



**Augusto Sérgio Oliveira Sampaio**

**Análise do Primeiro Harmônico para  
Acompanhamento do Constituinte Sigma em um  
Aço com Diferentes Espessuras**

**João Pessoa - PB  
Fevereiro de 2023**



**Augusto Sérgio Oliveira Sampaio**

## **Análise do Primeiro Harmônico para Acompanhamento do Constituinte Sigma em um Aço com Diferentes Espessuras**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como 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, Fevereiro de 2023  
©Augusto Sérgio Oliveira Sampaio – [sergioaugustosampaio@gmail.com](mailto:sergioaugustosampaio@gmail.com)

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

S192a	Sampaio, Augusto Sergio Oliveira. Análise do primeiro harmônico para acompanhamento do constituente sigma / Augusto Sergio Oliveira Sampaio. – 2023.  61 f.:il  Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba, 2023.  Orientador: Prof. Dr. Edgard de Macedo Silva. 1. Aço inoxidável. 2. Ruído magnético. 3. Sigma. I. Título.  CDU 669.14
-------	--

Thiago de Lima Silva CRB 15/524

Augusto Sérgio Oliveira Sampaio

# Análise do Primeiro Harmônico para Acompanhamento do Constituinte Sigma em um Aço com Diferentes Espessuras

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

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

## BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 EDGARD DE MACEDO SILVA  
Data: 28/07/2023 20:57:23-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Edgard de Macedo Silva, Dr. – IFPB**  
**Orientador**

Documento assinado digitalmente  
 ALFREDO GOMES NETO  
Data: 26/07/2023 18:36:33-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

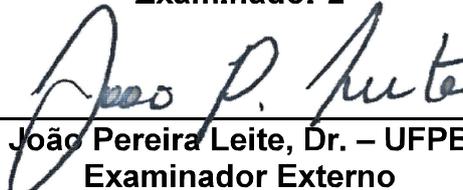
---

**Alfredo Gomes Neto, Dr. – IFPB**

Documento assinado digitalmente  
 JEFFERSON COSTA E SILVA  
Data: 28/07/2023 14:05:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB**  
**Examinador 2**

---

**João Pereira Leite, Dr. – UFPB**  
**Examinador Externo**

João Pessoa – PB  
Fevereiro de 2023

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus por me ter dado a oportunidade de ser o Seu filho, de me guiar, me proporcionar trilhar caminhos que sempre sonhei.

À minha família pelo apoio, suporte, incentivo nessa árdua batalha, sempre me proporcionando a melhor condição possível para que eu pudesse seguir o meu caminho acadêmico da melhor forma possível, em especial ao meu avô materno, José de Oliveira Maia, o senhor e mamãe são as minhas respostas do significado de amor, nenhuma qualidade poderia te descrever, vovô, te amo incondicionalmente.

À minha noiva Andrea pelo seu companheirismo, seu carinho e atenção, principalmente nos momentos mais difíceis, foram fatores importantes para o meu suporte emocional e sua família (que se tornou minha segunda família) pela grande ajuda que até hoje me concedem.

Ao meu orientador Edgard de Macedo, com sua paciência, sua dedicação, sempre disposto a me ajudar, independente das circunstâncias.

Aos meus amigos que adquiri nesse mestrado, em especial Amanda e Airlis, com vocês a caminhada foi mais prazerosa, encontrei pessoas que pude compartilhar muitas experiências que vão além dos conteúdos acadêmicos, serei sempre grato, desejo que nossa amizade transborde muito mais do que o nosso período acadêmico.

Aos professores pelo aprendizado, a amizade e por passarem sempre o sentimento de amor pela pesquisa, que diante da dificuldade que enfrentamos atualmente, conseguimos trilhar nossos caminhos da melhor maneira possível.

## RESUMO

A mudança de permeabilidade em um material ferromagnético devido à formação de novos constituintes favorece a utilização de ensaios eletromagnéticos não destrutivos para acompanhar essas transformações que possam prejudicar as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão. A passagem de uma onda eletromagnética por um material pode causar distorções em suas amplitudes e gerar tanto mudanças nos seus harmônicos como gerar o ruído magnético de Barkhausen. O aço inoxidável duplex quando submetido a ciclos térmicos acima de 550 °C forma um constituinte paramagnético a partir de sua estrutura ferrita, reduzindo assim o seu ferromagnetismo. Esse aço possui alta dureza e uma quantidade de 4 % de fase sigma já é suficiente para comprometer suas propriedades. No presente trabalho, ondas senoidais de frequências 5 Hz a 50 Hz e amplitudes entre 0,25 V a 9 V são aplicadas em um aço inoxidável duplex SAF 2205, como recebido e tratado a 850 °C por tempos de 15 min, 60 min e 120 min, de modo a estudar a capacidade de acompanhamento de sigma em amostras com diferentes espessuras. As ondas usadas no ensaio eletromagnético estudado são aplicadas por uma bobina e o sinal resultante da interação com o material captado por um sensor de efeito Hall na superfície oposta. Os resultados mostram que as melhores amplitudes de medidas são obtidas entre 1 V e 2 V, e com frequências até 25 Hz para amostras com 8 mm de espessura. O estudo da variação da densidade de fluxo magnético em função do tempo de tratamento e formação de sigma possui comportamento dependente da espessura e tendo comportamento inverso para espessuras de 2 mm e 8 mm e transitório entre os dois comportamentos para espessuras de 4 mm e 8 mm. A análise do primeiro harmônico mostrou ser capaz de detectar a fase prejudicial, mas para comparação em amostras com diferentes espessuras necessita uma correção do efeito dessa.

Palavras-Chaves: Aço inoxidável duplex; Ruído Magnético de Barkhausen; Sensor de efeito Hall; Sigma;

## ABSTRACT

The change in permeability in a ferromagnetic material due to the formation of new constituents favors the use of non-destructive electromagnetic tests to monitor these transformations that may impair the mechanical properties and corrosion resistance. The passage of an electromagnetic wave through a material can cause distortions in its amplitudes and generate both changes in its harmonics and generate Barkhausen magnetic noise. Duplex stainless steel, when subjected to thermal cycles above 550 °C, forms a paramagnetic constituent from its ferrite structure, thus reducing its ferromagnetism. This has high hardness and a amount of 4% of sigma phase is enough to compromise its properties. In the present work, sine waves of frequencies between 5 Hz and 50 Hz and amplitudes between 0.25 V and 9 V are applied to a SAF 2205 duplex stainless steel, as received and treated at 850 °C for times of 15 min, 60 min and 120 min, so that to study the ability to follow sigma in samples with different thicknesses. The waves used in the electromagnetic test studied are applied by a coil and the signal resulting from the interaction with the material captured by a Hall effect sensor on the opposite surface. The results show that the best measurement amplitudes are obtained between 1 V and 2 V and with frequencies up to 25 Hz for samples with 8 mm thickness. The study of magnetic flux density variation as a function of treatment time and sigma formation has a thickness-dependent behavior, being inverse for thicknesses of 2 mm and 8 mm and transition between the two behavior for thicknesses of 4 mm and 8 mm. The electromagnetic test proved capable of detecting the harmful phase, but for comparison in samples with different thicknesses, it is necessary to correct its effect.

Keywords: Duplex stainless steel; Barkhausen magnetic noise; Hall effect sensor; Sigma;

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01-	Disposição aleatória de domínios magnéticos dentro de um material.	15
Figura 02-	Curva de magnetização para um material ferromagnético com orientações dos domínios magnéticos.	16
Figura 03-	Representação do comportamento serrilhado da região de irreversibilidade e geração do ruído magnético de Barkhausen.	18
Figura 04-	Representação esquemática da região da curva de histerese onde o ruído magnético de Barkhausen é medido.	19
Figura 05-	Microestrutura típica de um AID: matriz de ferrita ( $\delta$ ) e ilhas de austenita ( $\gamma$ ) alongadas na direção de laminação.	20
Figura 06-	Microestrutura típica de um aço inoxidável duplex SAF2205.	21
Figura 07-	Diagrama de Precipitação de um aço inoxidável duplex SAF 2205.	22
Figura 08-	Princípio de funcionamento do ensaio de correntes parasitas: campo magnético.	24
Figura 09-	Profundidade de penetração das correntes parasitas.	25
Figura 10-	Impedância em relação as condições de tratamento térmico em AID.	26
Figura 11-	Profundidade de penetração das correntes parasitas em função da frequência e das características dos materiais.	27
Figura 12-	Esquema do ensaio realizado.	28
Figura 13-	Medidas do valor RMS, para amostras com e sem precipitados, em função dos sinais com frequências de 5 Hz e 25 Hz e diferentes amplitudes.	29
Figura 14-	Medidas da razão entre o módulo da diferença e o valor de RMS da amostra com fase sigma, em função das amplitudes das ondas emisoras, para frequências de 5 Hz, 15 Hz, 25 Hz, 75 Hz e 100 Hz. Amostras com 4 mm de espessura.	30
Figura 15-	Medidas da razão entre o módulo da diferença e o valor de RMS da amostra com fase sigma, em função das amplitudes das ondas emisoras, para frequências de 5 Hz, 15 Hz, 25 Hz, 75 Hz e 100 Hz. Amostras com 8 mm de espessura.	31
Figura 16-	Variação das medidas da amplitude do primeiro harmônico, para ondas com frequências de 50 e 100 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7, e 9 V aplicadas em amostra com e sem precipitados.	32
Figura 17-	Medidas de dureza Rockwell C e de amplitude do primeiro harmônico em função do tempo de envelhecimento para amostras tratadas na temperatura de 475 °C.	33
Figura 18-	Medidas amplitude do primeiro harmônico e energia absorvida por impacto, em função do tempo de envelhecimento, para amostras tratadas na temperatura de 475 °C.	34

Figura 19-	Diagrama de blocos para a medição dos primeiros harmônicos perfis.	35
Figura 20-	Variação dos picos dos harmônicos e dureza Vickers em função do tempo de envelhecimento.	35
Figura 21-	Diagrama esquemático da configuração de medição: (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (3) bobina emissora, (4) amostra, (5) sensor de efeito Hall, (6) bancada de testes com gaiola de Faraday, (7) placa de aquisição e (8) computador.	39
Figura 22-	Configuração Experimental: (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (3) bobina emissora, (4) amostra, (5) sensor de efeito Hall, (6) bancada de testes com gaiola de Faraday, (7) placa de aquisição e (8) computador.	39
Figura 23-	Programa para análise de ruído de Barkhausen, mostrando a seleção do harmônico principal da onda gerada pelos sinais obtidos no banco de dados da GSCMat.	41
Figura 24-	Microscopia óptica da amostra tratada na temperatura de 850 °C por 2 horas.	44
Figura 25-	Variação da densidade de fluxo magnético em função da amplitude da onda emissora, para amostras com e sem precipitado e frequências de 5 Hz, 10 Hz e 15 Hz.	46
Figura 26-	Variação da densidade de fluxo magnético em função da amplitude da onda emissora, para amostras com e sem precipitado e frequências de 5 Hz e 25 Hz.	47
Figura 27-	Variação da densidade de fluxo magnético em função da amplitude da onda emissora, para amostras com e sem precipitado e frequências de 5 Hz e 50 Hz.	47
Figura 28-	Variação da porcentagem de amplitude de medidas entre a condição com e sem a fase sigma, para aplicação de ondas emissoras de frequências de 5 Hz, 10 Hz e 15 Hz.	48
Figura 29-	Medidas de dureza Rockwell C e energia absorvida por impacto Charpy (FIALHO, 2015) para as condições com e sem a presença da fase sigma.	49
Figura 30-	Gráfico da amplitude de onda emissora em relação ao tempo para amostras de 2 mm para 1 V.	51
Figura 31-	Gráfico da amplitude de onda emissora em relação ao tempo para amostras de 4 mm para 1 V.	52
Figura 32-	Gráfico da amplitude de onda emissora em relação ao tempo para amostras de 6 mm para 1 V.	53
Figura 33-	Gráfico da amplitude de onda emissora em relação ao tempo para amostras de 8 mm para 1 V.	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Composição do AID SAF 2205, como recebido, em percentual de peso. 37

## LISTA DE SIGLAS

A	Ampere
AID	Aço Inoxidável Duplex
B	Densidade de fluxo magnético
END	Ensaio não destrutivo
G	Gauss
GSCMat	Grupo de Simulação de Comportamento de Materiais
H	Intensidade de campo magnético aplicado
h	Horas
Hz	Hertz
m	Metro
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada rápida de Fourier)
mm	Milímetro
RMB	Ruído magnético de Barkhausen
RMS	<i>Root Means Square</i>
s	Segundo
SAF	<i>Sandvik Austenite Ferrite</i>
SI	Sistema Internacional de Unidades
V	Volts
°C	Graus Celsius
$\alpha$	Ferrita

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.</b>	<b>CURVA DE MAGNETIZAÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.</b>	<b>RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN (RMB) .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.</b>	<b>AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX.....</b>	<b>19</b>
<b>2.4.</b>	<b>ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS.....</b>	<b>22</b>
2.4.1.	CORRENTES PARASITAS.....	23
2.4.2.	ESTUDO DA MICROESTRUTURA DE UM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX ATRAVÉS DO RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN.....	28
2.4.3.	ESTUDOS DOS HARMÔNICOS PARA ACOMPANHAMENTO DE FORMAÇÃO DE MICROESTRUTURAS.....	31
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>37</b>
3.1.	MATERIAL UTILIZADO .....	37
3.2.	EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL DE TESTE.....	38
3.3.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	40
3.3.1.	DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA ONDA EMISSORA PARA AS AMOSTRAS DE 8 MM.....	41
3.3.2.	<b>Estudo da espessura do material em função dos tempos de tratamentos .....</b>	<b>42</b>
3.3.3	<b>Correlação com ensaios consolidados.....</b>	<b>42</b>
3.3.4.	<b>Análise microestrutural.....</b>	<b>43</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>44</b>
4.1.	DETERMINAÇÃO DAS MELHORES ONDAS PARA ESPESSURA DE 8 mm.....	44
4.2.	ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA NO ACOMPANHAMENTO DE SIGMA.....	50
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>55</b>
	<b>PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>57</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Quando um campo magnético é aplicado a um material ferromagnético, a indução magnética resultante tem forma distorcida devido à histerese magnética e a não linearidade da permeabilidade do material, ou seja, uma onda de forma senoidal aplicada, induz uma onda não senoidal. Esta forma de onda distorcida da indução magnética contém componentes nas frequências harmônicas do campo magnético aplicado (İSPİRLİ e YILMAZ, 2018, XIA *et al.*, 2016). A análise dos harmônicos tem sido aplicada em investigação de falhas em materiais (İSPİRLİ e YILMAZ, 2018, MATLACK *et al.*, 2015), detecção de degradação por corrosão (XIA *et al.*, 2016), avaliações não destrutivas de aços submetidos a tratamento térmico (Ryu *et al.*, 2001) e acompanhamento de microestruturas prejudiciais em aços inoxidáveis (Silva *et al.*, 2018).

A interação entre densidade de fluxo magnético e materiais ferromagnéticos na região de reversibilidade do movimento dos domínios magnéticos tem sido aplicada para estudos de transformações microestruturais em materiais (SILVA *et al.*, 2016a, 2016b, 2016c, 2016d) com intensidade de corrente não alternada. Contudo, a aplicação destes levam a geração do Ruído Magnético de Barkhausen na região de irreversibilidade e geram variações tanto em altas frequências quanto na região dos harmônicos da onda principal trazendo informações da microestrutura da materiais (LINS 2020, RYU *et al.*, 2001, TAVARES *et al.*, 2019). As propriedades magnéticas dependem de várias características dos materiais, como composição química, microestrutura, dureza, estados de tensões, deformações e tratamentos térmicos (LO *et al.*, 2011, MIESOWICZ *et al.*, 2016, DUCHARNE *et al.*, 2017, SILVA *et al.*, 2016a, SILVA *et al.*, 2016b).

O Aço SAF 2205 quando submetido a tratamento acima de 600 °C tem a formação de uma fase paramagnética denominada de sigma. A presença desta muda a permeabilidade magnética do material. Uma quantidade de 4% dessa fase é capaz de comprometer a tenacidade e resistência à corrosão desse material. Ensaios não destrutivos vêm sendo desenvolvidos para o

acompanhamento da fase sigma, de modo a determinar o melhor momento para intervenção dessa fase indesejada (TAVARES *et al.*, 2010, SILVA *et al.*, 2016c).

No presente trabalho, um ensaio eletromagnético composto de uma bobina emissora, um sensor de efeito Hall e uma amostra posicionada entre esses, é estudado para detecção da presença da fase sigma em um aço inoxidável duplex através da análise do primeiro harmônico das ondas emitidas, após a interação com a microestrutura do material. Ondas emissoras com frequências de 5 Hz a 50 Hz e amplitudes de 0,25 V a 9 V são estudadas através da análise do primeiro harmônico da onda detectada pelo sensor de efeito Hall e correlacionados com medidas de dureza e energia absorvida por impacto para condições sem e com 4% de fase sigma. Além, disso é feito o estudo do efeito da espessura do material no comportamento entre a densidade de fluxo magnético resultante da interação do material com as ondas emissoras.

Objetivo geral:

Estudar a presença do constituinte sigma e o efeito da espessura, em um aço inoxidável duplex pela análise dos harmônicos de ondas detectadas por um sensor de efeito Hall;

Objetivos específicos:

- Determinar as características da onda emissora capaz de detectar a presença da fase sigma em um aço inoxidável duplex SAF 2205.
- Estudar o efeito da espessura das amostras nas condições de aplicação das ondas emissoras, para detecção da fase sigma.
- Correlacionar os resultados dos ensaios eletromagnéticos com medidas de dureza e energia absorvida por impacto.

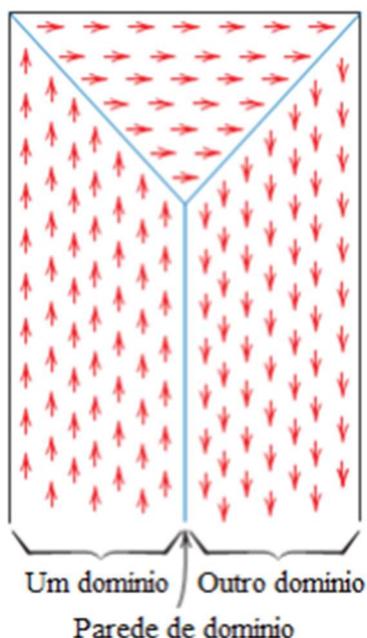
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir serão apresentadas as características de uma curva de magnetização, a descrição do aço a ser estudado e suas microestruturas prejudiciais, a descrição do ruído magnético de Barkhausen e sua aplicação em ensaios eletromagnéticos para detecção de microestruturas não desejáveis em aço inoxidável duplex e por final a aplicação da análise dos harmônicos para acompanhamento de formação de novas microestruturas.

### 2.1. CURVA DE MAGNETIZAÇÃO

Os materiais ferromagnéticos são divididos por porções de volumes chamados de domínios magnéticos. Estes possuem orientações magnéticas diferentes delimitadas por suas fronteiras, onde são divididas essas porções, formando assim a estrutura magnética de uma amostra de material ferromagnético não conforme mostrado na Figura 1 (CALLISTER, 2007).

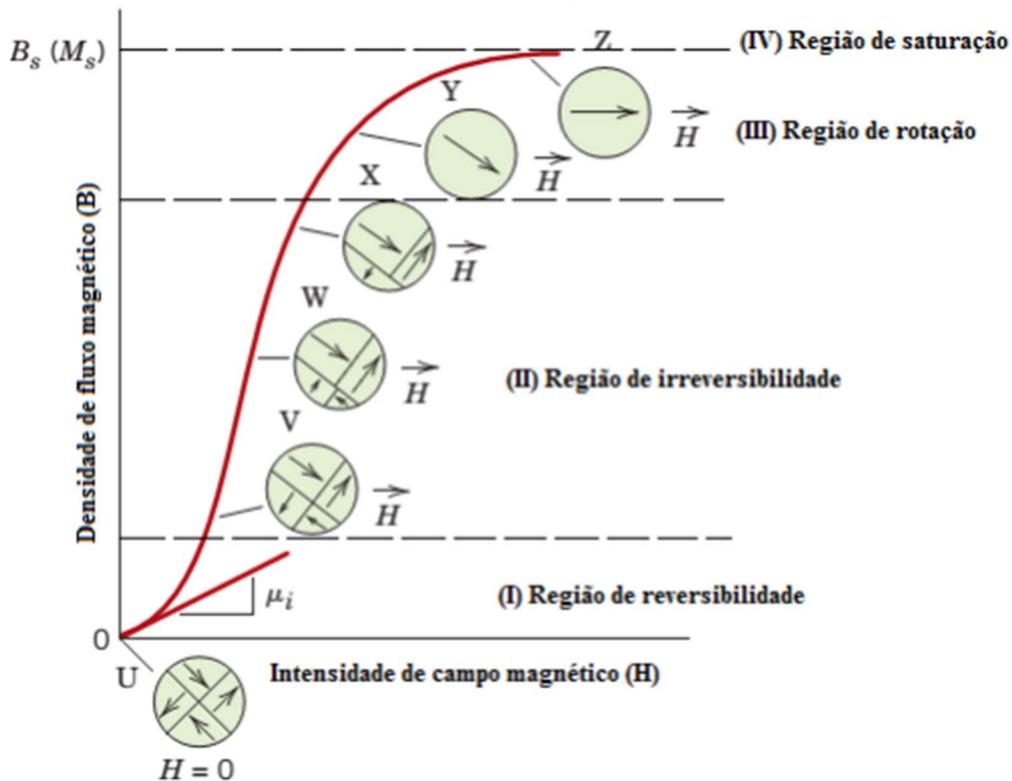
**Figura 01 - Disposição aleatória de domínios magnéticos dentro de um material**



Fonte: CALLISTER, 2007.

A Figura 2 mostra uma curva de magnetização de um material ferromagnético. Nesta tem-se a variação da densidade de fluxo magnético ( $B$ ) em função da intensidade de fluxo magnético aplicado ( $H$ ). A Figura 2 apresenta as diferentes etapas da curva de magnetização: região de reversibilidade, irreversibilidade, rotação e saturação.

Figura 02 - Curva de magnetização para um material ferromagnético com orientações dos domínios magnéticos.



Fonte: Adaptada de CALLISTER, 2007.

A região (I) está relacionada a faixa de deslocamento reversível das paredes de domínio magnéticos. No início desta região, os domínios estão orientados de maneira aleatória e essa é caracterizada por um intervalo com baixa intensidade de campos magnéticos, que não causa a sua orientação permanente. A região de (II), possui uma aplicação crescente de campo magnético, que é suficiente para favorecer o crescimento de domínios orientados na mesma direção do campo aplicado, ou próximos a essa, e ao mesmo tempo a contração dos domínios não orientados, fazendo com que diminuam ou desapareçam à medida que é aumentada continuamente a intensidade do

campo magnético. No final dessa região os domínios magnéticos tendem a se orientar na direção do eixo de fácil magnetização mais próxima da direção da aplicação do campo. A região (III) retrata a rotação, onde os domínios giram e ficam completamente alinhados na mesma direção do campo magnético aplicado até a região (IV), de saturação. Um material que tenha sido magnetizado até o ponto Y da curva não retornará pelo mesmo caminho ao ponto O, esse efeito é denominado como histerese magnética.

A linha da região de irreversibilidade dos movimentos dos domínios magnéticos, apesar de ser representada da Figura 2 como contínua, caso fosse ampliada, teria forma serrilhada. Este comportamento se deve aos saltos abruptos que ocorrem à medida que as paredes dos domínios magnéticos vencem os obstáculos gerados pelos pontos de ancoragem que são as variações microestruturais como: contornos de grãos, precipitados, discordâncias entre outros aspectos da estrutura do material. Estes saltos abruptos geram o ruído magnético de Barkhausen (RMB) (GHANEI, *et al.*, 2014a, 2014b).

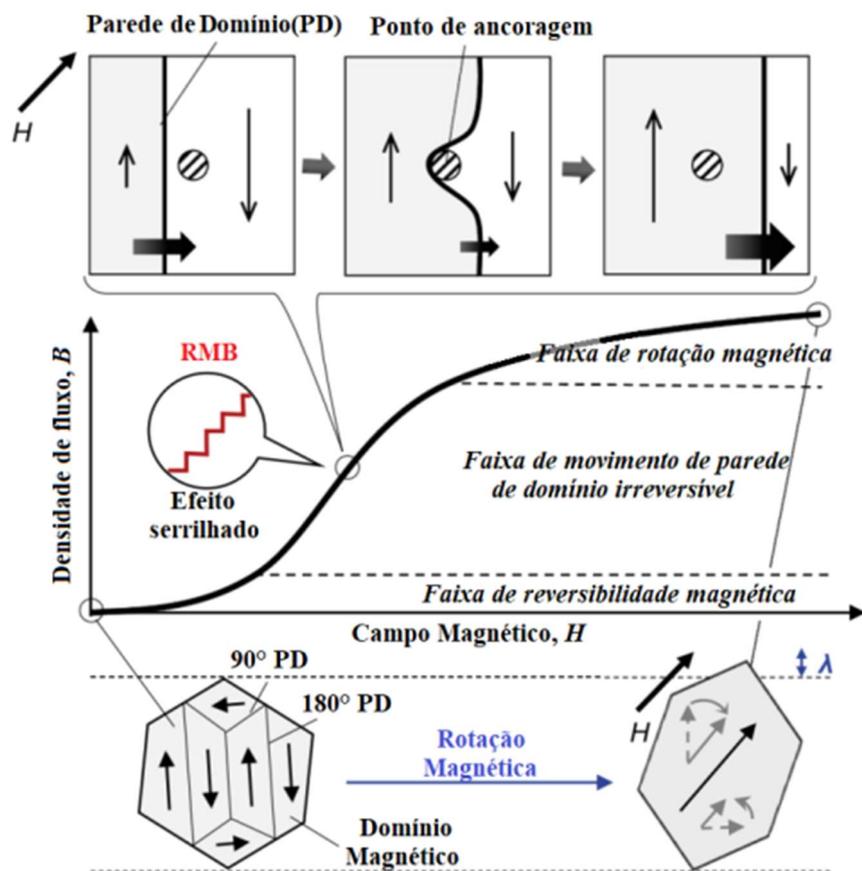
## 2.2 RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN (RMB)

O RMB é um fenômeno de mudanças descontínuas na densidade de fluxo dentro de um material ferromagnético. E em geral, as medidas do RMB podem fornecer informações de materiais metálicos quando submetidos a determinadas condições como fadiga e exposição a tratamentos térmicos. (GHANEI, *et al.*, 2014a).

O ruído magnético de Barkhausen ocorre devido a mudanças abruptas na resposta magnética de um material ferromagnético quando submetido a campos magnéticos que variam com o tempo (BLAOW *et al.*, 2007, CALDAS-MORGAN *et al.*, 2012, CULLITY, *et al.*, 2009). Este ruído foi descoberto pelo professor alemão Heinrich Barkhausen em 1917, que, experimentalmente, percebeu que, durante a magnetização de uma barra de ferro, pulsos de tensão de tensão elétrica de curta duração eram induzidos em uma bobina enrolada em torno da barra. Estes foram detectados como cliques audíveis em um alto falante. Ao mudar lentamente o campo de magnetização, as discontinuidades persistiram,

concluindo que se trata de um fenômeno em processo inerentemente discreto (CULLITY, 2009). A Figura 3 mostra o comportamento serrilhado na região de irreversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos devido a interação entre campo magnético e microestrutura. Além disso, apresenta a interação entre uma parede de domínio magnético e um ponto de ancoragem.

Figura 03 – Representação do comportamento serrilhado da região de irreversibilidade e geração do ruído magnético de Barkhausen.

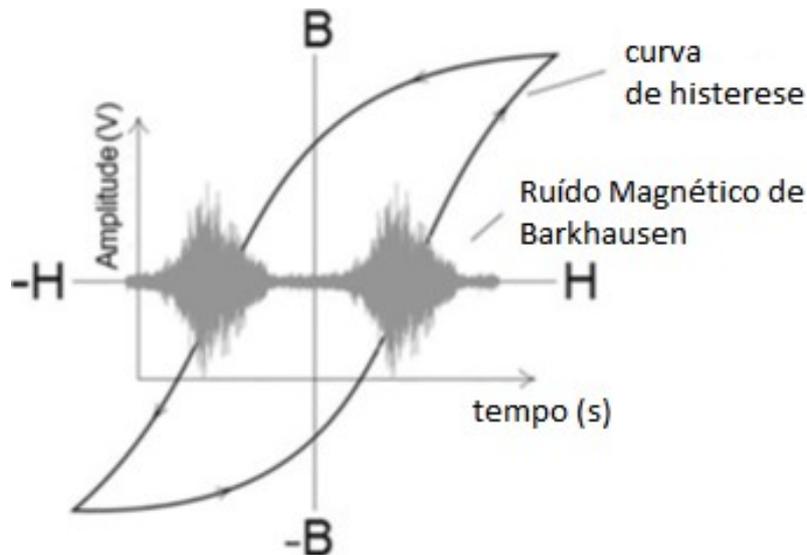


Fonte: Adaptado de (YAMAZAKI *et al.*, 2019).

A Figura 4 mostra uma curva de histerese magnética com a representação da região onde o ruído magnético de Barkhausen é medido. Nota-se que ao

longo da curva é observado o RMB, sendo que a maior intensidade ocorre na região de irreversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos (TAVARES *et al.*, 2019).

**Figura 04 - Representação esquemática da região da curva de histerese onde o ruído magnético de Barkhausen é medido.**



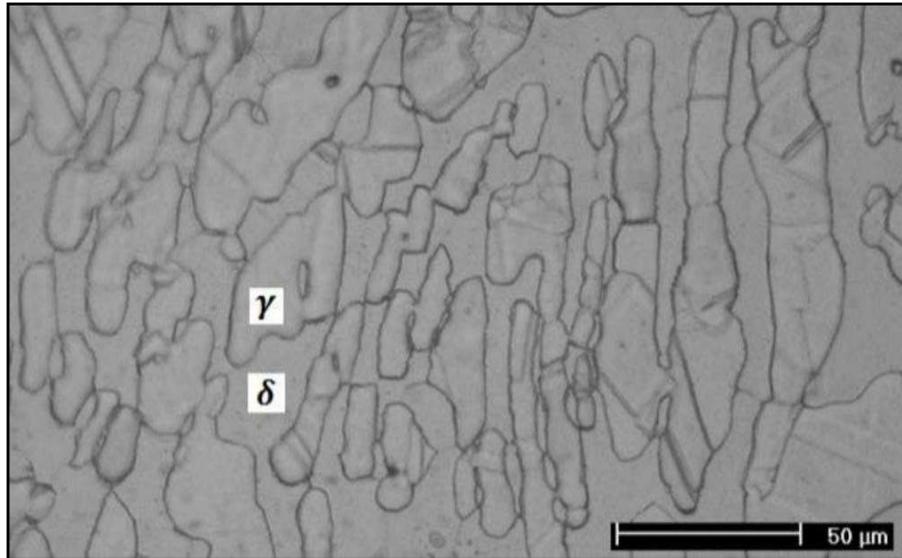
Fonte: TAVARES, 2019.

## 2.3 AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX

O aço inoxidável duplex é muito aplicado no setor de petróleo e gás por apresentar a combinação de alta resistência mecânica e à corrosão. Ele tem como principal característica a alta resistência à corrosão e resistência mecânica decorrente da sua composição de 50% do constituinte ferrítico e 50% da austenítica. Na Figura 05 é mostrada uma microestrutura de um aço inoxidável duplex com as suas duas fases em proporções praticamente em equidade. Nota-se da Figura 05 a presença de ilhas de austenita sobre uma matriz de ferrita ( $\delta$ ). Todas as transformações nesse material ocorrem no constituinte ferrita e isto se deve a diferença de mobilidade atômica da austenita ser 100 vezes maior do que

na ferrita levando a uma maior concentração de átomos de soluto nesta (TAVARES *et al.*, 2010).

**Figura 05 - Microestrutura típica de um AID: matriz de ferrita ( $\delta$ ) e ilhas de austenita ( $\gamma$ ) alongadas na direção de laminação.**

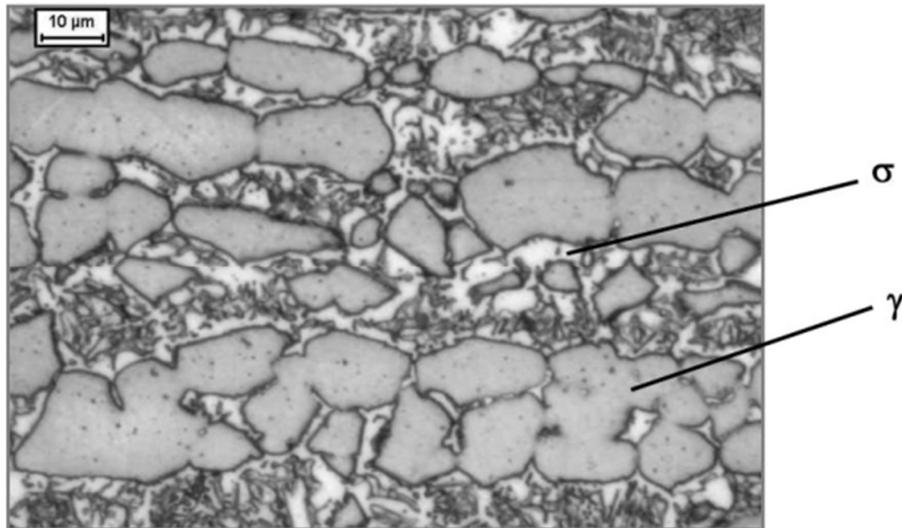


**Fonte: SILVA et al. 2016a.**

Os aços inoxidáveis duplex na condição de aquecimento a temperaturas superiores a 300 °C perde a sua tenacidade, capacidade de absorver energia por impacto, se tornando um material frágil devido ao surgimento de partículas ricas em cromo que empobrecem a matriz desse elemento (SILVA *et al.*, 2016a). Estas transformações ocorrem com o constituinte ferrita que é ferromagnético, que se decompõe formando precipitados paramagnéticos de durezas em torno de 1000 HV e são ricos em cromo.

A Figura 06 mostra uma microestrutura típica de um aço inoxidável duplex SAF 2205. Nesta, pode-se observar as ilhas de austenita e a formação de regiões claras na matriz de ferrita. Essas regiões são os constituintes sigma. (GENEROSO, D.J., 2014).

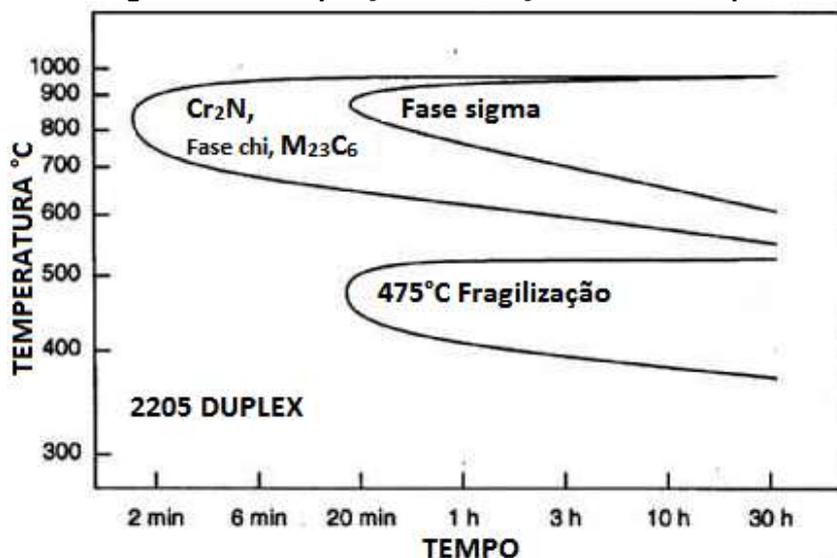
Figura 06 - Microestrutura típica de um aço inoxidável duplex SAF2205.



Fonte: GENEROSO, D.J., 2014.

A Figura 07 mostra o diagrama temperatura, tempo e precipitação de um aço inoxidável duplex. Neste se tem duas microestruturas indesejáveis por prejudicar a tenacidade do material. Abaixo de 550 ° C uma microestrutura nanométrica denominada de alfa linha ( $\alpha'$ ) é formada e acima desta temperatura a principal é a sigma ( $\sigma$ ) (SILVA, *et al.*, 2016a). A primeira se forma uniformemente distribuída dentro da ferrita e provoca o endurecimento ao funcionar como obstáculos para o deslizamento de planos atômicos durante a deformação. A segunda possui morfologia grosseira e possui alta dureza (TAVARES, *et al.*, 2010).

Figura 07 - Diagrama de Precipitação de um aço inoxidável duplex SAF 2205.



Fonte: Adaptado de SEDRIKS, 1996.

De acordo com Normando (2010), uma pequena quantidade de 4% da fase sigma já é suficiente para comprometer a tenacidade do material. Esta fase é originada por uma reação de decomposição de ferrita ferromagnética, o que causa diminuição na quantidade dos constituintes ferromagnéticos (LEITE, *et al.*, 2016).

## 2.4 ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS

A presença do constituinte sigma muda a permeabilidade do material e torna assim os ensaios não destrutivos capazes de acompanhar a sua formação. Entre esses ensaios destacou-se a seguir, o de correntes parasitas, os baseados no ruído magnético de Barkhausen e os de análises dos harmônicos. Todos eles são fruto da interação entre a aplicação de um sinal alternado e os estudos da interação deste com a microestrutura do material. O ensaio de correntes parasitas será apresentado por mostrar a influência da permeabilidade do material com a profundidade de penetração da onda aplicada. O baseado no ruído magnético de Barkhausen por correlacionar a interação do movimento das paredes dos domínios magnéticos com a microestrutura e os ensaios com análise dos harmônicos, por ser o foco do presente trabalho e estar

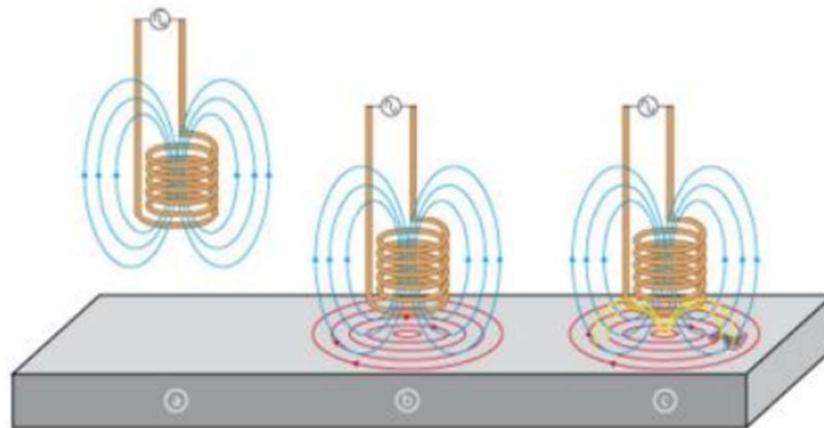
correlacionado com os demais ao se analisar o efeito da espessura do material e da microestrutura.

### **2.4.1 Correntes parasitas**

O ensaio não destrutivo de correntes parasitas originou-se em 1831, quando Michael Faraday demonstrou a indução eletromagnética e formulou experimentalmente as leis da indução. Esse foi realizado para quantificar a fase sigma através da determinação das mudanças da permeabilidade magnética e a resistividade elétrica. Aplicando corrente alternada em uma bobina, um campo magnético é criado, o que em contato com um material condutivo, induz uma corrente parasita. Esta nova corrente também produz um campo magnético. Sendo assim, comparando os campos magnéticos sobrepostos e sua mudança de indutância, a fase  $\sigma$  pode ser detectada (BIEZMA *et al.*, 2021)

O ensaio por corrente parasita tem início com uma corrente alternada que passa por uma bobina condutora, gerando um campo magnético alternado ao redor da mesma, se expandindo e se contraindo à medida que existe alteração na intensidade da corrente alternada. Quando a bobina se aproxima de outro condutor, o campo em torno dela, permeia o material que, pela Lei de Lenz, induz uma corrente parasita a fluir no condutor. Essa corrente, por sua vez, desenvolve seu próprio campo magnético com menor intensidade, que se opõe ao campo “primário”, causando alterações na impedância elétrica da bobina seja por defeitos ou mudanças na propriedade física do material, cuja direção é a mesma do campo indutor, porém em sentido oposto. Este ensaio é ilustrado na Figura 08 (NDT RESOURCE CENTER, 2022) (TWI Global, 2022).

**Figura 08 - Princípio de funcionamento do ensaio de correntes parasitas: Campo magnético.**

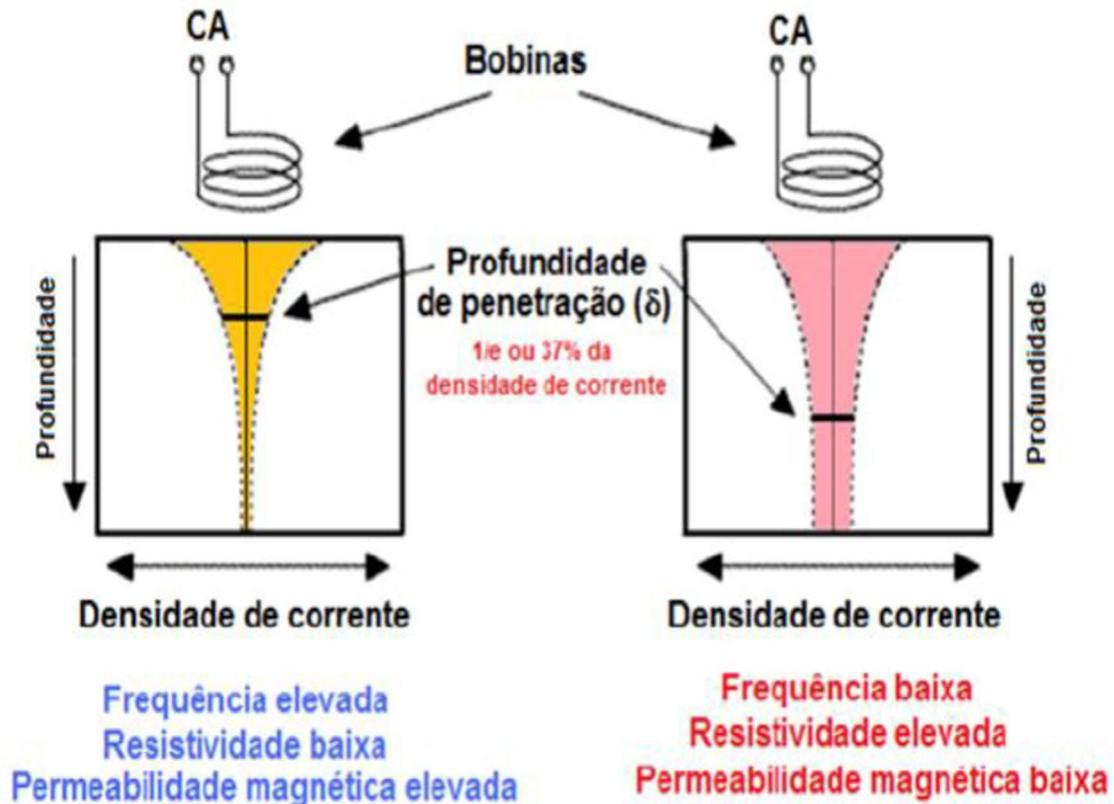


**Fonte: Adaptado de PEREIRA, 2007.**

Existem três oposições ao fluxo de corrente, que são: a resistência elétrica efetiva do condutor ( $R$ ), a reatância indutiva ( $X_L$ ) e a reatância capacitiva ( $X_C$ ), sendo as duas primeiras mais usuais em ensaios por correntes parasitas. (NDT RESOURCE CENTER, 2022).

Para a profundidade atingida através do ensaio por correntes parasitas, tem-se diversos fatores, sendo utilizado para definir a profundidade padrão de penetração: a condutividade, permeabilidade magnética relativa e frequência. A profundidade padrão de penetração é a profundidade abaixo da superfície do substrato inspecionado em que a intensidade do campo magnético, ou a intensidade das correntes parasitas induzidas, é reduzida para 37% do valor na superfície, como pode ser observado na Figura 09 (NDT RESOURCE CENTER, 2022).

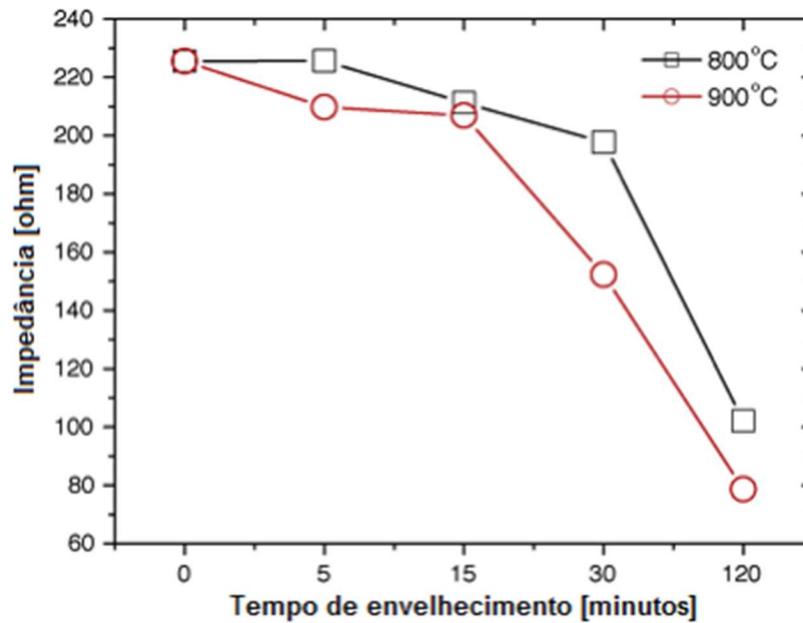
Figura 09 - Profundidade de penetração das correntes parasitas.



Fonte: Adaptação de CAMERINI, 2012.

Normando *et al.* (2010) utilizando essa técnica, mostraram o comportamento da impedância em função das condições de tratamento de amostras de AID, uma tratada a 800 °C e outra a 900 °C, ambas envelhecidas em intervalos de 5, 15, 30 e 120 minutos. Estes tratamentos são capazes de formar diferentes quantidades do constituinte sigma. A Figura 10 mostra a variação da impedância para esses tratamentos e nota-se variação a partir de 15 min de tratamento. Este tempo é suficiente para formar uma quantidade de 4% de sigma, concluindo assim, que a técnica de correntes parasitas foi capaz de detectar fase sigma em materiais.

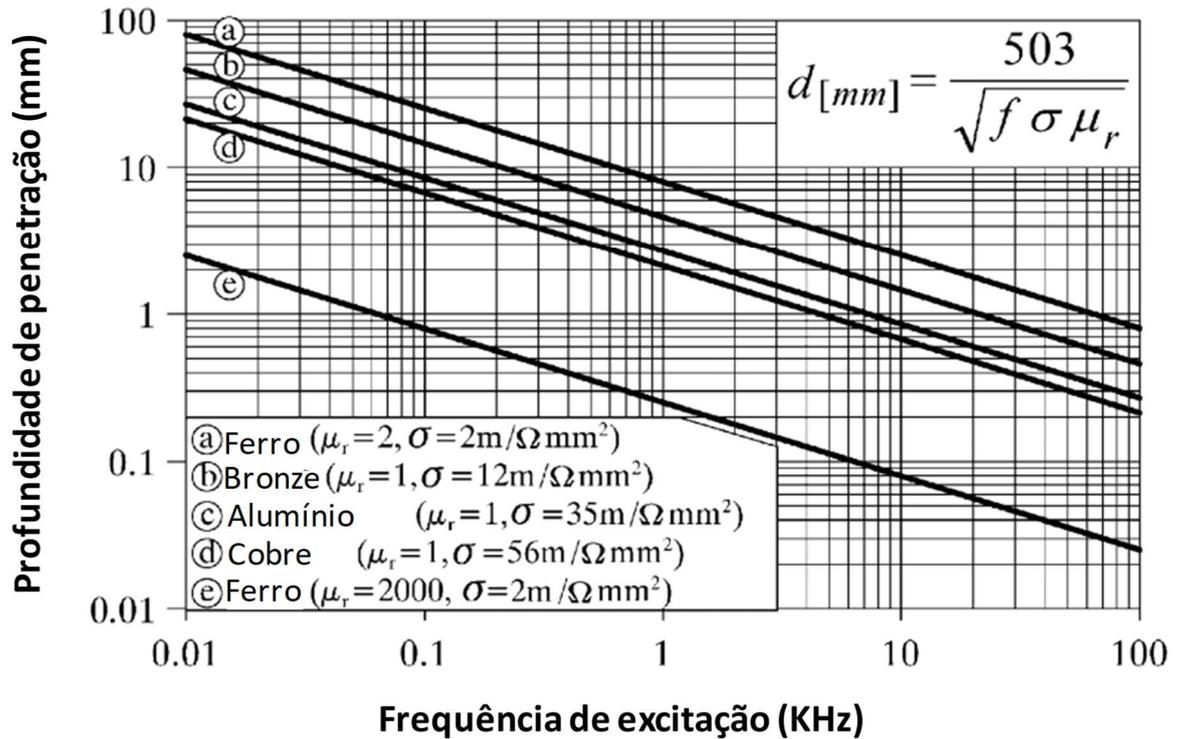
Figura 10 - Impedância em relação as condições de tratamento térmico em AID.



Fonte: NORMANDO *et al.*, 2010.

A penetração das correntes parasitas a fim de acompanhamento de quaisquer tipos de alteração que causem variação na permeabilidade magnética do material ou na sua condutividade elétrica, depende de vários fatores, como as propriedades do material e da frequência de excitação da bobina que produz o campo magnético primário. A Figura 11 mostra o comportamento da profundidade de penetração em função da frequência de excitação para diferentes materiais. No eixo das abscissas são apresentados os valores de frequência de excitação aplicados ( $f$ ). No eixo das ordenadas a profundidade de penetração alcançada ( $d$ ).  $\sigma$  representa a condutividade elétrica de cada um dos materiais e  $\mu_r$  as suas respectivas permeabilidades relativas.

Figura 11 - Profundidade de penetração das correntes parasitas em função da frequência e das características dos materiais



Fonte: RADTKE, 2001.

A Figura 11 mostra que a profundidade de penetração da corrente parasita é inversamente proporcional a frequência de excitação, permeabilidade elétrica e condutividade elétrica do material.

Konoplyuk (2005) e Kahrobaee (2011) apud Ghanei (2013) relacionaram essas variáveis substituindo a permeabilidade relativa ( $\mu_r$ ) pela permeabilidade do material ( $\mu$ ) como apresentado na equação (1):

$$\delta_{(f,\mu,\sigma)} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

Onde:

$\delta$  = profundidade de penetração (m);

f = frequência do sinal aplicado (Hz);

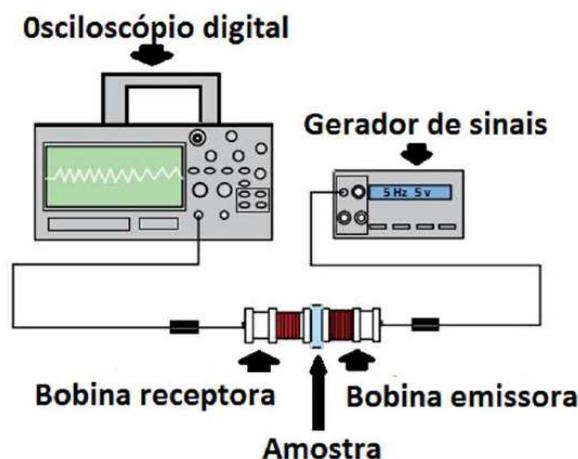
$\mu$  = permeabilidade magnética do material (H/m);

$\sigma$  = condutividade elétrica (m/ $\Omega$  x m<sup>2</sup>).

## 2.4.2 Estudo da microestrutura de um aço inoxidável duplex através do ruído magnético de Barkhausen.

Carvalho (2018) realizou um estudo de desenvolvimento de um ensaio eletromagnético não destrutivo baseado no ruído magnético de Barkhausen, para acompanhamento da formação da fase nanométrica alfa linha, em um aço inoxidável duplex. A Figura 12 mostra a configuração experimental utilizada. Nesta, a amostra a ser analisada é posicionada entre duas bobinas, uma emissora e a outra receptora.

Figura 12 - Esquema do ensaio realizado.



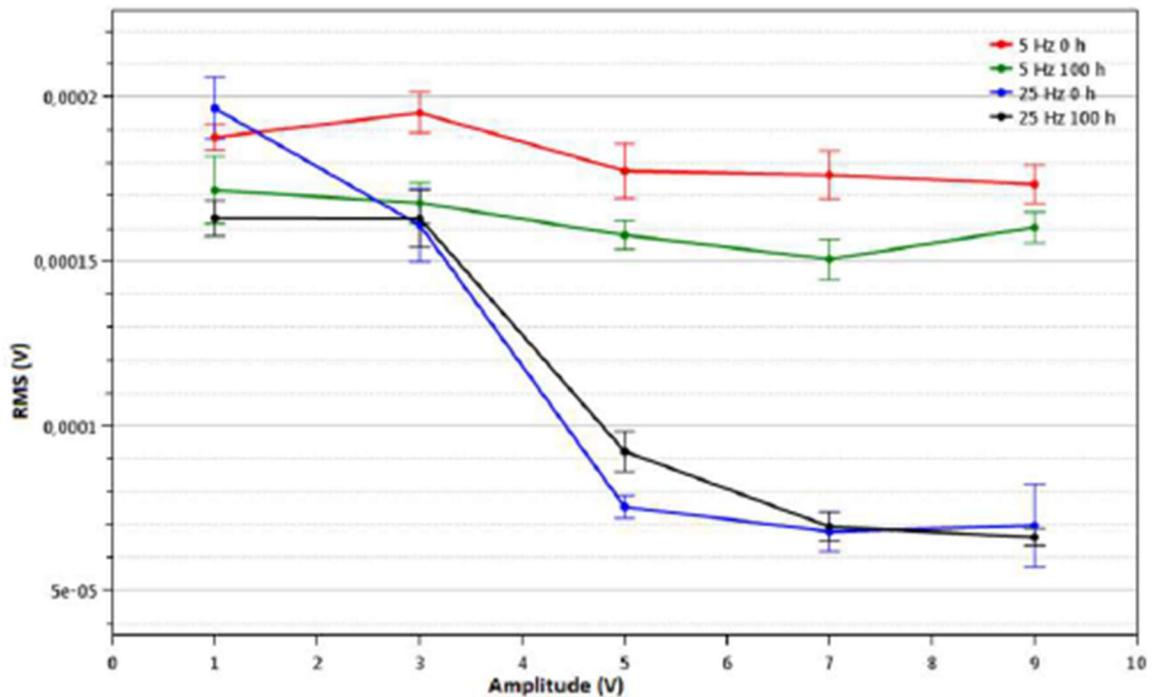
Fonte: Adaptado de CARVALHO, J. A. F., 2018.

No experimento foram aplicadas ondas triangulares com frequência de 5, 25, 50, 75 e 100 Hz, com amplitudes variando de 1 a 9 V. O parâmetro de análise foi o RMS (*Root Means Square*) e na Figura 12 é apresentada a variação desta em função da amplitude da onda emissora para as frequências de 5 Hz e 25 Hz. De acordo com a Figura 13, as ondas capazes de definir a formação dos precipitados seriam as de 5 Hz com amplitude de 1 a 9 V e 25 Hz com amplitudes menores que 3 V.

A Figura 13 mostra que as ondas com frequência de 5 Hz, apresentam pouca variação nos valores de RMS em função da amplitude. Entretanto, para

25 Hz ocorreu diminuição na intensidade do RSM até a amplitude de 5 V, havendo uma estabilização a partir desta, pelo fato de que os AID são formados por uma matriz ferromagnética e ilhas de uma fase paramagnética, e o aumento da amplitude da onda aplicada no material leva a diminuição do RMS devido à interação das ondas com a fase paramagnética (austenita) do material.

**Figura 13 - Medidas do valor RMS, para amostras com e sem precipitados, em função as ondas com frequências de 5 Hz e 25 Hz e diferentes amplitudes.**



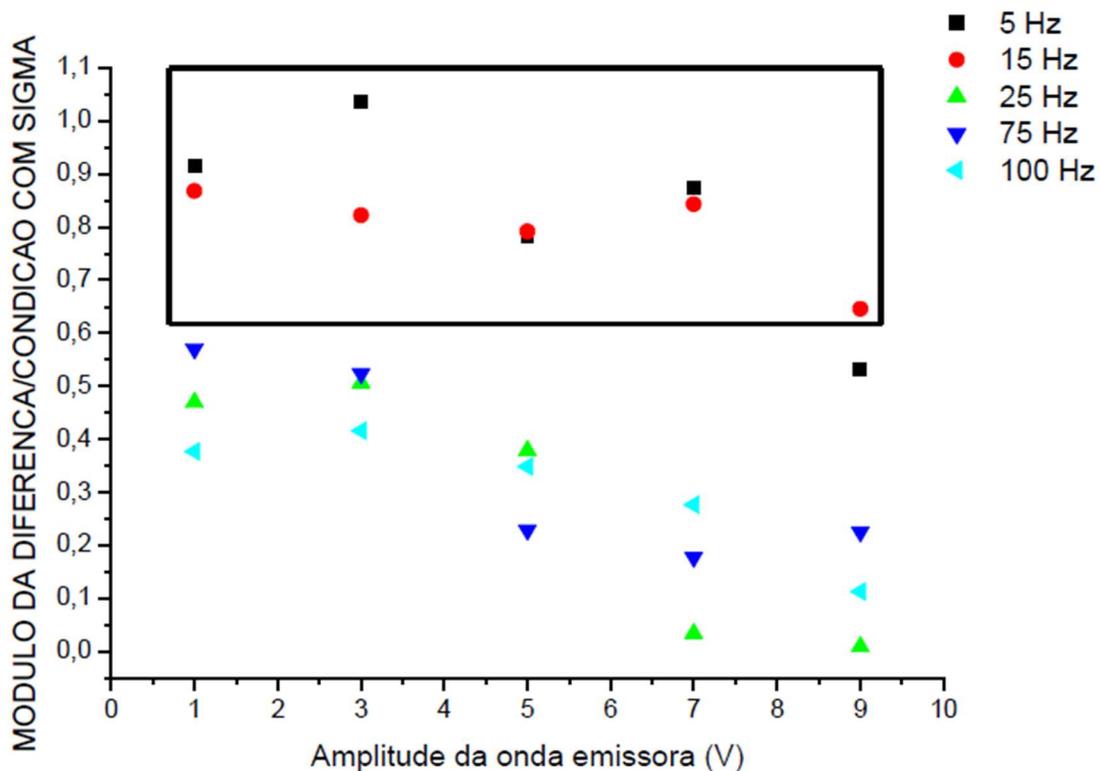
Fonte: CARVALHO, J. A. F., 2018.

Viegas (2019) estudou a presença de fase sigma em um aço Inoxidável Duplex 2205 através da análise do RMS do ruído magnético de Barkhausen. Nesse trabalho utilizou as frequências de 5, 15, 25, 50, 75 e 100 Hz com amplitude variando de 1 a 9 V para espessuras de 4 e 8 mm, em amostras com 24 mm de diâmetro. A Figura 14 mostra a razão entre a variação do módulo da diferença de medidas de RMS, entre uma amostra de 4 mm com e sem fase sigma.

Através da observação da Figura 14, notou-se que a aplicação de ondas com frequência de 5 e 15 Hz apresentam módulo da diferença acima de 60%, o que resulta em uma amplitude de medida capaz de determinar a presença da

fase sigma. Neste estudo foram utilizadas amostras como recebidas e tratadas na temperatura de 850 °C por 15 min. Esta condição de tratamento foi suficiente para formar 5% de fase sigma, que já é suficiente para comprometer a tenacidade do material. Assim, o ensaio utilizado mostra ser eficaz para detectar a presença de pequena quantidade de fase sigma.

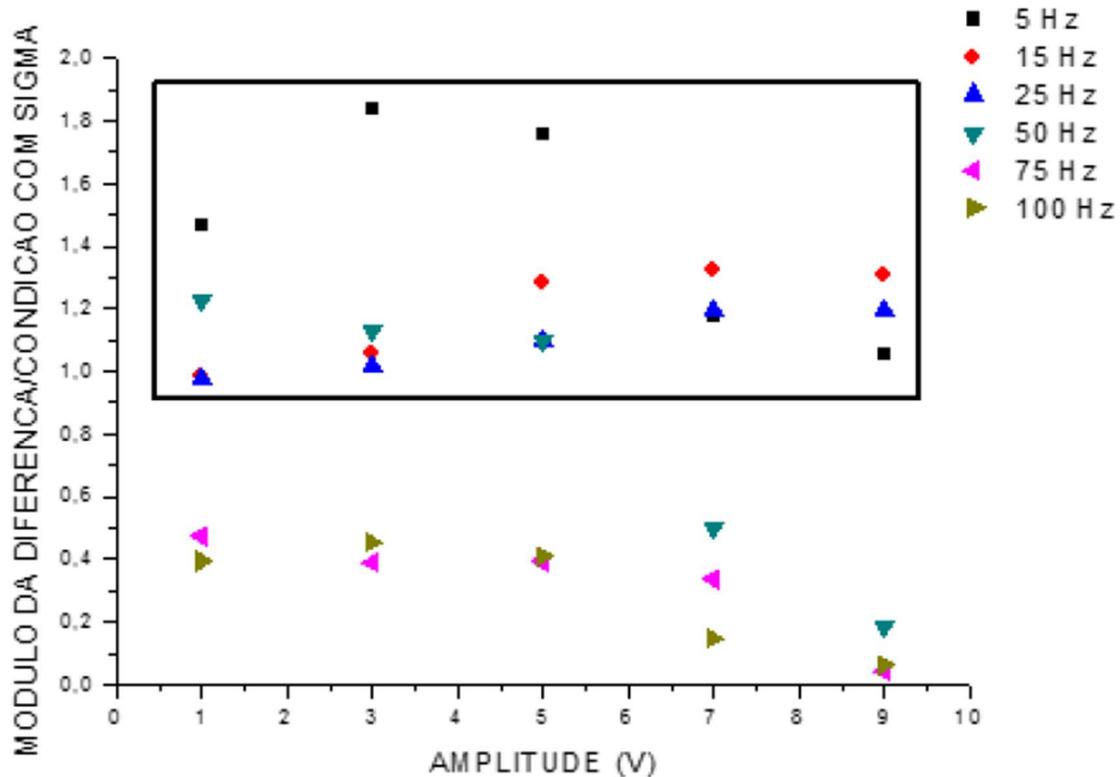
**Figura 14 - Medidas da razão entre o módulo da diferença e o valor de RMS da amostra com fase sigma, em função das amplitudes das ondas emisoras, para frequências de 5 Hz, 15 Hz, 25 Hz, 75 Hz e 100 Hz. Amostras com 4 mm de espessura.**



Fonte: VIEGAS, I. L., 2019.

A Figura 15 mostra de forma similar as melhores características da onda emissora para detecção da fase sigma para amostras com 8 mm de espessuras. Para essas amostras, foi observado um maior intervalo entre as frequências para que se fosse obtido ainda grande índice de diferença entre o módulo com as duas condições, especificamente para frequências de 5 a 25 Hz e 1 a 9 V de amplitude e com 50 Hz para amplitudes de 1 a 5 V.

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



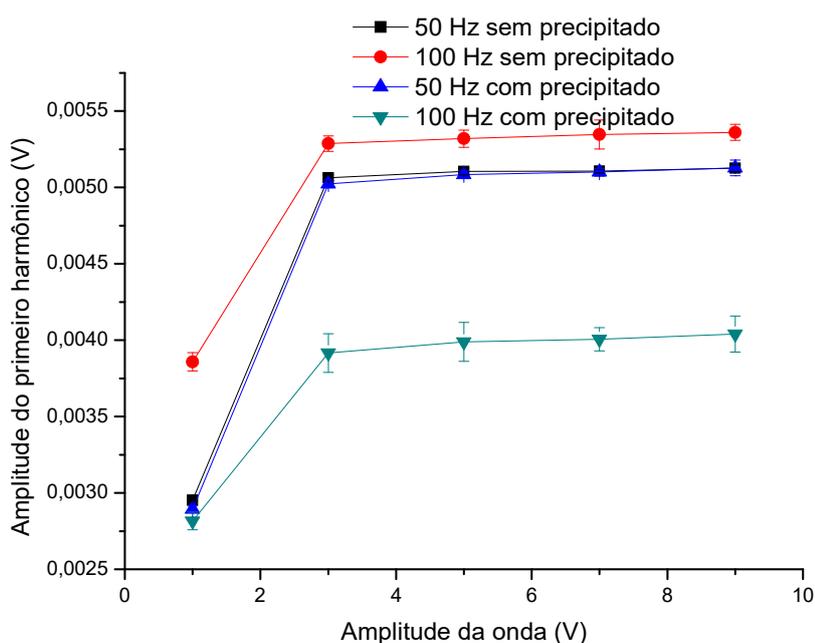
Fonte: VIEGAS, I. L., 2019.

### 2.4.3 Estudos dos harmônicos para acompanhamento de formação de microestruturas

SILVA, E. M. *et al.* (2018) realizaram um estudo em que propõem utilizar medidas do primeiro harmônico para acompanhar formação de precipitados finos, da ordem nanométrica em um aço inoxidável duplex. O experimento consistiu em uma bancada experimental onde foram aplicadas na bobina emissora, através de um gerador de sinais, ondas em formato triangular com frequências de 50 e 100 Hz e amplitude de 1, 3, 5, 7 e 9 V. Os sinais foram obtidos 5 vezes, com 20.000 pontos cada, com tempo de aquisição de 2 s, e passados para o domínio de frequência através da aplicação da FFT, determinando a média da amplitude do primeiro harmônico com intervalo de confiança de 95%.

A Figura 16 apresenta a variação das medidas de amplitude do primeiro harmônico para as ondas de frequências de 50 e 100 Hz com amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V aplicadas em amostras com e sem precipitados. Para todas as amostras é observado um aumento na amplitude de primeiro harmônico até 3 V de amplitude de onda, a partir disso, o valor ficou estabilizado, ou seja, indicam uma tendência de ficarem independentes da amplitude da onda emissora. As medidas realizadas com a frequência de 50 Hz não apresentaram diferença significativa entre as duas condições. Uma onda emissora de 100 Hz e amplitude de 5V foi escolhida para acompanhar a formação da fase alfa linha em um aço SAF 2205 para tempos até 100 horas.

**Figura 16 - Variação das medidas da amplitude do primeiro harmônico, para ondas com frequências de 50 e 100 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7, e 9 V aplicadas em amostra com e sem precipitados.**

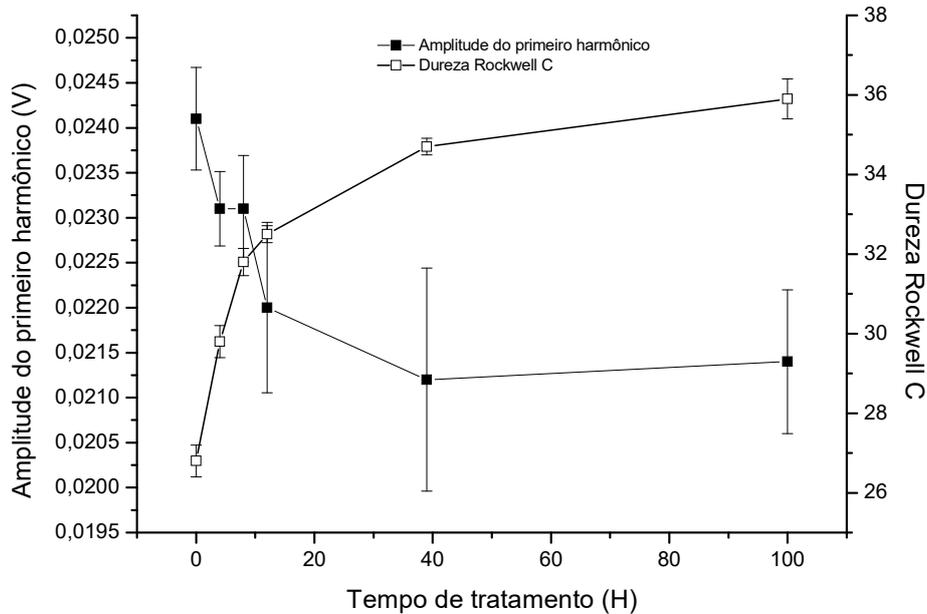


Fonte: SILVA, E.M. *et al*, 2018.

A Figura 17 mostra as medidas de dureza e amplitude do primeiro harmônico em função do tempo de tratamento. As medidas de dureza na Figura 17 apresentam uma taxa de endurecimento rápida até tempos em torno de 12 h, seguida de uma redução dessa taxa até 100 h. A fase  $\alpha'$  tem sua formação praticamente até 12 h de tratamento e após este tempo apenas a consolidação da formação. As medidas da amplitude do primeiro harmônico decrescem até

tempos em torno de 12 h e tendem a estabilizar até 100 h. Isto se deve a queda de permeabilidade do material com a formação da fase nanométrica.

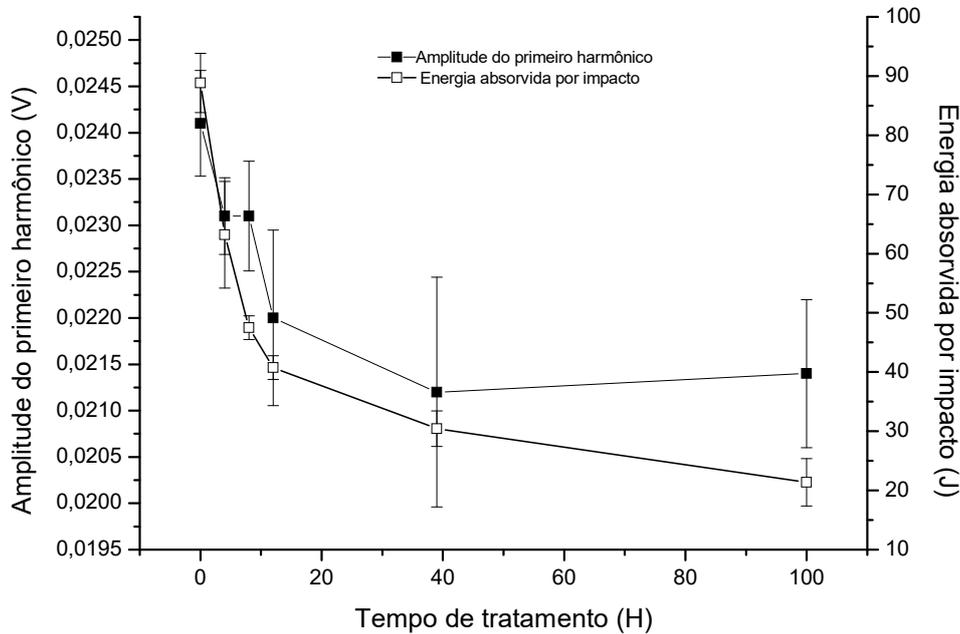
**Figura 17 - Medidas de dureza Rockwell C e de amplitude do primeiro harmônico em função do tempo de envelhecimento para amostras tratadas na temperatura de 475 °C.**



**Fonte: SILVA, E.M. et al., 2018.**

A Figura 18 representa a variação das medidas de amplitude do primeiro harmônico e das energias absorvidas por impacto em função do tempo de formação da fase fragilizante  $\alpha'$ . Esta fase se forma finamente dispersa no interior da matriz ferrita. Esta formação dificulta o deslizamento de planos atômicos e reduz a capacidade de absorver energia por impacto. Assim, à medida que a fase é formada, as medidas de energia caem até se estabilizar com a total formação dessa. As medidas de amplitude do primeiro harmônico tiveram o mesmo comportamento da energia absorvida por impacto, ou seja, queda com tendência a estabilização. A formação de precipitados finos tem a capacidade de ancorar o movimento das paredes dos domínios magnéticos e reduzir os valores de tensão.

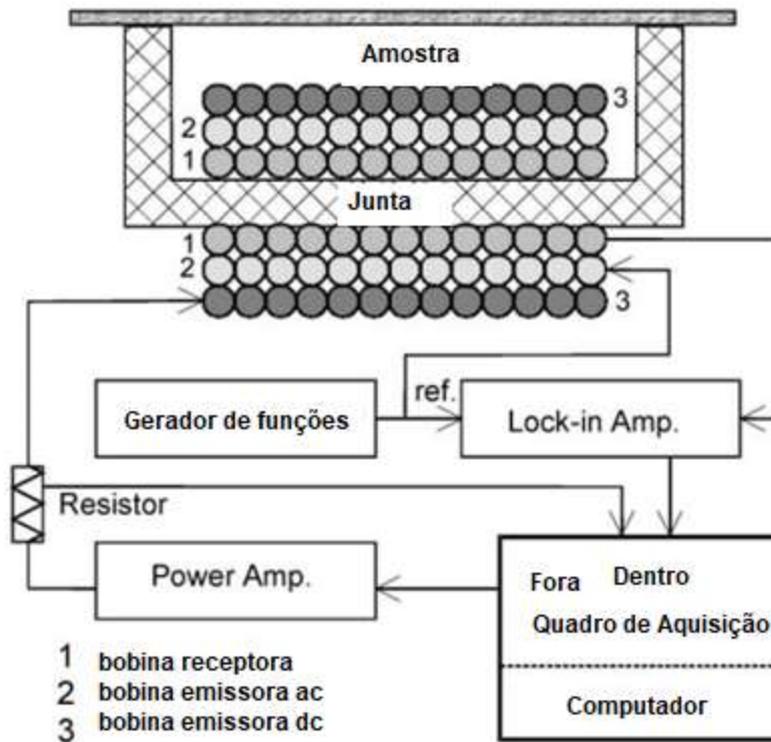
**Figura 18 - Medidas amplitude do primeiro harmônico e energia absorvida por impacto, em função do tempo de envelhecimento, para amostras tratadas na temperatura de 475. °C**



**Fonte: SILVA, E.M. et al., 2018.**

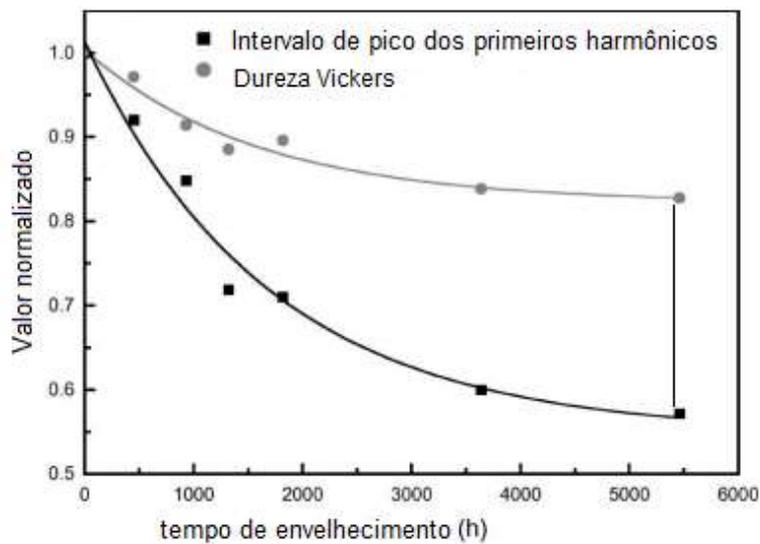
Ryu, K.S. *et al.* (2001) elaborou um experimento para estudar o envelhecimento de um aço 1Cr-1Mo-0,25V na temperatura de 630 °C para tempos de tratamentos até 5460 h. A Figura 19 mostra a configuração experimental utilizada. Esta é formada por duas bobinas emissoras e uma receptora, bem como um núcleo ferrítico em forma de U, que impõe o fluxo magnético na amostra. As mudanças no primeiro harmônico foram obtidas por um amplificador e para medir os primeiros harmônicos as amostras foram magnetizadas por corrente de onda senoidal de 0,05 Hz. Os resultados obtidos foram correlacionados com medidas de dureza Vickers, que são apresentados na Figura 20. Com base no estudo citado, os resultados gerados pela Figura 20 estão relacionando o pico do harmônico com o tempo de envelhecimento e com a dureza das amostras, onde as duas análises possuem o mesmo comportamento, concluindo que o endurecimento do aço pode ser acompanhado com os harmônicos.

Figura 19 - Diagrama de blocos para a medição dos primeiros harmônicos perfis.



Fonte: Adaptado de RYU, K.S. *et al.*, 2001.

Figura 20 – Variação dos picos dos harmônicos e dureza Vickers em função do tempo de envelhecimento.



Fonte: Adaptado de RYU, K.S. *et al.*, 2001.

Nesta seção foram apresentados estudos em que mostram que a interação entre uma onda eletromagnética e um material resultam em mudança

no sinal que estes podem ser ruídos e variações nos harmônicos e estes trazem informações da microestrutura do material e podem ser utilizados para detectar a presença de formação de novas estruturas indesejáveis devido à imposição de ciclos térmicos. Além disso, foram apresentados os fatores que influem na profundidade de penetração da aplicação de uma onda em um material ferromagnético. Estes estudos mostram a importância dos ensaios eletromagnéticos para análise de formação de constituintes em materiais devido a imposição de ciclos térmicos.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse tópico aborda-se de forma sucinta a metodologia utilizada no desenvolvimento da técnica de ensaio referida, a fim de acompanhar a formação da fase sigma, em um aço inoxidável duplex, bem como o efeito da espessura do material, através da análise da intensidade do harmônico da onda principal.

#### 3.1. MATERIAL UTILIZADO

A execução desse ensaio foi feita a partir da utilização de dezesseis amostras do AID SAF 2205, usinadas pelo processo de eletroerosão em formato circular possuindo diâmetro de 24 mm e espessuras de 2, 4, 6 e 8 mm, sendo para cada espessura: uma na condição como recebida, uma tratada em um forno de indução na temperatura de 850°C a 15 minutos e resfriadas em água e mais duas sendo tratadas na mesma temperatura e tempos de tratamento de 60 min e 120 min. O objetivo do tratamento com tempo de 15 min foi gerar 4% do constituinte sigma no material, conseguindo assim, fragilizar o mesmo para fins de análise em função da mudança de sua microestrutura e conseqüentemente suas propriedades mecânicas. As amostras foram utilizadas na dissertação de Rayssa Sousa de Andrade Toscano Lins e são parte do acervo do GSCMat do Instituto Federal da Paraíba (IFPB) (SOUSA, R., 2020). A composição química do material está descrita na Tabela 1 a seguir.

**Tabela 01 - Composição do AID SAF 2205, como recebido, em percentual 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: SOUSA, R., 2020.

### 3.2. EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL DE TESTE

O equipamento experimental de teste foi elaborado no laboratório do GSCMat do IFPB. A bancada é formada por dois módulos: um de aquisição e outro de emissão.

O módulo de emissão é formado por um gerador de função Minipa modelo MFG 4205B e uma bobina emissora. A bobina emissora é posicionada no centro da amostra e ondas senoidais de formas variadas são geradas pelo gerador de ondas que é ligado à bobina emissora. Essas ondas interagem com o material e são captadas pelo módulo de aquisição.

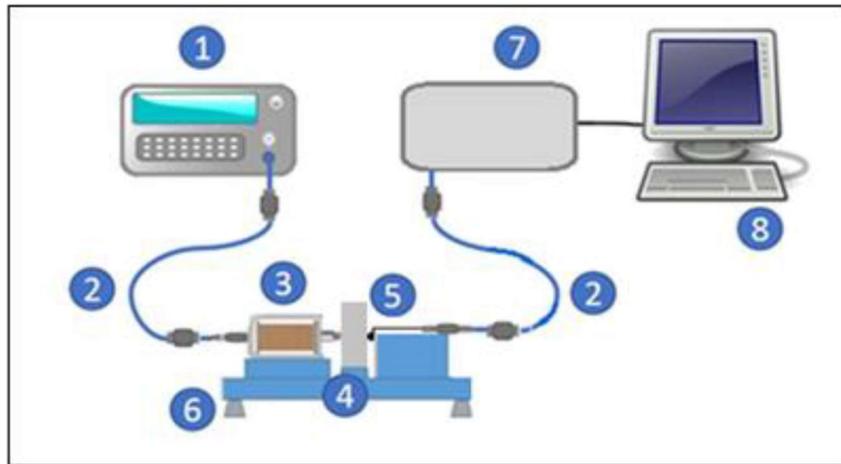
O módulo de aquisição é composto por um computador, uma placa de aquisição e um sensor de efeito Hall. Este é posicionado no centro da face oposta da amostra para que possa detectar o campo resultante da interação entre a onda emissora e a amostra. A placa de aquisição se conecta com o sensor e o computador através de cabos USB. Esta placa foi produzida no projeto Grades/Endesa do GSCMat do IFPB.

A bobina utilizada na bancada possui 6000 espiras de fios de cobre esmaltado nº 38 envoltas sobre um núcleo de aço AISI 4140 e 19,5 mm de comprimento.

O sensor que capta os dados da onda senoidal é o de efeito Hall, linear, modelo SS495 A, da fabricante Allegro Microsystems, com sensibilidade de 3,125 mVolts/Gauss, sendo alimentado por uma tensão contínua de 5 V.

A Figura 21 representa a configuração experimental utilizada no presente trabalho, sendo (1), (2) e (3) como o sistema de emissão, (5), (2), (7) e (8) o sistema de recepção.

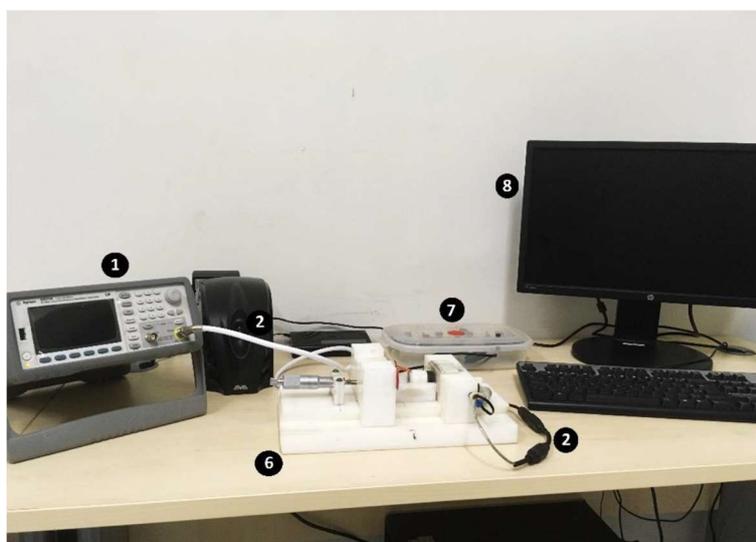
**Figura 21 - Configuração Experimental: (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (3) bobina emissora, (4) amostra, (5) sensor de efeito Hall, (6) bancada de testes com gaiola de Faraday, (7) placa de aquisição e (8) computador.**



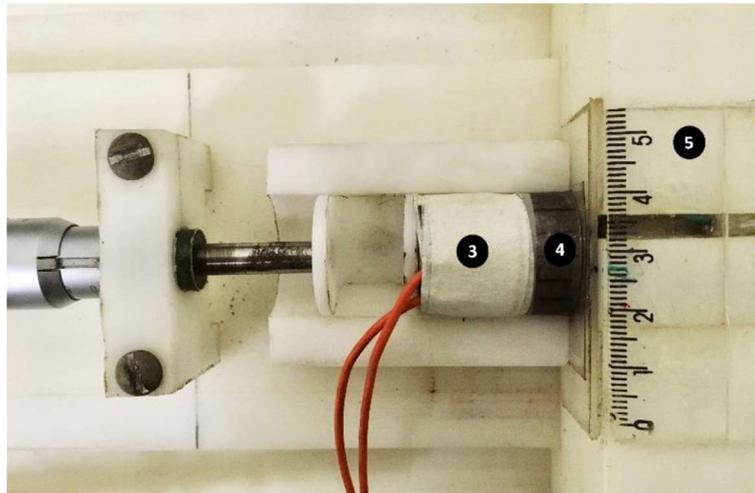
Fonte: SOUSA, R., 2020.

A bancada foi confeccionada em poliacetal e serve como apoio para a bobina, amostra e o sensor, com finalidade de minimizar a influência do material em relação ao direcionamento das linhas de campo. O equipamento de END é apresentado na Figura 22.

**Figura 22 - Configuração Experimental: (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (3) bobina emissora, (4) amostra, (5) sensor de efeito Hall, (6) bancada de testes com gaiola de Faraday, (7) placa de aquisição e (8) computador.**



(a)



(b)

Fonte: SOUSA, R., 2020.

### 3.3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A análise da onda foi executada utilizando como parâmetro o RMS da mesma. A expressão que representa o valor de RMS é mostrado na Equação (2).

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

Onde:

N: Número do elemento na sequência de medição;

$x_i$ : Amplitudes do RMB

Com a aplicação da FFT (do inglês *Fast Fourier Transform*), os RMS das amplitudes dos harmônicos da onda principal foram coletados com um intervalo de confiança de 95%.

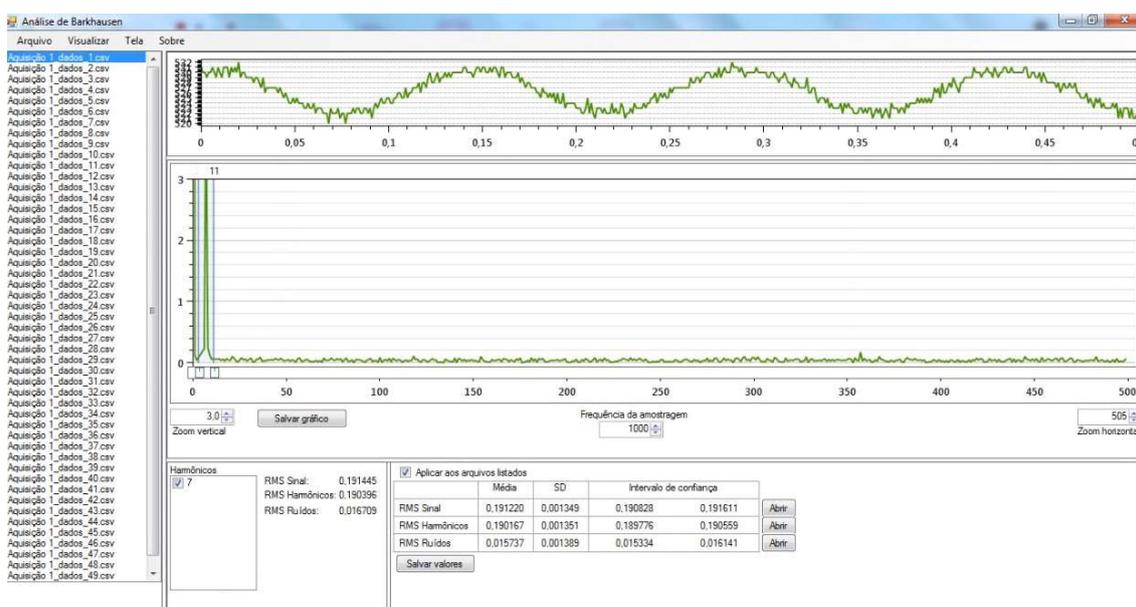
### 3.3.1. Determinação das Características da Onda Emissora para as Amostras de 8 mm

A finalidade no presente tópico era determinar a melhor onda para produzir uma amplitude de medida entre as duas condições para que haja a melhor identificação no acompanhamento da formação da fase  $\sigma$ .

Foram utilizadas duas amostras de 8 mm para determinar as características da onda emissora, uma sem apresentar precipitados, e outra tratada na temperatura de 850 °C durante 15 min.

A Figura 23 mostra a tela com a execução do programa para análise de Barkhausen, mostrando a seleção do harmônico principal da onda gerada pelos sinais. Foram aplicados sinais de ondas senoidais, com frequências de 5, 10, 15, 20, 25 e 50 Hz e de amplitudes de 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2; 3; 5; 7 e 9 V, na bobina emissora. A aquisição foi realizada com uma taxa de 1000 pontos a cada 1 s, através do sensor de efeito Hall posicionado no lado oposto da amostra em relação a bobina emissora, que detectou os sinais. Esses resultados fazem parte do banco de dados da GSCMat.

**Figura 23 - Programa para análise do ruído de Barkhausen, mostrando a seleção do harmônico principal da onda gerada pelos sinais obtidos no banco de dados da GSCMat.**



Fonte: Autor.

Capturou-se 50 sinais de cada arranjo de frequência e amplitude, para cada amostra, a fim de analisar de maneira comparativa a maior diferença de RMS entre as amostras com e sem tratamento, com objetivo de reduzir a faixa de erro.

As ondas senoidais aplicadas tiveram seus sinais passados para o domínio da frequência através do FFT, após isso foram selecionados o primeiro harmônico para cada onda e determinado o RMS dos mesmos. O parâmetro de RMS dos harmônicos das ondas principais são os de análise da detecção da fase sigma do presente trabalho.

### **3.3.2. Estudo da espessura do material em função dos tempos de tratamentos**

As melhores condições na análise da amostra de 8 mm foram empregadas nas amostras com 2, 4, 6 e 8 mm, afim de determinar o efeito da espessura nas medidas realizadas, em função do envelhecimento na temperatura de maior cinética de formação de sigma 850 °C e tempos de 15, 60 e 120 min.

### **3.3.3. Correlação com ensaios consolidados**

Os resultados obtidos pelo ensaio eletromagnético foram correlacionados com os ensaios consolidados de dureza Rockwell C e de energia absorvida por impacto das amostras com e sem a formação da fase sigma.

Os valores de energia absorvida foram obtidos por ensaio de impacto Charpy e constam no Banco de dados do laboratório. Cinco amostras para cada condição foram confeccionadas e ensaiadas. Os ensaios de dureza Vickers foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos do IFPB, campus João Pessoa, sendo medidas cinco durezas de cada condição.

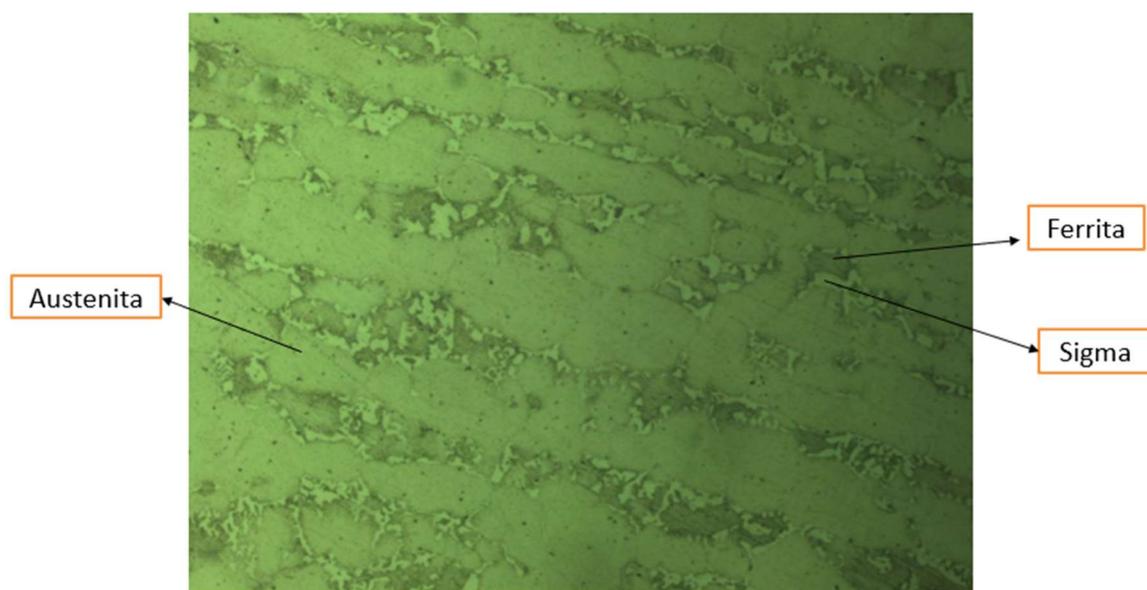
### **3.3.4 Análise microestrutural**

A amostra de aço inoxidável SAF 2205 tratada a 850 °C por 120 min foi submetida ao processo de lixamento e polimento metalográfico e atacada pelo processo de polimento eletrolítico com o reagente KOH 10%, sendo aplicada uma tensão de 5 V por um tempo de 30 segundos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 24 mostra a microscopia óptica da amostra tratada na temperatura de 850 °C por 2 horas. Nesta observa-se a formação do constituinte sigma em regiões cinza escuro denominada de ferrita. Sigma é formada nos contornos de grãos da ferrita e nas regiões da austenita não se observa transformações (TAVARES, 2010).

Figura 24. Microscopia óptica da amostra tratada na temperatura de 850 °C por 2 horas.



Fonte: Autor.

O constituinte sigma é paramagnético e tem uma formação grosseira nos contornos de grãos dentro da ferrita. Essa influencia na densidade de fluxo magnético que atravessa o material diminuindo o ferromagnetismo e serve como ponto de ancoragem para o movimento das paredes dos domínios magnéticos.

Na próxima seção será determinada as características das melhores ondas senoidais para detectar a presença de sigma, em um aço inoxidável duplex de 8 mm de espessura.

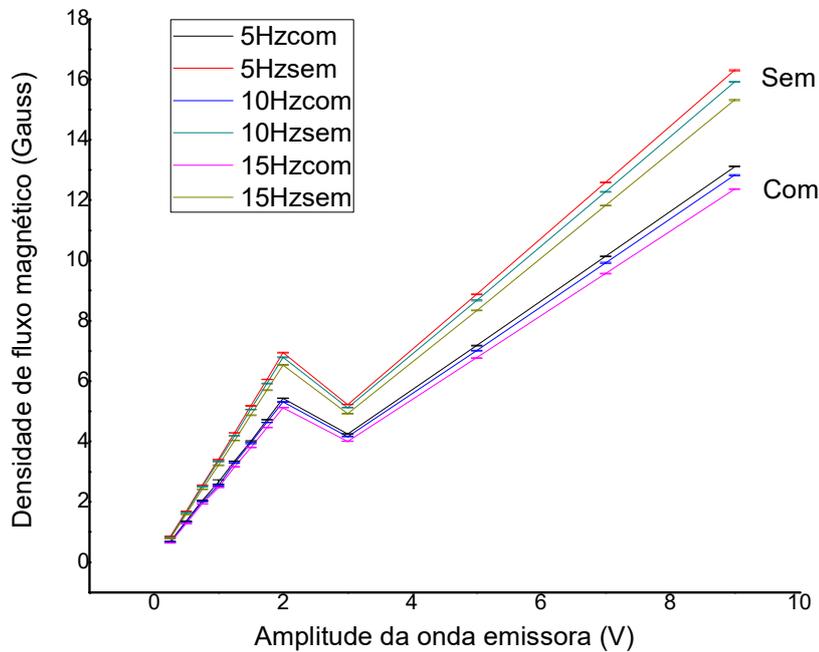
### 4.1 DETERMINAÇÃO DAS MELHORES ONDAS PARA ESPESSURA DE 8 MM.

A interação entre uma onda transmitida ao material e a sua microestrutura provoca distorções na onda tanto na forma de ruído, que é denominado de magnético de Barkhausen, como distorções nos harmônicos da onda principal. Este último foi abordado a partir da aplicação de ondas emissoras de frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz. Estas frequências foram escolhidas por serem aplicadas em ensaios para acompanhamento de microestruturas prejudiciais às propriedades de tenacidade de materiais através da análise do ruído magnético de Barkhausen. (KALELI *et al.*, 2020, TAVARES *et al.*, 2019, YAMAZAKI *et al.*, 2019, GHANEI *et al.*, 2014a, NORMANDO *et al.*, 2010).

A Figura 25 mostra a variação da densidade de fluxo magnético em função da amplitude da onda emissora, para frequências de 5 Hz, 10 Hz e 15 Hz aplicadas nas condições como recebida e tratada a 850 °C por 15 min. Nota-se da Figura 25 uma redução para as medidas de densidade de fluxo magnético para a amostra tratada, para as frequências estudadas. Esta redução está associada ao paramagnetismo da fase sigma formada e ao bloqueio do movimento das paredes dos domínios magnéticos com a formação dos precipitados (SILVA *et al.*, 2016a).

Observa-se também da Figura 25, que a aplicação das três frequências, indica um crescimento nos valores de densidade de fluxo magnético e a diferença entre as condições com e sem tratamento. À medida que se aumenta a amplitude da onda emissora tem-se o aumento do fluxo magnético e detecção de uma maior quantidade de fase paramagnética e o aumento da diferença entre as duas condições estudadas. Isto indica que a queda observada para as amplitudes de 2 V e 3 V da onda emissora se deve possivelmente ao crescimento da detecção do paramagnetismo que passa a superar ao de bloqueio do movimento das paredes dos domínios magnéticos.

**Figura 25 - Variação da densidade de fluxo magnético em função da amplitude da onda emissora, para amostras com e sem precipitado e frequências de 5 Hz, 10 Hz e 15 Hz.**

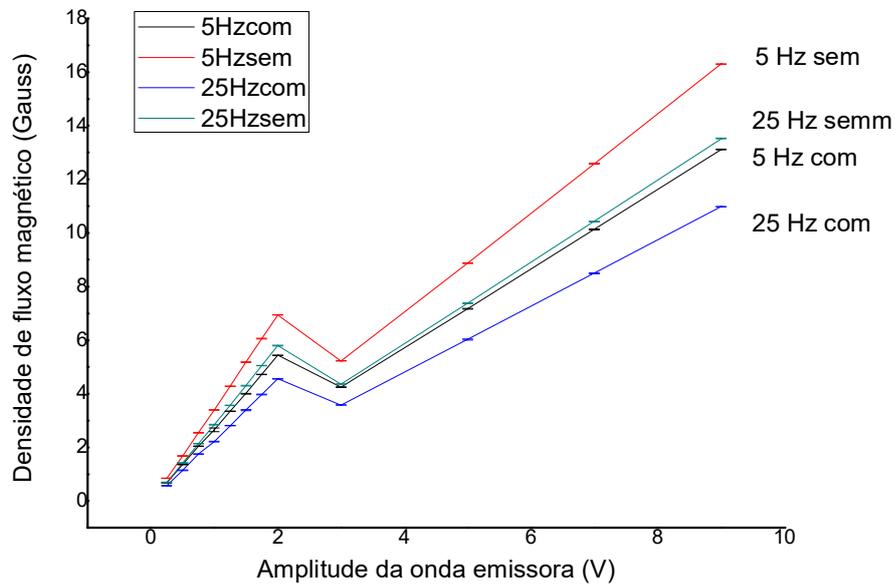


**Fonte: Autor.**

A Figura 25 mostra também um comportamento semelhante entre os resultados obtidos com as ondas com frequências de 5 Hz, 10 Hz e 15 Hz, sendo esses deslocados para valores menores a medida que a frequência aumenta. Isto indica o efeito da profundidade de penetração do sinal que é inverso ao valor da frequência.

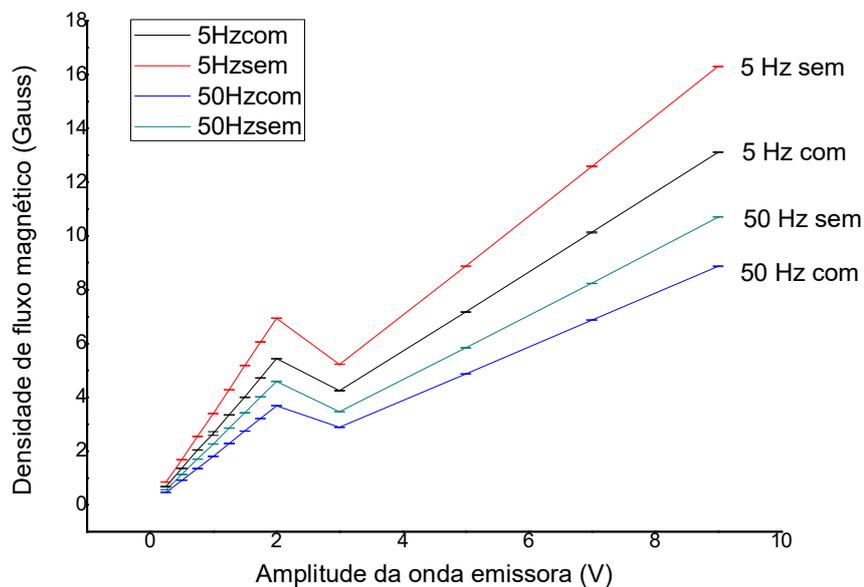
As Figuras 26 e 27 mostram a comparação da aplicação de ondas com frequências de 5 Hz com as frequências de 25 Hz e 50 Hz, respectivamente. Nestas podem ser observadas que a aplicação da onda de 25 Hz e 50 Hz tem uma redução maior nos valores de densidade de fluxo magnético para as amplitudes estudadas. Esta redução se deve possivelmente a dois fatores: a presença do constituinte austenita do aço inoxidável duplex, que é paramagnética, pois a redução ocorre tanto para a condição com e sem a presença do constituinte sigma e pelo aumento da profundidade de penetração ser inversamente proporcional ao aumento da frequência, pois o sensor está posicionado na superfície oposta da bobina emissora.

**Figura 26 - Variação da densidade de fluxo magnético em função da amplitude da onda emissora, para amostras com e sem precipitado e frequências de 5 Hz e 25 Hz.**



Fonte: Autor.

**Figura 27 - Variação da densidade de fluxo magnético em função da amplitude da onda emissora, para amostras com e sem precipitado e frequências de 5 Hz e 50 Hz.**



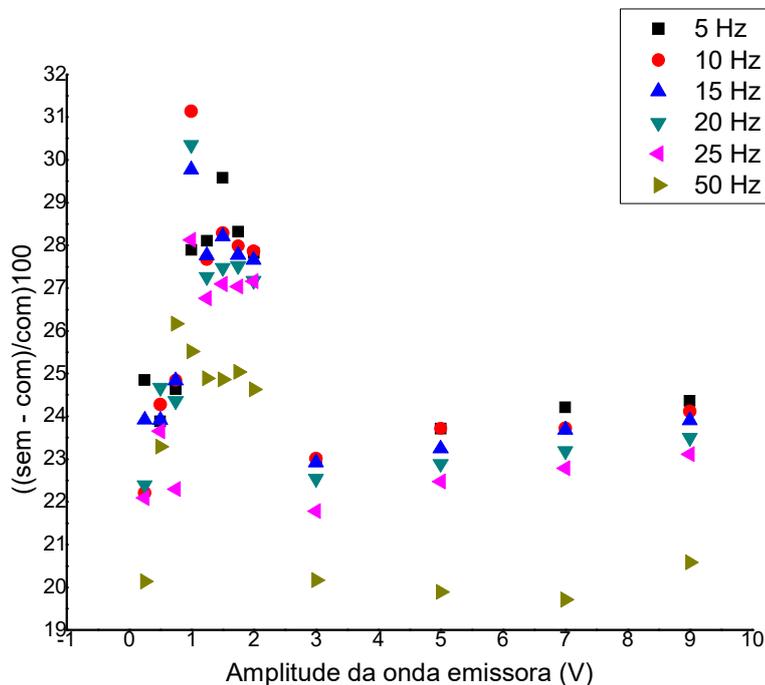
Fonte: Autor.

A fim de determinar a melhor região de trabalho entre as ondas estudadas foram determinadas as variações em porcentagem entre as condições como recebida e tratada. A Figura 28 apresenta a variação em porcentagem em função

da amplitude da onda emissora para as frequências estudadas. Nota-se que as maiores porcentagem ficaram na região de amplitudes entre 1 V e 2 V, em que as diferenças ficaram acima de 27,5%. Esta região apresenta maiores amplitudes de medidas para detecção da fase sigma. A Figura 28 mostra que a aplicação de ondas com amplitudes de 3 V a 9 V apresentaram valores inferiores a 24% e pouca variação no crescimento entre elas.

A Figura 28 mostra que a aplicação de ondas com frequências de 50 Hz apresenta, no intervalo de amplitudes de 1 V a 2 V, valores entre 25 e 27%. A redução dos valores em porcentagem entre as duas condições para a frequência de 50 Hz indica possivelmente a combinação do efeito do paramagnetismo do constituinte austenita e a redução da profundidade de penetração com o aumento da frequência. Os valores mais baixos da diferença entre as duas condições, para as demais amplitudes tiveram menores valores para a onda com frequência de 50 Hz.

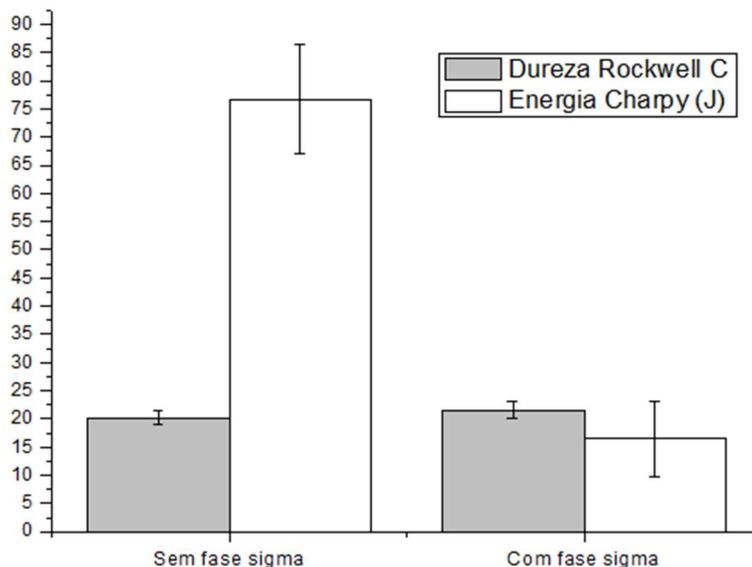
**Figura 28 - Variação da porcentagem de amplitude de medidas entre a condição com e sem a fase sigma, para aplicação de ondas emissoras de frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 25 Hz e 50 Hz.**



Fonte: Autor.

A Figura 29 mostra as medidas de durezas obtidas no presente trabalho e as de energia absorvida por impacto da mesma placa estudada (FIALHO, 2015). Pode-se notar da Figura 29 que a quantidade de 4% de fase sigma formada provoca um pequeno aumento de dureza de 20,14 +/- 1,26 para 21,6 +/- 1,44, ou seja, uma diferença de 7,2%. Contudo, as medidas de energia absorvida caem de 76,67 J +/- 9,73 J para 16,5 J +/- 6,69 J mostrando uma diferença de 78,5%. Esta diferença deve-se a fase sigma que tem dureza em torno de 1000 HV e comprometer a tenacidade do material (TAVARES, 2010). As medidas de densidade de fluxo magnético tiveram uma variação acima de 27,5% para ondas senoidais com amplitudes na faixa de 1 V até 2 V e frequências de 5 Hz a 25 Hz. Isto indica ser um ensaio eletromagnético não destrutivo capaz de detectar os 4% de fase sigma.

**Figura 29 – Medidas de dureza Rockwell C e energia absorvida por impacto Charpy (FIALHO, 2015) para as condições com e sem a presença da fase sigma.**



**Fonte: Autor.**

O estudo do efeito da espessura de 8 mm mostrou que a aplicação de sinais senoidais com amplitudes de 1 V a 2 V, entre as ondas analisadas, apresentam os melhores resultados para o acompanhamento do constituinte sigma através da análise do primeiro Harmônico. A partir disso foi escolhido a

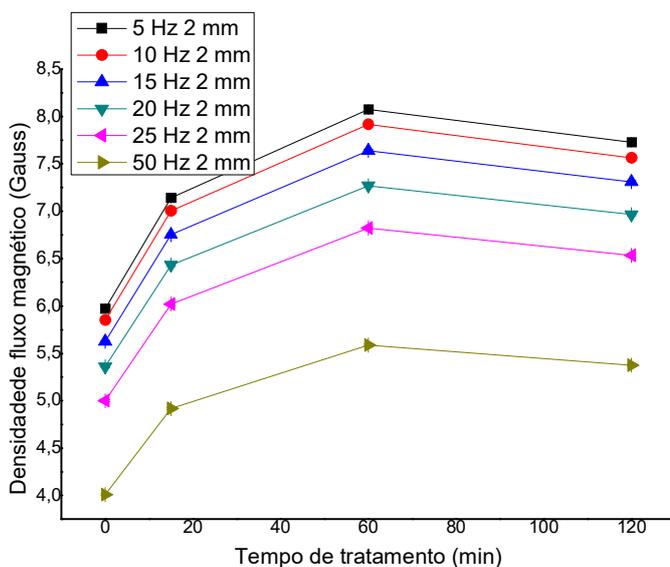
aplicação de ondas de 1 V para o estudo do efeito da espessura do aço inoxidável em estudo.

#### 4.2 ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA NO ACOMPANHAMENTO DE SIGMA

As Figuras 30, 31, 32 e 33 mostram as variações das densidades de fluxo magnético em função do tempo de tratamento para as espessuras de 2 mm, 4 mm, 6 mm e 8 mm, respectivamente, com aplicação de ondas emissoras senoidais de frequências de 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz e 50 Hz e amplitude de 1 V. Nota-se da Figura 30 que a densidade de fluxo magnético cresce e tende a estabilizar em um patamar para a espessura de 2 mm, enquanto que para Figura 32 e espessura de 8 mm observa-se uma queda com tendência de estabilização, ou seja, um comportamento inverso ao da espessura de 2 mm. Além disso, o comportamento para as espessuras de 4 mm (Figura 30) e 6mm (Figura 31) mostram uma transição de comportamento observado para as espessuras de 2 mm e 8 mm.

A Figura 30 mostra os resultados para a amostra de 2 mm de espessura. Pode-se observar um aumento até 60 min e uma leve queda para 120 min. Este comportamento é observado para todas as frequências estudadas. Como o sensor de efeito Hall está posicionada na superfície oposta da bobina emissora, para a mesma densidade de fluxo aplicada pela bobina emissora, um fluxo maior chega no lado oposto para menores espessuras. O aumento da densidade de fluxo magnético para tempos até 60 min está associado a um maior alinhamento dos domínios que supera ao efeito do paramagnetismo do constituinte sigma. Todavia, a queda para o tempo de tratamento de 120 min, deve-se possivelmente ao paramagnetismo da fase sigma começar a superar ao efeito dos alinhamentos dos domínios. A influência do paramagnetismo da austenita também tem sido observada por Tavares *et al.*, (2019).

**Figura 30 – Gráfico da amplitude de onda captada em relação ao tempo para amostras de 2 mm para 1 V.**

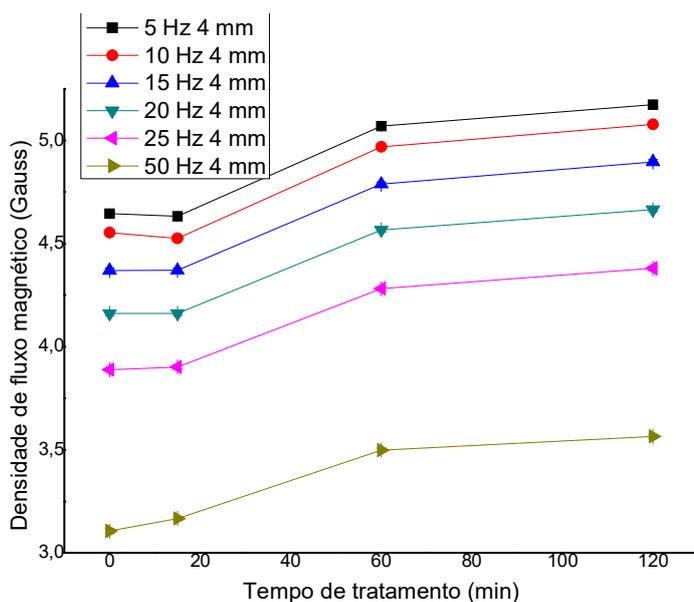


**Fonte: Autor.**

Observa-se também da Figura 30 uma queda nos valores de densidade de fluxo magnético com o aumento da frequência. A profundidade de penetração da densidade de fluxo magnético é inversamente proporcional ao valor da frequência da onda emissora aplicada. Um valor de 6 Gauss é observado para a condição sem tratamento para a frequência de 5 Hz e 4 Gauss para a de 50 Hz. Este efeito da frequência tem sido mostrado no estudo de Radtke, (2001), em que além da frequência é apresentado a influência da permeabilidade do material sobre a profundidade de penetração da densidade de fluxo magnético.

A Figura 31 mostra o comportamento para a espessura de 4 mm. Observa-se uma redução nas medidas da densidade de fluxo magnético em relação a espessura de 2 mm. Nota-se pouca variação entre a condição sem tratamento e a condição de 15 min de tratamento. Esta diferença não é suficiente para detectar a presença do constituinte sigma para 15 min de tratamento, para as frequências de 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz e 25 Hz, sendo observado uma leve diferença para 50 Hz. Contudo, até o tempo de 120 min ocorreu crescimento nos valores. Este aumento se deve ao deslocamento das paredes dos domínios magnéticos e alinhamento destes.

**Figura 31 – Gráfico da amplitude de onda emissora em relação ao tempo para amostras de 4 mm para 1 V.**

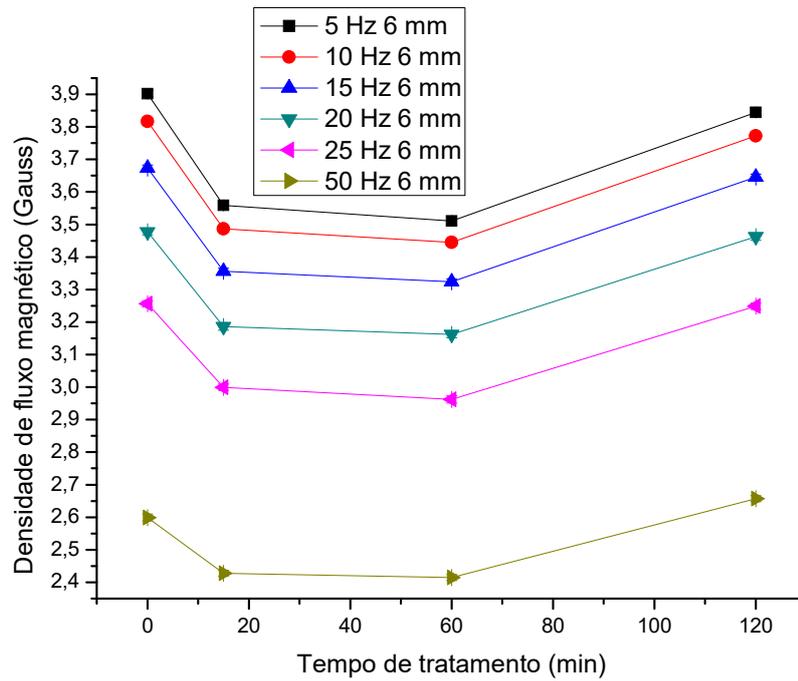


**Fonte: Autor.**

A Figura 32 apresenta o efeito da espessura de 6 mm. O aumento da espessura reduz ainda mais a densidade de fluxo magnético medido pelo sensor de efeito Hall. Todavia, para esta espessura a presença do constituinte sigma já é detectado, mesmo para o tempo de 15 min. Contudo, para tempo de 120 min, o efeito do aumento da densidade de fluxo magnético é devido a interação das paredes dos domínios com o constituinte sigma.

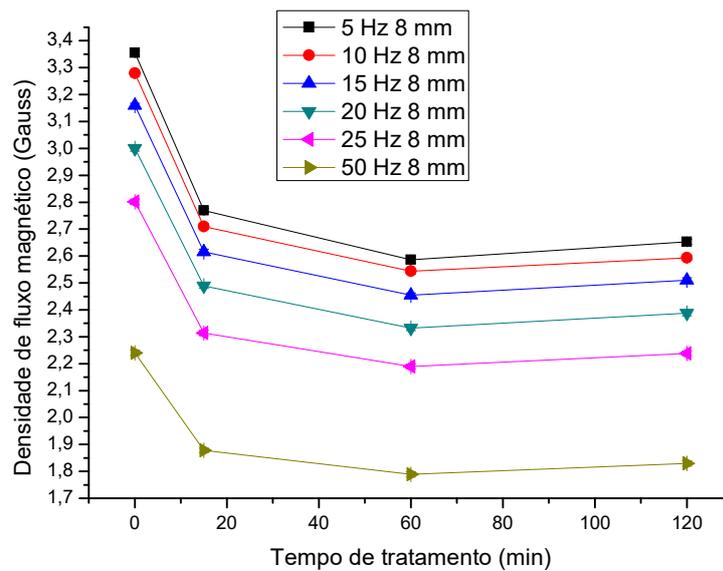
A Figura 33 mostra o comportamento para a espessura de 8 mm. Esta apresenta uma queda nos valores de densidade de fluxo magnético seguido de uma estabilização para valores acima de 60 min. Este comportamento é o inverso do observado para os resultados obtidos com a espessura de 2 mm. Esta mudança de comportamento se deve a intensidade de fluxo magnético aplicado e o constituinte sigma, ou seja, o fluxo menor é bloqueado pelo aumento do precipitado e redução da densidade de fluxo magnético resultante da interação estudada. Deste modo, a densidade de fluxo magnético aplicado é um parâmetro importante de ensaio, que tem efeito direto no comportamento em função da espessura do material a ser estudado.

**Figura 32 – Gráfico da amplitude de onda emissora em relação ao tempo para amostras de 6 mm para 1 V.**



Fonte: Autor.

**Figura 33 – Gráfico da amplitude de onda emissora em relação ao tempo para amostras de 8 mm para 1 V.**



Fonte: Autor.

Observou-se no presente trabalho que o comportamento da variação da densidade de fluxo magnético em função do tempo de tratamento na temperatura de 850 °C depende da espessura do material. A presença do sensor na superfície oposta vai detectar a presença de um fluxo maior ou menor em função da espessura. Para o acompanhamento da formação do constituinte sigma em um mesmo material neste caso, há a necessidade de correção do efeito da espessura.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho fez uma análise do harmônico de ondas eletromagnéticas para análise de microestruturas fragilizante em um aço inoxidável duplex, sendo aplicado ondas senoidais com frequências de 5 Hz a 50 Hz e amplitudes de 1 V a 9 V chegando às seguintes conclusões:

- O estudo dos harmônicos foi capaz de detectar a presença de fase sigma do aço inoxidável duplex estudado. As medidas de densidade de fluxo magnético reduziram com a presença da fase sigma formada devido ao paramagnetismo e bloqueio dos movimentos dos domínios magnéticos pela presença dos precipitados formados.
- As ondas com frequências de 5Hz a 50Hz apresentaram comportamento similares para as condições com e sem a presença da fase sigma, ou seja, crescimento linear na densidade de fluxo magnético com presença de um patamar no intervalo de 2 V a 3 V.
- As ondas com amplitudes na faixa de 1 V até 2 V mostram ter as melhores amplitudes de medidas para acompanhamento da formação da fase sigma, com valores acima de 27%, para as frequências estudadas.
- A variação da densidade de fluxo magnético mostrou ter dependência com a espessura do material. Amostras com 2 mm de espessura apresentam comportamento inverso ao de 8 mm, sendo que as espessuras de 4 mm e 6 mm apresentam a transição. A redução da espessura indica uma penetração maior de fluxo magnético e a necessidade de correção do efeito da espessura para comparação entre amostras com espessuras diferentes.

## PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

- Esclarecer o fator que leva a formação do patamar formado no intervalo de 1 V a 2 V para os sinais estudados.
- Fazer um estudo do fator de correção do efeito da espessura para que ensaios em um mesmo material e com espessura diferente possam ser comparados.
- Estudar o efeito da espessura em materiais com permeabilidade diferentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIEZMA, M.V.; MARTIN, U.; LINHARDT, P.; RESS J.; RODRÍGUEZ, C.; BASTIDAS, D.M. Nondestructive techniques for the detection of sigma phase in duplex stainless steel: A comprehensive review. **Engineering Failure Analysis**, 2021.

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

CALDAS-MORGAN, M.; PADOVESE, L. R. Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational Barkhausen method. **NDT&E Int.**, v. 45, p. 148–155, 2012.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 8. ed. 2007,

CAMERINI, C. G., **Desenvolvimento de Sondas de Correntes Parasitas para Detecção e Quantificação de Fase Sigma em Aço Inoxidável Duplex**. 2012. Dissertação de M.Sc., COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.

CARVALHO, J. A. F. **Ensaio eletromagnético baseado no ruído de Barkhausen para Acompanhamento de formação de transformações microestruturais**. 2018. 61 p. Dissertação, Mestrado em Eletromagnetismo Aplicado – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

CULLITY, B. C.; GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2. ed. [S.I.]: Wiley & Sons, 2009.

DUCHARNE, B.; LE, M. Q.; SEBALD, G.; COTTINET, P. J.; GUYOMAR, D.; HEBRARD, Y. **Characterization and modeling of magnetic domain wall**

**dynamics using reconstituted hysteresis loops from Barkhausen noise**, *J. Magn. Mater.*, v. 432, p. 231–238, 2017.

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

GHANEI, S. et al. **Eddy current nondestructive evaluation of dual phase steel**. *Materials and Design*. n.50, p. 491–496, 2013.

GHANEI, S.; KASHEFI, M.; MAZINANI, M. **Comparative study of eddy current and Barkhausen noise nondestructive testing methods in microstructural examination of ferrite-martensite dual-phase steel**. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 356, p. 103–110, 2014a.

GHANEI, S.; ALAM, A. S.; KASHEFI, M.; MAZINANI, M. **Nondestructive characterization of microstructure and mechanical properties of intercritically annealed dual-phase steel by Barkhausen noise technique**. *Materials Science and Engineering: A*, v. 607, 2014b.

İSPIRLİ, M. M.; YILMAZ, A. E. An investigation on characteristics of tracking failure in epoxy resin with harmonic and fractal dimension analysis, *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, v. 26, p. 245–256, 2018.

KALETI, T.; GUR, C.H. Determination of surface residual stresses in carburised AISI 8620 steel by the magnetic Barkhausen noise method, *The British Institute of Non-Destructive Testing*; v. 62, n. 7, p. 416-421, 2020

LINS, R. S. de A. T. **Ensaio eletromagnético para análise do ruído de Barkhausen por meio de um sensor de campo magnético**. 2020. 71 p. Dissertação, Mestrado em Engenharia Elétrica, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

LO, I.S.; MCKERCHER, B.; LO, A.; CHEUNG, C.; ELAW. Introducing COBRA: exploring motivations for brand-related social media use. *International Journal of Advertising*, n.30, p. 13-4, 2011.

MATLACK, K. H.; KIM, J. Y.; JACOBS, L. J.; QU, J. Review of second harmonic generation measurement techniques for material state determination in metals. *J. Nondestruct. Eval.*, v. 34, n. 1, 2015.

MIESOWICZ, K., W.; STASZEWSKI, J.; KORBIEL, T. Analysis of Barkhausen noise using wavelet-based fractal signal processing for fatigue crack detection, *Int. J. Fatigue*, v. 83, p. 109–116, 2016.

NDT RESOURCE CENTER, 2022. Disponível em: [Nondestructive Evaluation Techniques : Eddy Current Testing \(nde-ed.org\)](https://www.nde-ed.org). Acesso em: 21/08/2022.

NORMANDO, P. G.; MOURA, E. P.; SOUZA, J. A.; TAVARES, S. S. M.; PADOVESE, L. R. Ultrasound, eddy current and magnetic Barkhausen noise as tools for sigma phase detection on a UNS S31803 duplex stainless steel, *Mater. Sci. Eng. A*, v. 527, n. 12, p. 2886–2891, 2010.

PEREIRA, P. A. S. de. **Estudo preliminar da aplicação da técnica de correntes parasitas visando a inspeção submersa de elementos combustíveis**. 2007. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Centro de Ciência e tecnologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

RADTKE, U.; ZIELKE, R.; RADEMACHER, H. G. Application of magneto-optical method for real-time visualization of eddy currents with high spatial resolution for nondestructive testing. *Optics and Lasers in Engineering*. n. 36, p. 251–268, 2001.

RYU, K. S.; PARK, J. S.; NAHM, S. H.; YU, K. M.; KIM, Y. B.; SON, D. Nondestructive evaluation of aged 1Cr-1Mo-0.25 V steel by harmonic analysis of induced voltage, *J. Magn. Mater.*, v. 231, n. 2–3, p. 294–298, 2001.

SEDRIKS, A. J. **Corrosion of stainless steel**. 2. ed. New York: Wiley-Interscience, 1996.

SILVA, E. M., LINS, R. S. A. T., LIMA, A. F. P., LEITE, A. M. R. P., ARAÚJO, B. R. **Acompanhamento de microestrutura paramagnética fragilizante usando análise harmônica da tensão induzida**. *XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais – SBrT2018*. Campina Grande, 2018

SILVA, E. de M.; MARINHO, L.; FILHO, P.; LEITE, J. P.; LEITE, J.; FIALHO, W.; DE ALBUQUERQUE V.; TAVARES, J. **Classification of induced magnetic field signals for the microstructural characterization of sigma phase in duplex stainless steels**; *Metals (Basel)*., v. 6, n. 7, p. 164, 2016a.

SILVA, E. M., LEITE, J. P.; FRANÇA NETO, F. A. DE, LEITE, J. P., FIALHO, W. M. L., DE ALBUQUERQUE, V. H. C., AND TAVARES, J. M. R. S. **Evaluation of the Magnetic Permeability for the Microstructural Characterization of a Duplex Stainless Steel**. *J. Test. Eval.*, v. 44, n. 3, p. 20130313, 2016b.

SILVA, E. M.; PAULA, A. M. R.; LEITE, J. P.; LEITE, J. P.; ANDRADE, L. S. S.; ALBUQUERQUE, V. H. C. AND TAVARES, J. M. R. S. **Detection of the Magnetic Easy Direction in Steels Using Induced Magnetic Fields**. *Metals - Open Access Metallurgy Journal*, v. 6, n. 12, p. 317, 2016c.

SILVA, E. de M.; LEITE, J. P.; LEITE, J. P.; FIALHO, W. M. L.; DE ALBUQUERQUE, V. H. C.; TAVARES, J. M. R. S. **Induced magnetic field used to detect the sigma phase of a 2205 duplex stainless steel**, *J. Nondestruct. Eval.*, n. 2, p. 38, 2016d.

SOUSA, R.S.A.T.L. **Ensaio Eletromagnético para Análise do Ruído de Barkhausen por Meio de um Sensor de Campo Magnético**. 2020. 75 p. Dissertação, Mestrado em Engenharia Elétrica, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

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, p. 175–191, 2010.

TAVARES, S. S. M.; NORIS, L. F.; PARDAL, DA SILVA, M, J. M. Temper embrittlement of supermartensitic stainless steel and non-destructive inspection by magnetic Barkhausen noise; *Engineering Failure Analysis*, v. 100, p. 322–328, 2019.

TWI Global, 2022. Disponível em: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/jobknowledge/eddy-current-testing-123>. Acesso em: 21/08/2022.

VIEGAS, I. L. **Estudo da aplicação de ondas senoidais para detecção da fase sigma pela análise do ruído de Barkhausen**; 2019. 58 p. Dissertação, Mestrado em Engenharia Elétrica, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

YAMAZAKI, T.; FURUYA, Y.; NAKAO, W. Experimental evaluation of domain wall dynamics by Barkhausen noise analysis in Fe<sub>30</sub>Co<sub>70</sub> magnetostrictive alloy wire; *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 475, n. April, p. 240–248, 2019.

XIA, D. H.; SONG, S. Z.; BEHNAMIAN, Y. Detection of corrosion degradation using electrochemical noise (EN): review of signal processing methods for identifying corrosion forms. *Corros. Eng. Sci. Technol.*, v. 51, n. 7, p. 1–18, 2016.