação da fase ferrítica ferromagnética em fase sigma paramagnética e esta última fase ( $\sigma$ ) por ser formada a partir da ferrita se apresenta com um mais baixo nível de ferromagnetismo diminuindo assim os picos dos ruídos identificados.

**Figura 12. Ruído de Barkhausen das amostras tratadas a 800 ° C - a) 1h; b) 24h.**



**Fonte: Adaptado: Huallpa (2016)**

Figura 13. Ruído de Barkhausen das amostras tratadas a 900 ° C - a) 1h; b) 24h.

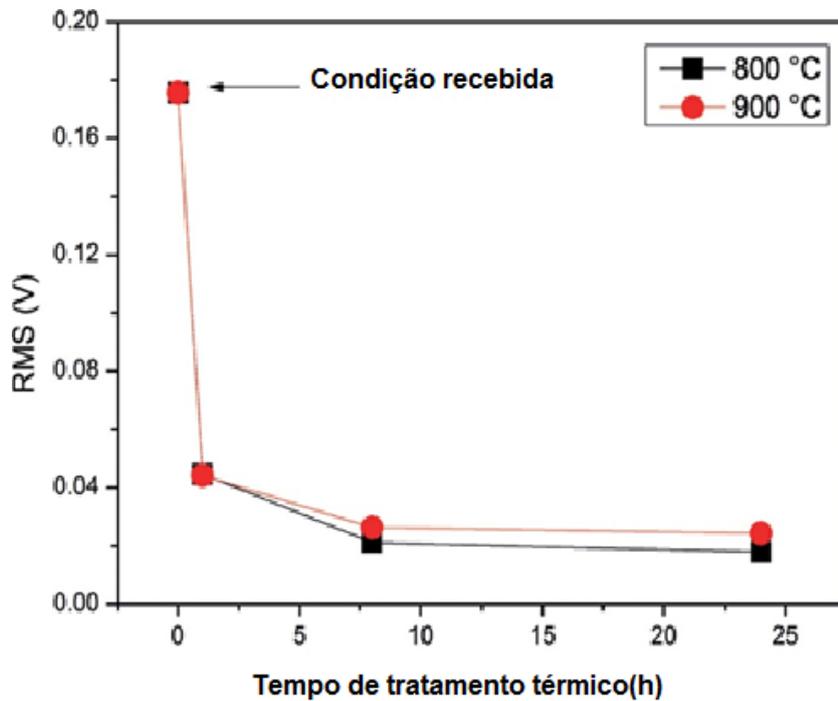


Fonte: Hualpa (2016)

Também é possível fazer um comparativo e observar, nas Figuras 12 e 13, que para temperatura de 800 °C e 24 h ocorreu uma diminuição da intensidade do sinal mais expressiva do que a 900 °C e 24 h devido a maior quantidade de fase sigma formada.

A Figura 14 mostra o comportamento dos valores RMS do RMB em função do tempo de tratamento térmico a que ficaram expostas as amostras. Pode ser observado na Figura 14 que há ocorrência da diminuição do ruído RMB e que para a temperatura de tratamento de 900°C essa diminuição é ainda mais acentuada e isso decorre da própria cinética da transformação da fase ferrítica na fase sigma (HUALLPA, 2016). Como a curva da formação da fase sigma é do tipo C e o ponto do ápice da transformação da fase sigma na curva de cinética da transformação ocorre a 850°C (MAGNOBOSCO, 2012), para um AID com a mesma especificação da usada neste estudo, (HUALLPA, 2016) concluiu que para tratamentos térmicos acima do nariz da curva de transformação ocorre uma cinética de transformação mais lenta impactando na diminuição dos picos do sinal RMB.

Figura 14. Variação da intensidade do sinal de Barkhausen Noise com o tempo durante a espera isotérmica a 800 ° C e 900 ° C.



Fonte: Adaptado Huallpa (2016)

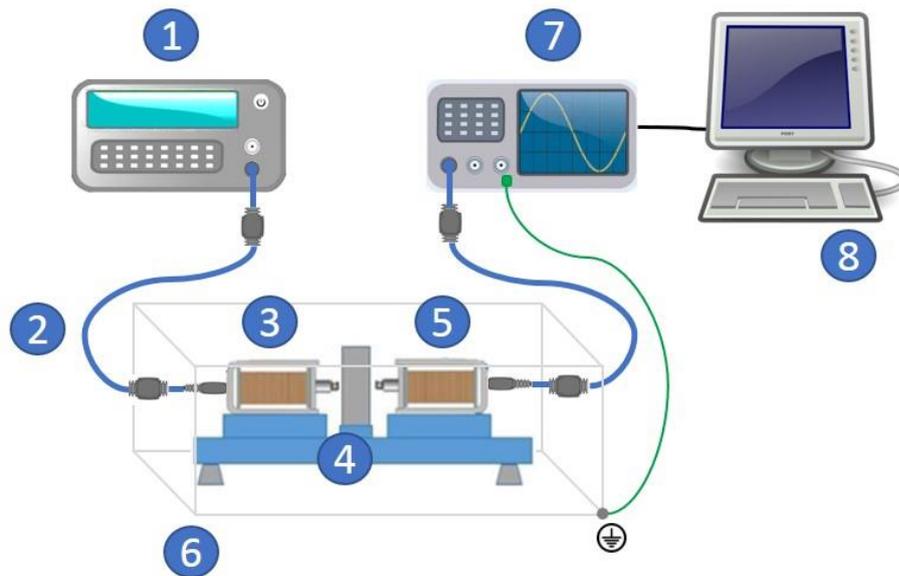
Neste estudo sobre evolução da formação da fase deletéria sigma no AID SAF2205 (DIN 1.4462 / UNS S31803) foi possível acompanhar o processo da cinética da transformação da fase sigma em amostras que passaram por tratamentos térmicos de 800°C e 900°C baseando-se nas medidas RMS do RMB através de um ensaio magnético não destrutivo e comprovar que a evolução da formação da fase sigma ao longo do tempo, se dá de forma concomitante a diminuição da intensidade do RMB. Foi comprovado, que o método utilizado é bastante eficaz na detecção de frações da fase sigma presentes na microestrutura do material (HUALLPA, 2016).

Araújo (2019) deu enfoque às características das formas de ondas triangulares e senoidais emitidas para a detecção do RMB e acompanhamento da formação de precipitados nanométricos em um aço inoxidável duplex (AID SAF 2205). Foi realizado um comparativo com o trabalho anterior de Carvalho Filho (2018), com o objetivo de mostrar quais as melhores amplitudes e frequências de trabalho para a identificação dessas microestruturas. Em seu trabalho, Araújo (2019), mostrou a melhor condição para os ensaios com ondas triangulares e senoidais operando em frequências de emissão na faixa de 5Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz e amplitudes de 1 V, 3 V, 5 V, 7 V e 9 V. Utilizou em seu ensaio amostras com precipitados que

foram obtidos por tratamentos térmicos realizados na temperatura de 475°C num processo de envelhecimento de 100h, em um aço inoxidável duplex SAF 2205, assim como também amostras sem precipitados.

A Figura 15 mostra a configuração experimental usada por Araújo (2019). Esta consiste da utilização das bobinas emissoras e receptoras posicionadas em lados opostos das amostras.

**Figura 15. 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).**



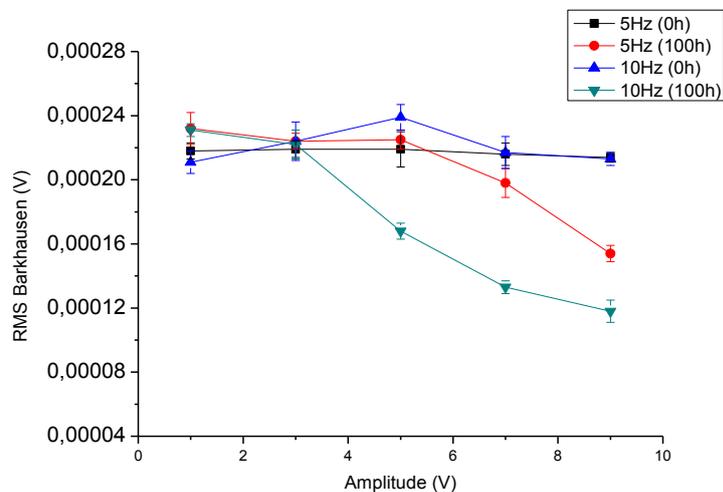
**Fonte: ARAÚJO, 2019. Modificado de LIMA (2018) e pixabay.com.**

Serão apresentados a seguir, os resultados dos ensaios obtidos por Araújo (2019) para o material sem tratamento realizadas com amostras de 24 mm de diâmetro e espessura de 8 mm. As Figuras 16 a 19 mostram os valores de RMS em função da amplitude para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz, para amostras de um aço inoxidável duplex SAF 2205 com e sem a presença de precipitados nanométricos. Estes resultados foram obtidos com uma amostra de espessura de 8 mm.

A Figura 16 mostra a variação das medidas de RMS para as ondas senoidais de 5 Hz e 10 Hz, em função das amplitudes usadas no ensaio, 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 ser possível estudar a presença dos precipitados.

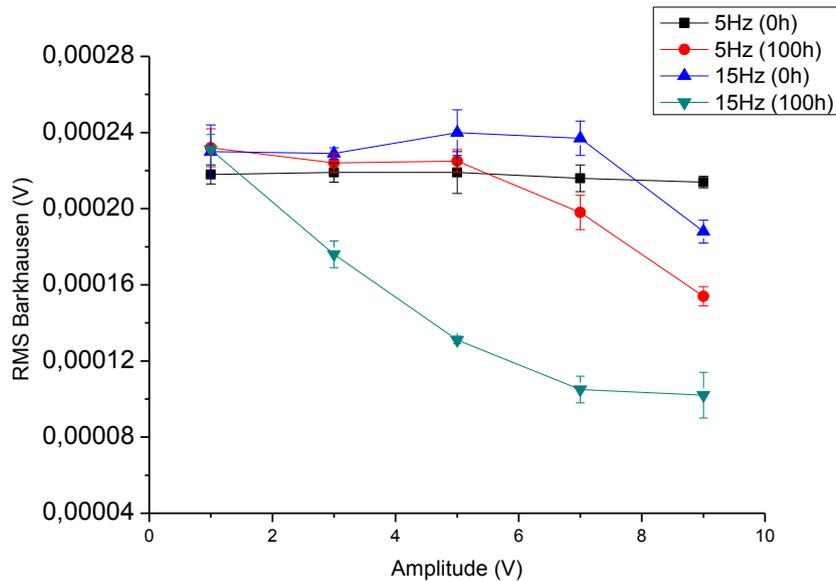
**Figura 16** Medidas do valor RMS do Ruído de Barkhausen, para amostras com e sem precipitados, em função de ondas emissoras senoidais com frequências de 5 Hz e 10Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.



Fonte: ARAÚJO, 2019

A Figura 17 mostra os resultados obtidos para a frequência de 15 Hz. Para a condição sem tratamento térmico os valores de RMS não variam até 7V 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 há precipitados. Todavia, ao analisar 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 17. 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 15Hz amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.

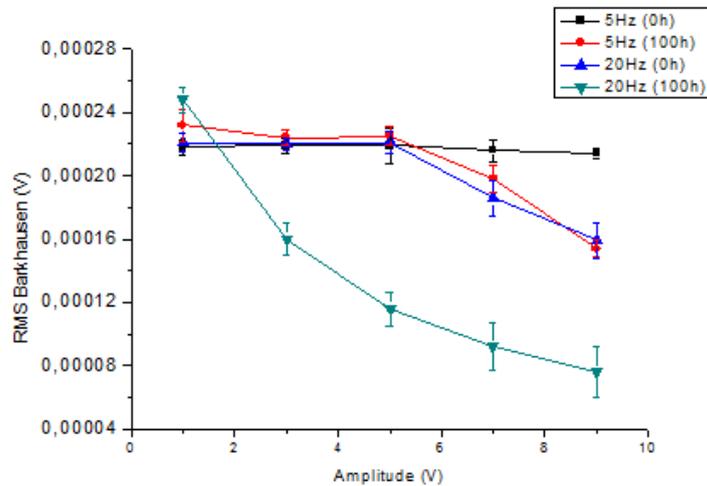


Fonte: ARAÚJO, 2019

O comportamento das ondas com frequência de 20 Hz e 25 Hz são apresentadas nas Figuras 18 e 19.

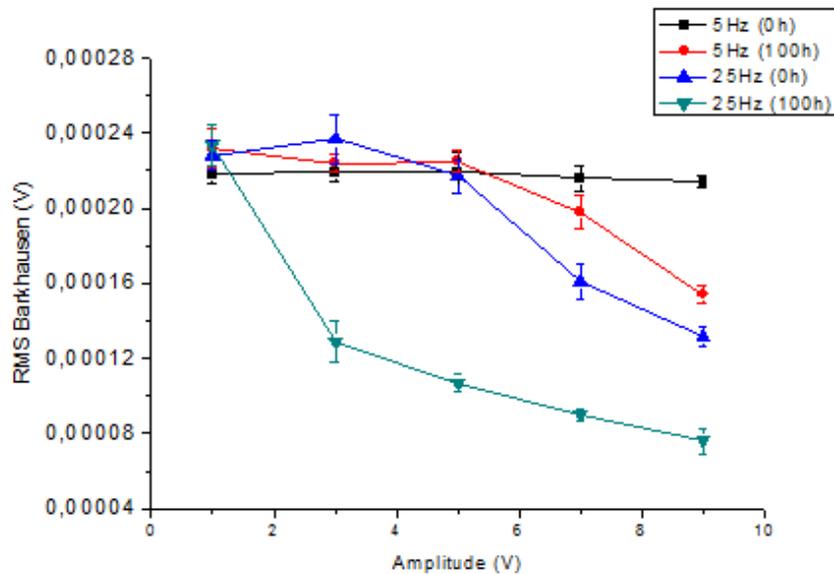
Nota-se um comportamento semelhante em relação a onda gerada a 15 Hz, sendo que, enquanto a condição sem tratamento, para a frequência de 15 Hz, tem seus valores de RMS reduzidos a partir da amplitude de 7 V, as de 20 Hz e 25Hz reduzem com 5 V e 3 V, respectivamente. Este comportamento está associado ao aumento de frequência varrer um volume maior do material e ser percebida a contribuição da fase austenita em reduzir os valores de RMS.

Figura 18. 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 20Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.



Fonte: ARAÚJO, 2019

Figura 19. 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 25Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.



Fonte: ARAÚJO, 2019

Em seu estudo, Araújo (2019) identificou que os dois tipos de ondas analisadas, senoidal e triangular, foram eficazes para identificação da formação de precipitados fragilizantes e que as maiores amplitudes medidas do sinal RMB em valores RMS foram captados com a utilização de uma onda de frequência de 15Hz e amplitude de 7V.

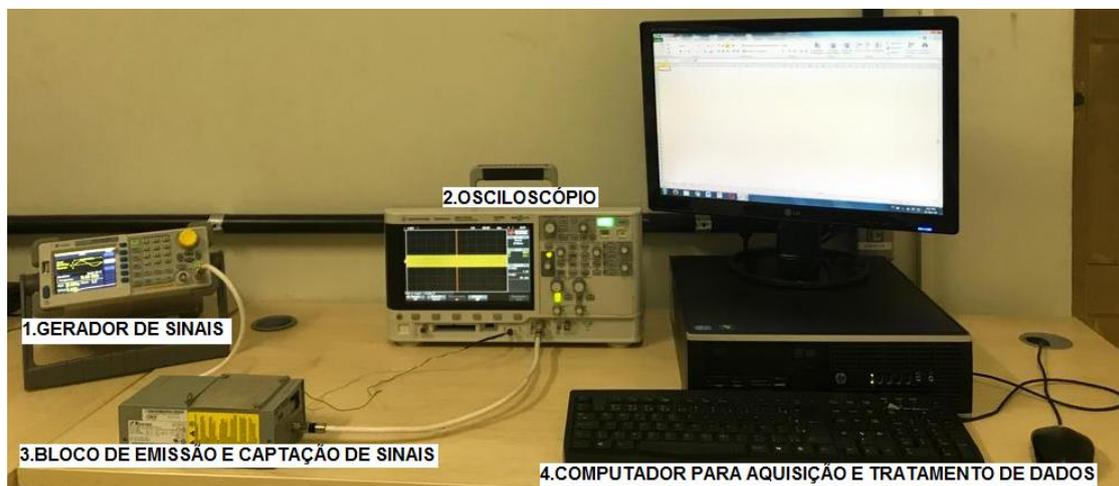
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho estuda a aplicação de ondas senoidais em uma bobina emissora, para detecção da formação da fase sigma em um aço inoxidável duplex, através da análise do ruído de Barkhausen, com amostras circulares de diferentes espessuras.

#### 3.1 BANCADA EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento experimental foi utilizada uma bancada composta por uma bobina emissora e uma receptora posicionada em superfícies opostas de uma amostra. Tanto a bobina emissora quanto a receptora se apresentam com características físicas idênticas a apresentada por Carvalho Filho (2018), e possuem um comprimento 19,5 mm, com 6000 espiras de fios de cobre esmaltado nº 38 envolvidas sobre um núcleo de aço AISI 4140. Cabos blindados fazem parte do dispositivo para minimizar a influência de sinais externos que gerem ruídos ao sistema de emissão e aquisição dos sinais. Uma configuração da bancada experimental para a emissão, captação e processamento do sinal está representado na Figura 20.

**Figura 20. Bancada experimental: gerador de sinais (1); osciloscópio (2); bloco de emissão e captação de sinais (3); computador para aquisição e tratamento de dados (4).**



Fonte: Autor

A bancada experimental (Figura 20) contém um gerador de sinais ou de funções, de marca Minipa modelo MFG- 4205B/5MHz conectado a uma bobina emissora cuja função é gerar um campo magnético que atravesse o material da amostra de aço em estudo. Após a seleção do formato da onda no gerador de sinais,

o mesmo transmite para a bobina emissora uma onda do formato escolhido. A bobina receptora está associada a um osciloscópio (marca Agilent Technologies modelo DSO-X 2012A). Na configuração da bancada de medições também se encontra um computador que foi utilizado para a aquisição e tratamento dos dados referentes aos sinais medidos.

A Figura 21 mostra o detalhe do interior do bloco que contém as bobinas de emissão e recepção do sinal e como se dão as suas conexões ao gerador de sinais e ao osciloscópio através de cabos blindados. A Figura 21, também permite a visualização da disposição destas bobinas em superfícies opostas entre si com a presença da amostra posicionada entre elas.

**Figura 21. Bloco de emissão e recepção do sinal – detalhe interior. Bobina emissora do sinal (1); bobina receptora do sinal (2); amostra do material (3); carcaça do bloco com aterramento (4); amostra do material em geometria circular (5).**



Fonte: Autor

### **3.2 O MATERIAL**

Para a realização do ensaio foram utilizadas amostras de um aço inoxidável duplex SAF 2205 (UNS S31803), pertencentes ao Grupo de Simulação de Comportamento dos Materiais IFPB (GSCMat), tendo em vista que os ensaios realizados neste ambiente utiliza deste tipo de material para o desenvolvimento de técnicas relacionados a END eletromagnéticos.

Neste estudo foram utilizados dois diferentes tipos de amostras AID SAF 2205: um tipo que não passou por tratamento térmico e que foi usada como recebida, ou seja, não apresentava o precipitado fragilizante ao material, a fase sigma; E um segundo tipo de amostra que foi tratada na temperatura de 850 °C com tempo de tratamento de 15 minutos, tempo suficiente para produzir na estrutura do material 5% de concentração da fase sigma o que é suficiente para levar a fragilização de um AID. Os dois tipos de amostras ensaiadas possuem seção transversal em formato circular com diâmetro 24mm e espessuras de 4mm e 8 mm.

### **3.3 ENSAIO ELETROMAGNÉTICO**

Ondas emissoras de formatos senoidais com frequências de 5Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz e amplitudes de 1 V, 3 V, 5 V, 7 V e 9 V foram aplicadas em amostras sem precipitado e em amostras com 15 minutos de tratamento. O tratamento de envelhecimento de 15 minutos na temperatura de 850 °C foi escolhido para corresponder a formação de 5 % de fase sigma. Quantidade esta, suficiente para a fragilização do aço inoxidável duplex SAF 2205.

Os sinais foram captados dez vezes em cada amplitude aplicada na frequência selecionada com um tempo de aquisição de 2s de intermitência entre as medidas amostradas em 20.000 pontos com a intenção de prover a melhor confiabilidade possível dos resultados, sendo esse procedimento realizado em amostras com e sem tratamento térmico. De posse dos valores medidos e com estes, foi feita a FFT através de um programa específico que permite selecionar e aplicar um filtro, neste caso, um passa-altas de 3kHz e na etapa seguinte obteve-se os valores médios RMS do sinal e foi utilizado um intervalo de confiança de 95%, para cada frequência utilizada e a faixa de amplitude em que foi aplicada. A partir desta etapa, com os valores médios RMS do sinal e os respectivos intervalos de confianças especificados, foi feita a

construção gráfica quantitativa e análise dos dados em relação as características do sinal e a sua correlação com as propriedades mecânicas do material. A Tabela 2 apresenta o resumo da metodologia empregada.

**Tabela 2. Resumo da Metodologia Empregada.**

Tipo de onda	Senoidal
Frequências	5 Hz, 15 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz
Amplitudes	1 V, 3 V, 5 V, 7 V e 9 V
Material	Aço Inoxidável Duplex
Amostras	Como recebidas e tratadas a 850 °c por 15 minutos.
Determinação das características da melhor onda	<ul style="list-style-type: none"> <li>• amostras sem precipitados e tratadas a 850 °C por 15 min.</li> <li>• amostras com diâmetro de 24 mm e espessuras de 4 e 8 mm.</li> </ul>

**Fonte: Autor**

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

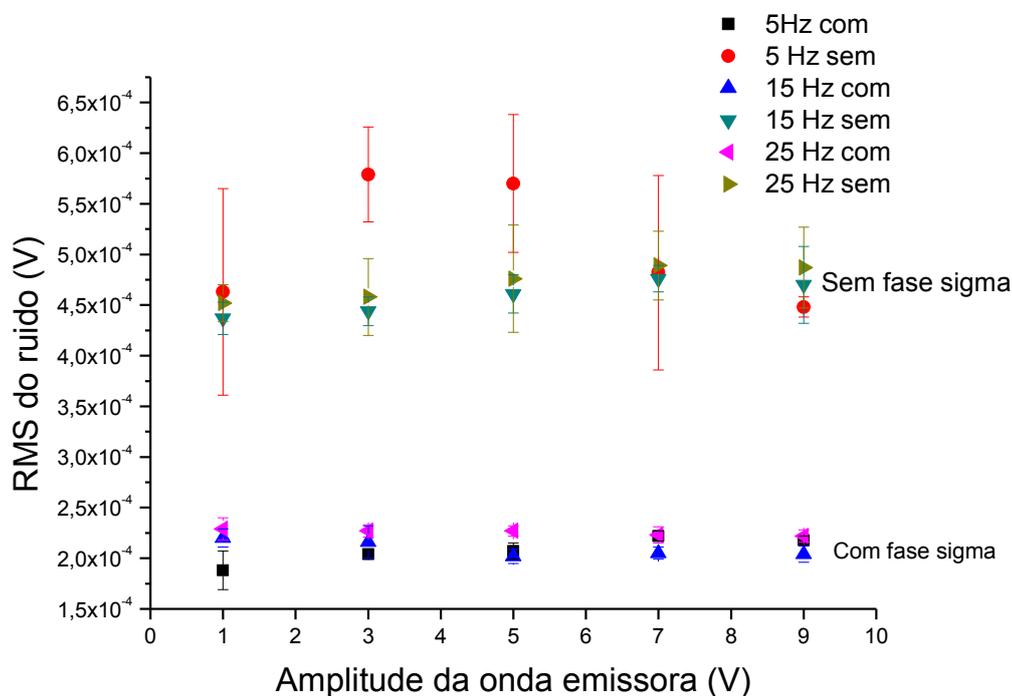
O presente trabalho mostra a capacidade da aplicação de onda emissora senoidal, para geração do ruído de Barkhausen, com amostras circulares de espessuras de 4 mm e 8 mm, em um ensaio eletromagnético com bobina receptora posicionada na superfície oposta da emissora. Neste, são apresentadas as condições de amplitude e frequências das ondas emissoras para realização do ensaio.

### 4.1 ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA DE 8 mm

A Figura 22 mostra a variação do RMS do ruído gerado na bobina receptora, em função das amplitudes 1 V, 3 V, 5 V, 7 V e 9V e frequências 5 Hz, 15 Hz e 25 Hz das ondas aplicadas na bobina emissora. Os valores de RMS para as amostras com a presença da fase sigma mostram poucas variações para as frequências e amplitudes estudadas. Contudo, para a condição sem precipitação têm-se valores semelhantes para as frequências de 15 Hz e 25 Hz, sendo que a frequência de 5 Hz apresentou maior dispersão nos resultados para amplitudes até 7 V. Os valores de RMS para as frequências de 5 Hz, 15 Hz e 25 Hz, para as duas situações estudadas na Figura 22 mostram ser independentes da amplitude e apresentam duas regiões nitidamente distintas.

Os resultados obtidos com a presença da fase sigma na Figura 22 apresentam valores de RMS inferiores. Essa fase é paramagnética e se forma a partir da decomposição da fase ferromagnética ferrita, reduzindo a permeabilidade magnética do material e os valores de RMS (DE MACEDO SILVA, 2009). Todavia, esta nova fase serve como pontos de ancoragens para o movimento das paredes dos domínios magnéticos e a redução dos valores de RMS também pode estar associada ao fato da intensidade de fluxo magnético aplicado não ser suficiente para vencer este efeito (DE MACEDO SILVA, 2016).

**Figura 22. Variação dos valores RMS do ruído na bobina receptora em função da frequência e amplitude da onda aplicada na bobina emissora. Amostras com 8 mm de espessura.**



Fonte: Autor

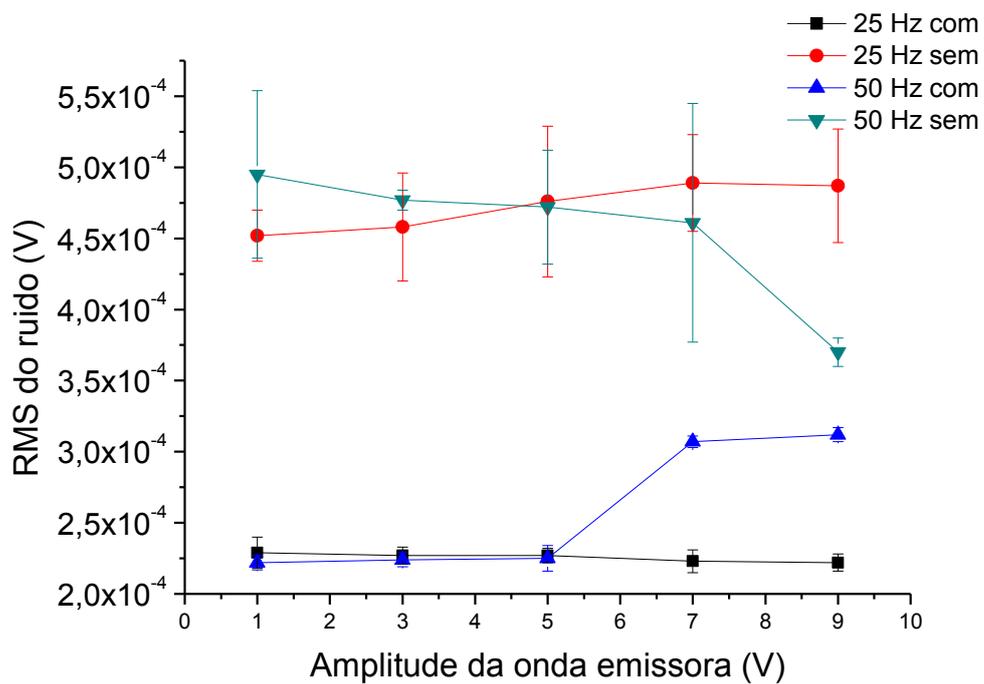
Nas Figuras 23 a 25 tem-se um estudo da aplicação de ondas com frequências de 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz, para os mesmos valores de amplitudes aplicados na Figura 22, de modo a analisar o efeito do aumento da frequência.

A Figura 23 mostra os valores de RMS obtidos da aplicação de ondas com frequências de 25 Hz e 50 Hz, para as amostras com e sem precipitado. Observa-se na Figura 23 que para a frequência de 25 Hz as duas condições apresentam valores de RMS praticamente paralelos, considerando a faixa de dispersão dos resultados. Entretanto, para 50 Hz nota-se uma redução nos valores de RMS para a condição sem fase sigma, sendo essa acentuada para 9 V. A condição com a nova fase mantém valores praticamente constantes para amplitudes de 1 V, 3 V e 5 V e aumenta os valores de RMS para amplitudes de 7 V e 9 V.

Na condição sem precipitado e aplicação de ondas de 50 Hz na Figura 23 indica que um aumento na densidade de fluxo magnético parece aumentar a possibilidade de maior detecção da fase paramagnética austenita reduzindo os

valores de RMS da amostra sem fase sigma. Contudo, a presença de precipitados de fase sigma, na outra amostra, parece ter o efeito de dificultar o movimento das paredes dos domínios magnéticos e gerar ruído magnético de Barkhausen suficiente para sobrepor a redução dos valores de RMS produzido pelo efeito do paramagnetismo e aumentar assim as medidas de RMS.

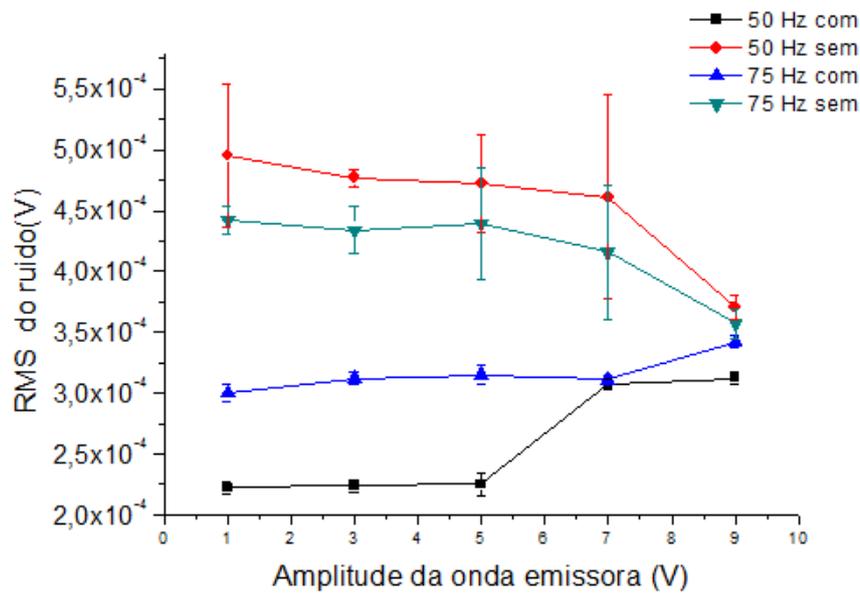
**Figura 23. Variação do RMS do sinal na bobina receptora, em função da amplitude da onda na bobina emissora, para as frequências de 25 Hz e 50 Hz em amostras com e sem a formação da fase sigma. Amostras com 8 mm de espessura.**



Fonte: Autor

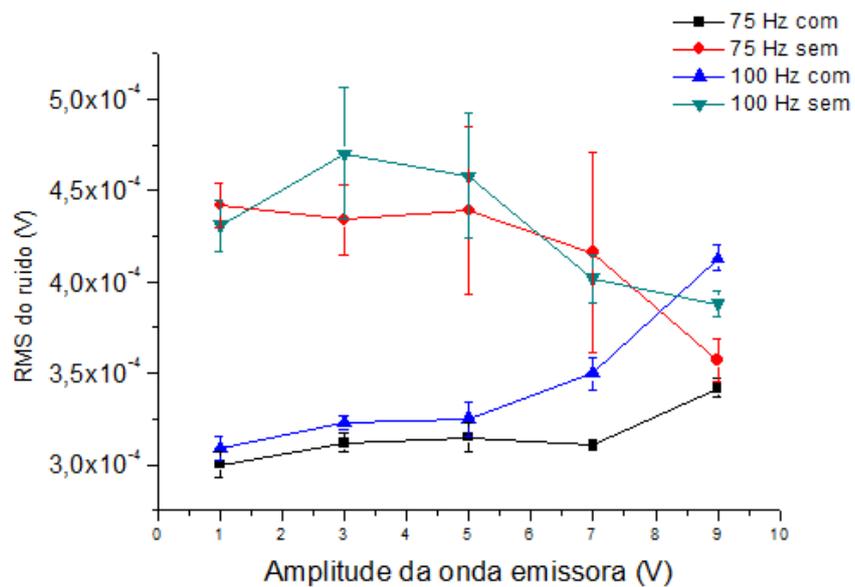
As medidas RMS dos ruídos para as ondas de frequências de 50 Hz e 75 Hz são apresentadas na Figura 24 e para as de 75 Hz e 100 Hz na Figura 25. As Figuras 24 e 25 mostram que com o aumento das frequências os resultados dos RMS com e sem precipitados se aproximam mais uma da outra e para frequência de 100 Hz e 9 V temos a inversão das curvas. Isto indica que o efeito do aumento do ruído de Barkhausen passa a superar ao do paramagnetismo. O aumento da frequência faz com que a interação entre os pontos de ancoragem (fase sigma) e as paredes dos domínios magnéticos gere uma quantidade maior de ruído, enquanto que para amostras sem essa fase leva a uma maior detecção das ilhas paramagnéticas de austenita.

**Figura 24. Medidas RMS do ruído na bobina receptora em função das amplitudes das ondas emissoras, para as frequências de 50 Hz e 75 Hz, para amostras com e sem a formação da fase sigma. Amostras com 8 mm de espessura.**



Fonte: Autor

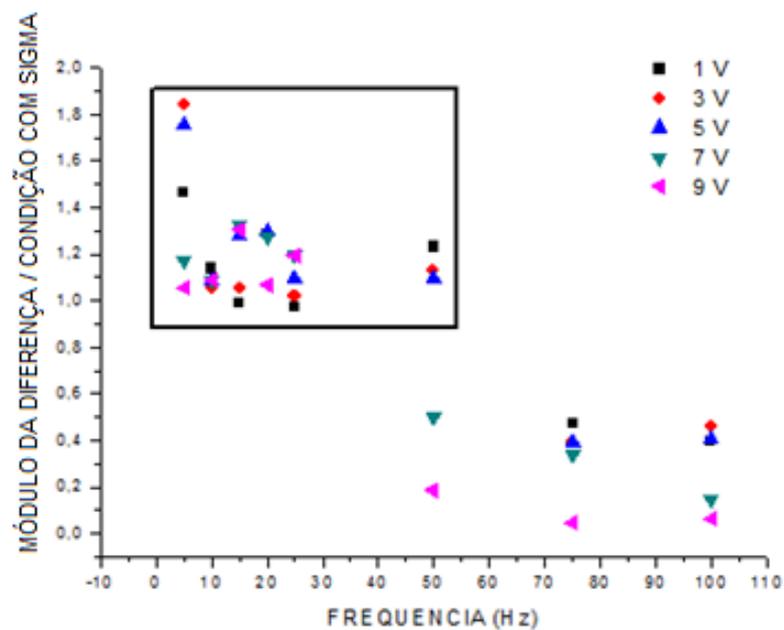
**Figura 25. Medidas RMS do ruído na bobina receptora em função das amplitudes das ondas emissoras, para as frequências de 75 Hz e 100 Hz, para amostras com e sem a formação da fase sigma. Amostras com 8 mm de espessura.**



Fonte: Autor

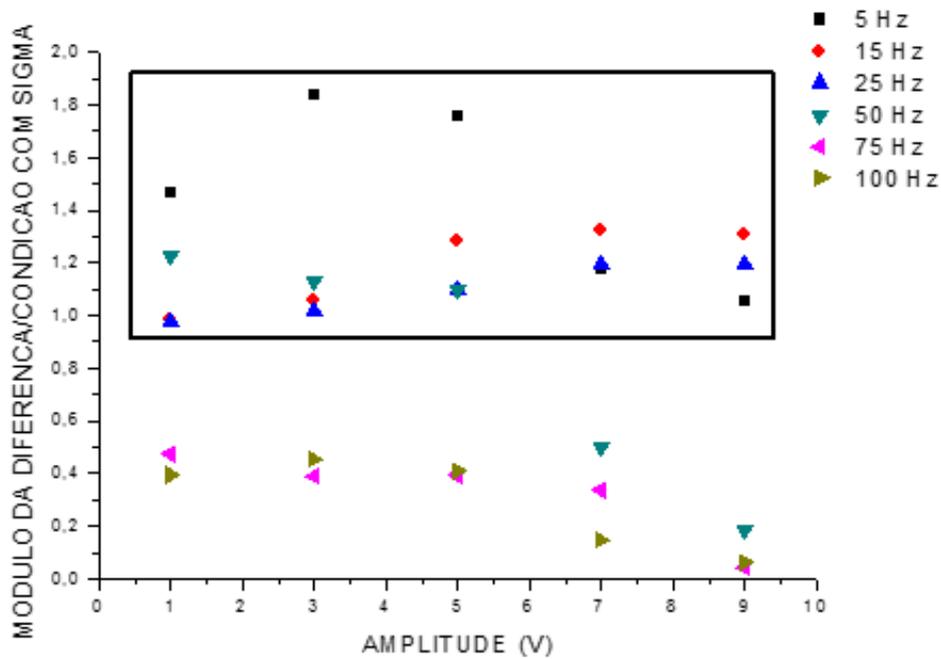
De modo a determinar as melhores características da onda emissora para detecção da fase sigma, a razão entre o módulo da diferença entre os resultados das amostras com e sem fase sigma pelos obtidos com a fase sigma ( $RMS_{com} - RMS_{sem} / (RMS_{com})$ ) é apresentado em função da frequência e amplitude das ondas emisoras, nas Figuras 26 e 27, respectivamente. Nota-se nessas Figuras, que ondas emisoras com frequências até 25 Hz apresentam, para todas as amplitudes, variações acima de 95 % das medidas em relação à condição com fase sigma. Além disso, resultados nesta região, também podem ser obtidos com ondas de 50 Hz e amplitudes de 1 V, 3 V e 5 V. As regiões consideradas de melhores resultados estão destacadas dentro dos retângulos.

**Figura 26. Medidas da razão entre o módulo da diferença e o valor de RMS da amostra com fase sigma, em função das frequências das ondas emisoras para as amplitudes de 1 V a 9 V. Amostras com 8 mm de espessura.**



Fonte: Autor

**Figura 27. Medidas da razão entre o módulo da diferença e o valor de RMS da amostra com fase sigma, em função das amplitudes das ondas emissoras, para frequências de 5 Hz, 15 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz. Amostras com 8 mm de espessura.**



Fonte: Autor

#### 4.2 ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA DE 4 mm

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para o material com e sem a fase sigma, para amostras com espessuras de 4 mm.

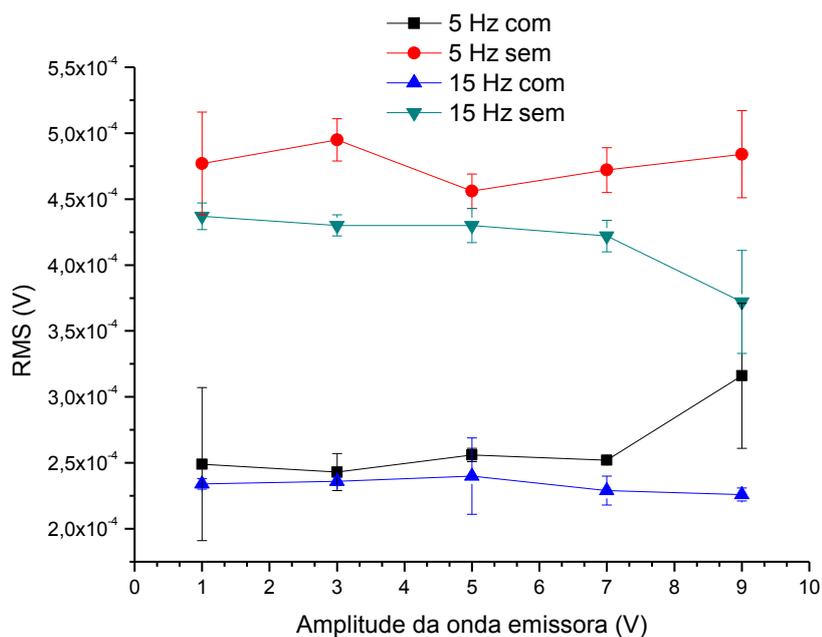
As Figuras 28 a 31 mostram a variação dos valores de RMS ao serem aplicadas ondas senoidais na bobina emissora com frequências de 5Hz, 15 Hz, 25Hz, 75Hz e 100Hz e amplitudes de 1 V, 3 V, 5 V, 7 V e 9 V para amostras circulares de AID SAF 2205 com 24mm de diâmetro e 4mm de espessura, com e sem a fase sigma.

A Figura 28 mostra a variação de RMS em função da amplitude da onda emissora para frequências aplicadas de 5 Hz e 15 Hz. Nota-se que a de 5 Hz tem um comportamento praticamente independente da amplitude aplicada para condição sem precipitado. Esta tendência também é observada para a condição com a fase sigma, apesar do aumento ocorrido para aplicação da amplitude de 9 V. As medidas

realizadas na amostra com precipitados, mostram a redução devido ao paramagnetismo da nova fase formada.

As medidas realizadas para 15 Hz apresentam uma tendência de redução nos valores de RMS com o aumento da amplitude para amostras sem a fase sigma, enquanto que na condição com precipitado, o comportamento continua independente da amplitude. A redução nos resultados nas amostras sem precipitado pode estar associada ao aumento da frequência levar o fluxo magnético perceber a presença da fase paramagnética austenita desse aço. Contudo, para a condição sem precipitado indica haver um equilíbrio entre o efeito paramagnético das fases com o aumento de RMS devido ao aumento da frequência gerar uma quantidade maior de Ruído Magnético de Barkhausen.

**Figura 28. Medidas RMS do ruído na bobina receptora em função das amplitudes das ondas emissoras, para as frequências de 5 Hz e 15 Hz, para amostras com e sem a formação da fase sigma. Amostras com 4 mm de espessura.**

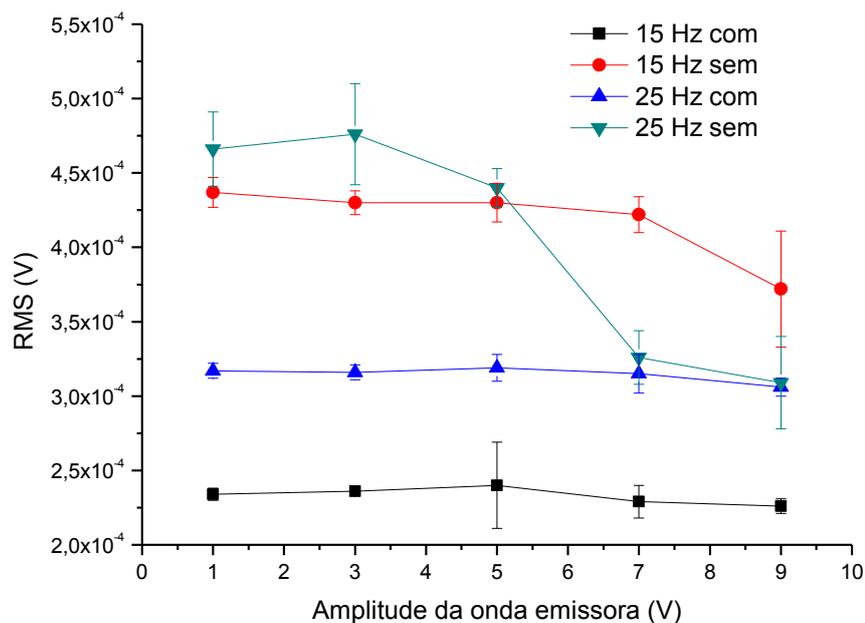


**Fonte: Autor**

Afim de melhor entender a influência do aumento das frequências, o estudo do aumento destas é apresentado comparando as frequências 15 Hz com 25 Hz, 25 Hz e 75 Hz, bem como a de 75 Hz com a de 100 Hz nas Figuras 29, 30 e 31, respectivamente. A Figura 29 mostra que a aplicação da frequência de 25 Hz na amostra sem precipitado mantém valores de RMS constantes até 3 V e esses

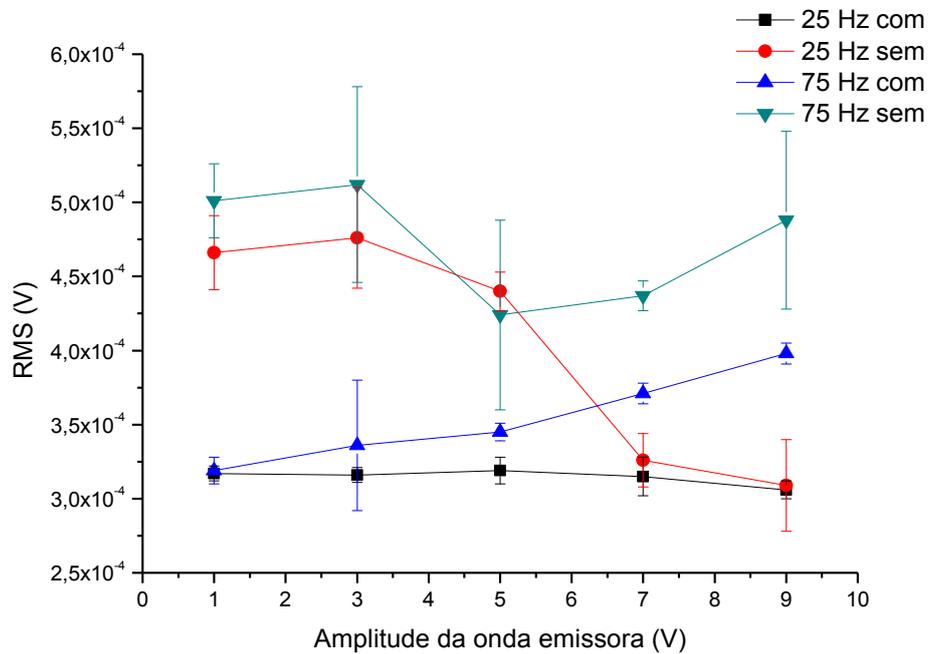
começam a cair a partir de 5 V. A condição com precipitado não apresentou variação sensível para 25 Hz. Porém, o aumento para frequência da onda emissora de 75 Hz, na Figura 30, apresenta uma queda nas medidas de RMS, para a condição sem precipitado, para a amplitude de 5 V, seguido de um aumento para valores de 7 V e 9 V. Isto indica que o efeito da presença do Ruído magnético de Barkhausen passa a superar o do paramagnetismo e tem-se um aumento nas medidas. Todavia, para a situação com a fase deletéria, a aplicação da frequência de 75 Hz leva somente a aumento dos valores de RMS indicando a superação do efeito do ruído sobre o paramagnetismo.

**Figura 29. Medidas RMS do ruído na bobina receptora em função das amplitudes das ondas emissoras, para as frequências de 15 Hz e 25 Hz, para amostras com e sem a formação da fase sigma. Amostras com 4mm de espessura.**



Fonte: Autor

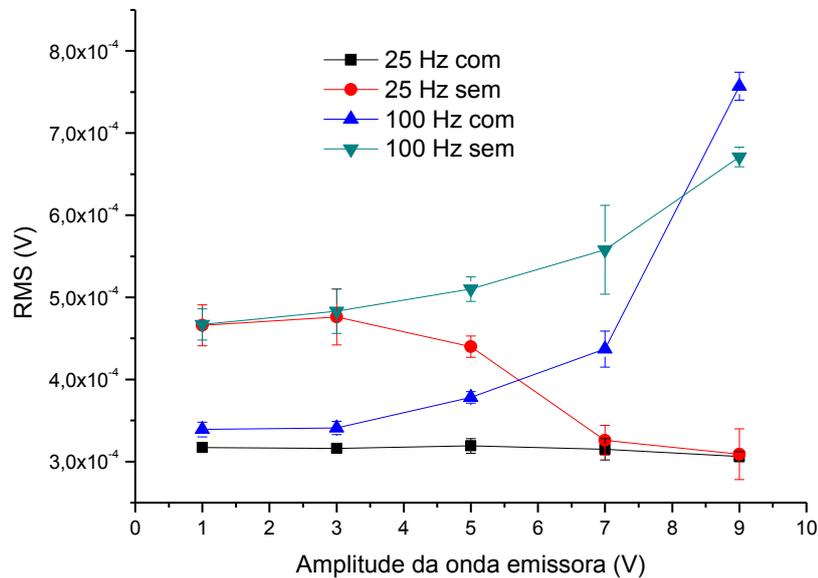
**Figura 30. Medidas RMS do ruído na bobina receptora em função das amplitudes das ondas emissoras, para as frequências de 25 Hz e 75 Hz, para amostras com e sem a formação da fase sigma. Amostras com 4 mm de espessura.**



**Fonte: Autor**

Na Figura 31 tem-se o efeito da frequência de 100 Hz. Nesta nota-se o aumento dos valores de RMS tanto para a condição sem precipitação da fase sigma quanto para com a presença dessa fase deletéria. Observa-se que o efeito do ruído supera o do paramagnetismo nas duas condições.

**Figura 31. Medidas RMS do ruído na bobina receptora em função das amplitudes das ondas emissoras, para as frequências de 25 Hz e 100 Hz, para amostras com e sem a formação da fase sigma. Amostras com 4 mm de espessura.**

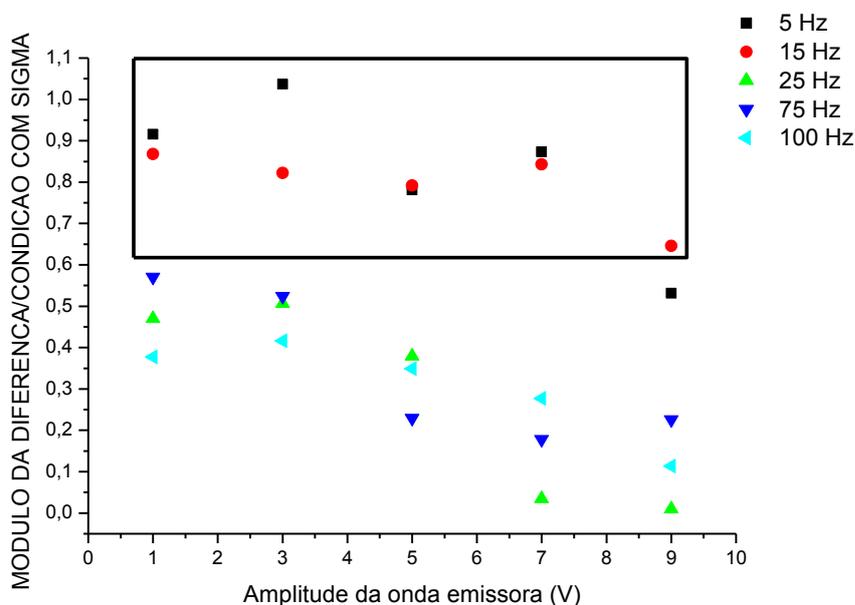


**Fonte: Autor**

De modo a determinarmos as condições para estudo da formação da fase sigma nos aços inoxidáveis duplex, com a aplicação da onda senoidal, será apresentado na Figura 32 o estudo da razão entre a variação do módulo da diferença entre as duas condições e a presença da fase sigma, em função das amplitudes estudadas. Nota-se que a aplicação de ondas com frequências de 5 Hz e 15 Hz apresentam razões acima de 60 %. O uso destas frequências resulta no trabalho na região em que o efeito do paramagnetismo supera ao do ruído de Barkhausen. Esta região vai até frequências de 25 Hz com amplitudes de 5 V, em que temos uma amplitude de medida acima de 45 %. Contudo, ensaios por correntes parasitas conseguem detectar a presença de 5 % de fase sigma com variação de medidas de impedâncias de 33 % em relação à condição sem fase sigma (NORMANDO, 2010). Em um comparativo, os percentuais das variações das medidas realizadas com a técnica que utiliza correntes parasitas para a detecção da fase sigma, a nova técnica utilizada neste trabalho, que usa a bobina receptora situada na superfície oposta da bobina emissora, mostra-se mais eficaz na detecção da fase deletéria sigma por ter amplitude de medida de 60 % em relação ao de 33 % obtido por corrente parasitas.

Isto indica que o uso de ondas nessa região pode ser utilizado para monitoramento de estruturas de aços inoxidáveis.

**Figura 32. Medidas da razão entre o módulo da diferença e o valor de RMS da amostra com fase sigma, em função das amplitudes das ondas emissoras, para frequências de 5 Hz, 15 Hz, 25 Hz, 75 Hz e 100 Hz. Amostras com 4 mm de espessura.**



Fonte: Autor

O presente trabalho fez um estudo do efeito do uso de ondas senoidais para detecção da fase sigma em um aço inoxidável duplex SAF 2205 com espessuras de 4 mm e 8 mm. Observa-se que a redução da espessura resulta no uso de frequências de valores menores, ou seja, a utilização de ondas de menores energias. Considerando uma amplitude de medidas acima de 60 %, espessuras de 8 mm podem ser inspecionadas com frequências até 50 Hz e amplitudes de 1 V, 3 V e 5 V, sendo possível o uso de todas as amplitudes estudadas, para as frequências inferiores. Todavia, para espessuras de 4 mm recomenda-se para a mesma amplitude de medida, a utilização de ondas com frequências de 5 Hz e 15 Hz e as amplitudes de onda até 9 V.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo do uso de ondas senoidais para detecção da fase sigma em um aço inoxidável duplex, com uso de bobinas posicionadas em superfícies opostas. As seguintes conclusões foram obtidas:

- A aplicação de ondas senoidais no ensaio com bobinas posicionadas em superfícies opostas foi capaz de detectar a presença da fase deletéria sigma.
- Amostras com 8mm de espessuras apresentaram valores de RMS praticamente independentes da amplitude da onda emissora para frequências até 25 Hz, tanto para a condição com a precipitação da fase sigma como sem a fase sigma.
- Os valores de RMS para frequências até 25 Hz apresentaram valores da condição sem precipitado superiores aos de com a fase sigma. Isto indica que o efeito do paramagnetismo supera o efeito do ruído de Barkhausen para esta faixa de frequência.
- O aumento da frequência acima de 25 Hz, para mostras com 8mm de espessura, resulta na redução dos valores de RMS das amostras sem precipitados e aumento das com precipitados. Enquanto nas primeiras tem-se o efeito do paramagnetismo, no segundo o ruído supera esse. Comportamento semelhante foi observado em amostras com 4mm, sendo que para valores de frequências menores.
- Considerando a amplitude de medida como a razão entre o módulo da diferença pela medida do RMS da condição com fase sigma, diferenças acima de 60 % foram obtidas com frequências de 5 Hz e 15 Hz, para as amplitudes estudadas, ao serem aplicadas em amostras de 4mm.
- Medidas com amplitudes de medidas acima de 60 %, para amostras com 8 mm de espessura, podem ser realizadas com frequências até 50 Hz e amplitudes de 1V, 3 V e 5 V. Frequências inferiores a essa podem utilizar todas as amplitudes estudadas.
- Amplitudes de medidas acima de 95 %, para amostras com 4mm de espessuras, foram possíveis apenas para ondas com frequência de 5 Hz e amplitudes de 1 V e 3 V. Isto indica a necessidade de se trabalhar com menores valores de frequência à medida que se reduz a espessura.

## 6. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

- Ampliar o estudo para um número maior de espessuras, bem como para amostras com quantidades diferentes de fase sigma, de modo a poder acompanhar a formação desta fase.
- Aplicar o estudo para outros tipos de aços com a formação da mesma fase, como por exemplo, o aço inoxidável superduplex, que possui uma maior cinética de formação de fases deletérias.
- Fazer um estudo da aplicação de filtros, de modo a melhor caracterizar o ruído gerado.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, A. L. S. S. **Ensaio eletromagnético não destrutivo para detecção de anisotropia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba (IFPB) – João Pessoa, Paraíba, 73f, 2016.

ARAÚJO, B.R. **Caracterização da onda emissora para geração do efeito de Barkhausen para detecção de precipitados nanométricos em um ensaio eletromagnético**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba (IFPB) – João Pessoa, Paraíba, 67f, 2019.

CALDAS-MORGAN, M.; PADOVESE, Linilson Rodrigues. Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational Barkhausen method. **Ndt & E International**, v. 45, n. 1, p. 148-155, 2012.

CARVALHO FILHO, J.A. **Ensaio eletromagnético baseado no ruído de Barkhausen para acompanhamento de transformações microestruturais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba (IFPB) – João Pessoa, Paraíba, 61f, 2018.

CHIKAZUMI, S. **Physics of Magnetism**, 2 ed. New Yor: John Wiley & Sons, Inc, 1996.

CHUKWUCHEKWA, N. **Investigation of Magnetic Properties and Barkhausen Noise of Electrical Steel**. PhD Thesis - Cardiff University – Wales, Kingdom, 194f, 2011.

CULLITY, Bernard Dennis; GRAHAM, Chad D. **Introduction to magnetic materials**. John Wiley & Sons, 2011.

DE MACEDO SILVA, Edgard et al. Phase transformations evaluation on a UNS S31803 duplex stainless steel based on nondestructive testing. **Materials Science and Engineering: A**, v. 516, n. 1-2, p. 126-130, 2009.

DE MACEDO SILVA, Edgard et al. Induced magnetic field used to detect the sigma phase of a 2205 duplex stainless steel. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 35, n. 2, p. 28, 2016.

FIALHO, W.M.L. **Ensaio não destrutivo baseado em medidas de campo magnético para acompanhamento da formação da fase sigma em um aço inoxidável**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal da Paraíba (UFPB) – João Pessoa, 128f, 2015.

FRANCO, F.A. **Desenvolvimento De Ensaio Não Destrutivo Baseado No Ruído Magnético de Barkhausen Para Caracterização de Tensões Elásticas E Deformações Plásticas Em Aços**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo (USP) – São Paulo, 161f, 2010.

GHANEI, Sadegh 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.

GHOSH, S. K.; MONDAL, S. High temperature ageing behaviour of a duplex stainless steel. **Materials Characterization**, v. 59, n. 12, p. 1776-1783, 2008.

HE, Youliang et al. Through-process characterization of local anisotropy of non-oriented electrical steel using magnetic Barkhausen noise. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 453, p. 149-162, 2018.

HUALLPA, Edgar Apaza et al. Use of Magnetic Barkhausen Noise (MBN) to Follow Up the Formation of Sigma Phase in Saf2205 (UNS S31803) Duplex Stainless Steel. **Materials Research**, v. 19, n. 5, p. 1008-1016, 2016.

JILES, David C. Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect. **Czechoslovak journal of physics**, v.50, p. 893-924, 2000.

KAHROBAEE, Saeed; HEJAZI, Taha-Hosseini. 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.

KRAUSE, Thomas W.; CLAPHAM, L.; ATHERTON, David L. Characterization of the magnetic easy axis in pipeline steel using magnetic Barkhausen noise. **Journal of applied physics**, v. 75, n. 12, p. 7983-7988, 1994.

KRAUSE, Thomas W.; MAKAR, J. M.; ATHERTON, D. L. Investigation of the magnetic field and stress dependence of 180 domain wall motion in pipeline steel using magnetic Barkhausen noise. **Journal of magnetism and magnetic materials**, v. 137, n. 1-2, p. 25-34, 1994.

MAGNOBOSCO, Rodrigo; ÁVILA, Camila Carioni; RABECHINI, Fernando Maraccini. Influência do trabalho a frio na formação de fase sigma em aço inoxidável duplex. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 9, n. 3, p. 190, 2012.

MARTÍNEZ-ORTIZ, P. et al. Influence of the maximum applied magnetic field on the angular dependence of Magnetic Barkhausen Noise in API5L steels. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 401, p. 108-115, 2016.

NORMANDO, Paulo G. et al. Ultrasound, eddy current and magnetic Barkhausen noise as tools for sigma phase detection on a UNS S31803 duplex stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, n. 12, p. 2886-2891, 2010.

SAMIMI, Arash A.; KRAUSE, Thomas W; CLAPHAM, Lynann. Multi-parameter evaluation of magnetic Barkhausen noise in carbon steel. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 35, n. 3, p. 40, 2016.

SERNA GIRALDO, C. P. **Avaliação de Juntas Soldadas de Aços Carbono Através do Ruído Magnético de Barkhausen**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) – São Paulo, 140f,2007.

SERNA-GIRALDO, Claudia P.; PADOVESE, Linilson R. Evaluation of carbon steel welded plates with Magnetic Barkhausen Noise. **Soldagem & Inspeção**, v. 15, n. 4, p. 273-280, 2010.

TEST SYSTEMS, c2019. Disponível em: < <https://test-systems.es/noticias/analisis-del-ruído-magnético-de-barkhausen> >. Acesso em: 16 de abr. de 2019 às 14:30.

WHITE, Steven; KRAUSE, Thomas; CLAPHAM, Lynann. Control of flux in magnetic circuits for Barkhausen noise measurements. **Measurement Science and Technology**, v. 18, n. 11, p. 3501, 2007.