



**Rayssa Sousa de Andrade Toscano Lins**

# **Ensaio Eletromagnético para Análise do Ruído de Barkhausen por Meio de um Sensor de Campo Magnético**

**João Pessoa - PB  
Agosto de 2020**



**Rayssa Sousa de Andrade Toscano Lins**

## **Ensaio Eletromagnético para Análise do Ruído de Barkhausen por Meio de um Sensor de Campo Magnético**

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

Área de Concentração: Telecomunicações

Edgard de Macedo Silva, Doutor  
Orientador

João Pessoa – PB, Agosto de 2020  
©Rayssa Sousa de Andrade Toscano Lins – rayssasatlins@gmail.com

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

L759e	<p>Lins, Rayssa Sousa de Andrade Toscano. Ensaio eletromagnético para análise do ruído de Barkhausen por meio de um sensor de campo magnético / Rayssa Sousa de Andrade Toscano Lins. – 2020. 74 f. : il.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba – IFPB / Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Orientador: Prof. Dr. Edgard de Macedo Silva.</p> <p>1. Engenharia elétrica. 2. Ensaio eletromagnético. 3. Ruído Magnético de Barkhausen (RMB). 4. Aço Inoxidável Duplex (AID). 5. Sensor Hall. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 537.8</p>
-------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Rayssa Sousa de Andrade Toscano Lins

# **Ensaio Eletromagnético para Análise do Ruído de Barkhausen por Meio de um Sensor de Campo Magnético**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal 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 25 / 09 / 2020.

## **BANCA EXAMINADORA**



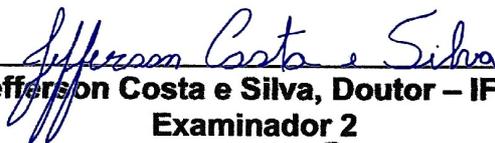
---

**Edgard de Macedo Silva, Doutor – IFPB**  
**Orientador**



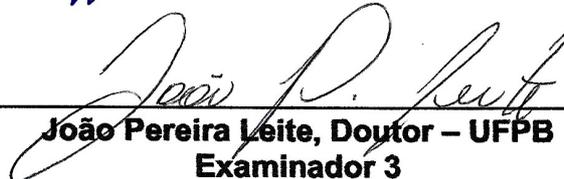
---

**Alfredo Gomes Neto, Doutor – IFPB**  
**Examinador 1**



---

**Jefferson Costa e Silva, Doutor – IFPB**  
**Examinador 2**



---

**João Pereira Leite, Doutor – UFPB**  
**Examinador 3**

João Pessoa – PB  
Agosto de 2020

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, meu pai, meu amigo e meu porto seguro, por iluminar o meu caminho, sempre agindo com provisão sobre a minha vida, suprimindo as minhas necessidades e me dando a força necessária em todos os momentos.

A minha querida mãe, Sandra, e aos meus avós, Socorro e Zé Cazé, por todo amor, carinho, cuidado e proteção. Sobretudo, pela educação que me deram, princípios e valores que me passaram, apoio, orientação e incentivo nos momentos mais decisivos e difíceis. Enfim, por todo esforço, dedicação e renúncia, e ainda, por acreditarem e investirem em mim.

Aos meus irmãos, Sara e Felipe, ausentes e tão presentes em meu coração, inspiração para eu ser uma pessoa cada vez melhor, sempre pronta para ajudá-los.

Ao professor Edgard, meu orientador desde a graduação, pelo voto de confiança, apoio, orientação, incentivo e todo aprendizado, não apenas do conhecimento acadêmico, como também das experiências de vida.

A família do GSCMat e a todos os meus professores, pela contribuição significativa no meu desenvolvimento e crescimento acadêmico e profissional.

A todos os meus companheiros de mestrado, em nome de Alysson e Duda, pela amizade, parceria, por se fazerem presentes nos melhores e piores momentos, pela força e apoio em meio às dificuldades e, por me ajudarem a ter sempre esperança e nunca desistir.

Aos irmãos na fé, que, pacientemente, me ouviam, dividiam meus desesperos e tinham sempre uma palavra de ânimo e conforto, pela amizade e lealdade, e principalmente por me sustentarem em oração, fator importantíssimo durante essa caminhada que me fez permanecer de pé e focada.

Nenhuma conquista é fruto de um trabalho isolado. Então, que Deus, em Sua infinita bondade, os recompense por tudo que fizeram por mim.

## RESUMO

Existem diversos equipamentos para ensaios não destrutivos utilizando o princípio do Ruído Magnético de Barkhausen. Este trabalho propôs uma nova configuração de ensaio eletromagnético baseado na análise do RMB, utilizando uma bobina emissora e um sensor de efeito Hall, para detectar a presença de pequenas frações de fases paramagnéticas em um Aço Inoxidável Duplex. Foram utilizadas quatro amostras de AID SAF 2205 com diferentes espessuras. Destas, uma com espessura de 4 mm e outra de 8 mm na condição como recebidas, ou seja, sem apresentar precipitados e uma de 4 mm e outra de 8 mm tratadas na temperatura de 850 °C, envelhecidas a 15 min. Foram aplicados sinais de ondas senoidais por meio de uma bobina emissora, estes percorreram o material e um sensor Hall, posicionado depois do material, captou as ondas resultantes da interação. As características das ondas emisoras para a geração do RMB foram estudadas pela aplicação dessa com diferentes frequências e amplitudes, a fim de ter sensibilidade para acompanhar a formação da fase sigma no material. O ensaio mostrou ser possível a substituição da bobina receptora pelo sensor de efeito Hall. Foi observado que a aplicação de ondas com frequências de 5 a 50 Hz podem ser utilizadas com amplitudes até 2 V para detecção da fase sigma.

Palavras-Chave: RMB. END. AID. Sensor Hall.

## **ABSTRACT**

There are several equipments for non-destructive tests using the Barkhausen Magnetic Noise principle. This work proposed a new configuration of electromagnetic test based on RMB analysis, using an emitting coil and a Hall effect sensor, to detect the presence of small fractions of paramagnetic phases in a Duplex Stainless Steel. Four samples of AID SAF 2205 with different thicknesses were used. Of these, one with a thickness of 4 mm and another of 8 mm in the condition as received, that is, without precipitates and one of 4 mm and the other of 8 mm treated at 850 °C, aged at 15 min. Sine wave signals were applied by means of an emitting coil, these passed through the material and a Hall sensor, positioned after the material, captured the waves resulting from the interaction. The characteristics of the emitting waves for the generation of the RMB were studied by applying it with different frequencies and amplitudes, in order to have sensitivity to accompany the formation of the sigma phase in the material. The test showed that it is possible to replace the receiving coil with the Hall effect sensor. It was observed that the application of waves with frequencies from 5 to 50 Hz can be used with amplitudes up to 2 V to detect the sigma phase.

Keywords: BMN. NDT. DSS. Hall Sensor.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Disposição aleatória de domínios magnéticos dentro de um material	20
Figura 2	Curva de magnetização característica para materiais ferromagnéticos	21
Figura 3	Saltos abruptos no processo de magnetização: (a) a parede do domínio começar a se mover em direção à partícula, (b) a parede de domínio atinge um ponto de ancoragem e (c) a parede de domínio libera o local de fixação e gera um salto de Barkhausen	22
Figura 4	(a) Experimento original de Heinrich Barkhausen, (b) saltos de tensão registrados pela bobina e (c) curva de magnetização	23
Figura 5	Equipamento clássico para ensaios RMB	24
Figura 6	Configuração detalhada do experimento	24
Figura 7	Resultado da interação entre o sinal de entrada e a aplicação das ondas: (a) triangular, (b) senoidal e (c) quadrada, com frequência de 5 Hz para amostras com precipitados	25
Figura 8	Variação do valor RMS da onda, em função da amplitude e frequência da onda aplicada para a condição com precipitados formados	27
Figura 9	Medidas do valor RMS, para amostras com e sem precipitados, em função de diferentes amplitudes e das ondas com frequências de 5 Hz e (a) 25 Hz, (b) 50Hz, (c) 75 Hz, (d) 100Hz	27
Figura 10	Microestrutura típica de um AID: matriz de ferrita ( $\delta$ ) e ilhas de austenita ( $\gamma$ ) alongadas na direção de laminação	29
Figura 11	Diagrama TTP de um AID SAF 2205	30

Figura 12	Aplicação de um campo elétrico em uma barra de metal	31
Figura 13	Esquema elétrico da montagem de um sensor Hall	32
Figura 14	Funções de transferências típicas do sensor SS495A	33
Figura 15	Curva típica de saturação de sensores de efeito Hall	34
Figura 16	Configuração experimental: computador (1), placa de aquisição de dados com um conversor digital analógico de 10 bits (2), fonte de alimentação (3), bancada de testes (4); sensor de efeito Hall (5), amostra de AID (6) e ímã permanente (7)	35
Figura 17	Difratograma da amostra como recebida, mostrando apenas a presença (a) das fases $\gamma$ e $\alpha$ e (b) da amostra envelhecida a 550 °C por 200 h	36
Figura 18	Variação da permeabilidade magnética, dureza e meia altura para as amostras de material envelhecidas a (a) 425 °C e a (b) 475 °C	36
Figura 19	Configuração experimental: fonte de alimentação (1), solenoide (2), sensor de efeito Hall (3), amostra de AID (4), placa de aquisição de dados com um conversor digital analógico de 10 bits (5), computador (6), bancada de testes (7) e potenciômetro (8)	38
Figura 20	Microestruturas das amostras envelhecidas termicamente a (a) 800 °C e (c) 900 °C por 2 h e (b) e (d) difratometria de raios X relacionada, respectivamente	39
Figura 21	Amplitude versus campo magnético externo para as temperaturas de envelhecimento estudadas	40
Figura 22	Campo magnético induzido versus o externo para as temperaturas de 700, 750, 800, 850, 900 e 1000 °C e tempos até 2 h	40

Figura 23	Campo magnético induzido e energia de impacto Charpy para as amostras envelhecidas a (a) 800 °C e (b) 900 °C por até 2 h	41
Figura 24	Microestruturas de superfície de fratura das amostras envelhecidas a (a) 800 °C e (b) 900 °C por 0,25 h	42
Figura 25	Campo magnético induzido e energia absorvida em termos da porcentagem da fase sigma	42
Figura 26	Amostras do AID SAF 2205 utilizadas	44
Figura 27	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	46
Figura 28	Figura 28 - Equipamento de ensaio: (a) (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (6) bancada de testes, (7) placa de aquisição, (8) computador e (b) (3) bobina emissora, (4) amostra, (5) sensor de efeito Hall	46
Figura 29	Gaiola de Faraday	47
Figura 30	Posicionamento do sensor em relação à amostra	47
Figura 31	Tela do programa utilizado para realizar a aquisição automática dos sinais	52
Figura 32	Onda gerada na bobina emissora com a aplicação de um sinal com frequência de 5 Hz e amplitude de 5 V captada pelo sensor	53
Figura 33	Onda resultante da interação da bobina com o material sem tratamento, com a aplicação de um sinal com frequência de 5 Hz e amplitude de 5 V captada pelo sensor	54

Figura 34	Onda resultante da interação da bobina com o material com tratamento, com a aplicação de um sinal com frequência de 5 Hz e amplitude de 5 V captada pelo sensor	54
Figura 35	Tela do programa utilizado para realizar o tratamento dos sinais adquiridos	55
Figura 36	Gráfico das amostras com e sem tratamento com aquisição de 10, 20 e 30 sinais	56
Figura 37	RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 8 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 10 Hz	57
Figura 38	RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 8 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 10 Hz	58
Figura 39	RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 8 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 15 Hz	58
Figura 40	RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 8 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 20 Hz	59
Figura 41	RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 8 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 25 Hz	59
Figura 42	RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 8 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 50 Hz	60

Figura 43	Módulo da diferença do RMS em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras, para todas as frequências	61
Figura 44	RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 10 Hz	63
Figura 45	RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 15 Hz	63
Figura 46	RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 20 Hz	64
Figura 47	RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 25 Hz	65
Figura 48	RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 50 Hz	65
Figura 49	RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm e 8 mm, com e sem tratamento, para a frequência de 5 Hz	67
Figura 50	RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm e 8 mm, com e sem tratamento, para a frequência de 15 Hz	68

- Figura 51 RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm e 8 mm, com e sem tratamento, para a frequência de 25 Hz 68
- Figura 52 RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm e 8 mm, com e sem tratamento, para a frequência de 50 Hz 69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição do AID SAF 2205, como recebido, em percentual de peso	45
Tabela 2	Parâmetros da onda para o teste da bancada	49
Tabela 3	Parâmetros da onda para as amostras de 8 mm	50
Tabela 4	Parâmetros da onda para as amostras de 4 mm	51
Tabela 5	Presença das regiões no comportamento dos gráficos para as amostras de 8 mm	61
Tabela 6	Presença das regiões no comportamento dos gráficos para as amostras de 4 mm	66

## LISTA DE SIGLAS

AID	Aços Inoxidáveis Duplex
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Cr	Cromo
DRX	Difração de Raios X
END	Ensaio Não Destrutivo
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GSCMat	Grupo de Simulação de Comportamento dos Materiais
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
RMB	Ruído Magnético de Barkhausen
RMS	<i>Root Mean Square</i>
TTP	Temperatura, Tempo e Precipitação
SAF	<i>Sandvik Austenitic Ferritic</i>
$\alpha'$	Alfa linha
$\gamma$	Austenita
$\delta$	Ferrita
$\sigma$	Sigma

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	19
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS .....	19
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
2.1 COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS .....	20
2.2 RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN (RMB) .....	22
2.3 APLICAÇÕES DO RMB EM ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS .....	23
2.4 AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX (AID) .....	29
2.5 SENSOR DE EFEITO HALL .....	30
2.6 APLICAÇÕES DO SENSOR DE EFEITO HALL EM ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS .....	35
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>44</b>
3.1 MATERIAL UTILIZADO.....	44
3.2 EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL DE TESTE.....	45
3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	48
<b>3.3.1 Ensaio Preliminar para Teste da Bancada .....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.2 Determinação das Características da Onda Emissora para as Amostras de 8 mm .....</b>	<b>49</b>
<b>3.3.3 Determinação das Características da Onda Emissora para as Amostras de 4 mm .....</b>	<b>50</b>
<b>3.3.4 Comparação dos Resultados Obtidos com as Duas Espessuras .....</b>	<b>51</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>52</b>
4.1 ENSAIO PRELIMINAR PARA TESTE DA BANCADA .....	52

4.2 ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DA ONDA EMISSORA PARA DETECÇÃO DA FASE SIGMA PARA ESPESSURAS DE 8 MM.....	56
4.3 ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DA ONDA EMISSORA PARA DETECÇÃO DA FASE SIGMA PARA ESPESSURAS DE 4 MM.....	62
4.4 ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA ENTRE AS DUAS AMOSTRAS .....	56
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>70</b>
5.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	71
5.2 TRABALHOS PUBLICADOS .....	71
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Os materiais ferromagnéticos possuem domínios magnéticos, que são regiões com orientação magnética uniforme. Ao aplicar um campo magnético variável no material, as paredes dos domínios se movimentam, gerando deslocamentos que tendem a formar domínios maiores, orientados segundo a direção do campo aplicado. Essa movimentação não é contínua, mas realizada aos saltos, dependendo de uma série de fatores micro e macro-estruturais [1].

É possível relacionar os saltos magnéticos gerados pelas movimentações das paredes a picos de tensão que geram ruídos no sinal. Estes são conhecidos por Ruídos Magnéticos de Barkhausen (RMB), fenômeno magnético que tem sido considerado como um parâmetro útil em diversas aplicações, como por exemplo, avaliação não destrutiva de tensões residuais, detecção de fase deletéria, presença de precipitados, investigação de diferentes tamanhos de grãos, identificação de diferentes estágios da deformação por tração e monitoramento de danos por fadiga [2]–[4].

Nas configurações tradicionais, o RMB é medido com o auxílio de um *Yoke* eletromagnético e uma bobina receptora. Os parâmetros do RMB dependem da frequência e da forma de onda do campo magnético de excitação. As frequências utilizadas são na faixa de 0,1 Hz a 1 kHz e as formas de ondas mais usadas na excitação magnética do material são senoidais e triangulares [5]–[7].

Os sensores de efeito Hall possuem baixo custo e simples utilização, por isto são usados em indústrias nas mais variadas aplicações, podendo ser desde sensoriamento, tacômetros, medidores de posição, campo magnético entre outras. Como este sensor é muito sensível à variação do fluxo magnético, seu sinal de saída é potencializado com a aproximação de materiais magnéticos. Esses sensores têm sido utilizados em ensaios eletromagnéticos para detecção de variações microestruturais em diversos materiais [8]–[10].

Os Aços Inoxidáveis Duplex (AID) têm um comportamento mecânico diferenciado dos demais aços inoxidáveis, devido a sua microestrutura, que é formada por duas fases (por isso a denominação “duplex”) em proporções semelhantes, austenita e ferrita [11], [12]. Esse aço possui excelente desempenho quando submetido a condições severas de pressão e corrosão, chegando a ter uma durabilidade até quatro vezes superior aos outros aços inoxidáveis [13].

Os AID apresentam boa resistência à fadiga, boa tenacidade e resistência ao impacto, o que viabiliza seu uso em aplicações cujo risco de falha do equipamento pode gerar danos ambientais, custos e até perdas humanas. Entretanto, quando estes são submetidos a ciclos

térmicos acima de 550 °C, sofrem fragilização, por consequência da formação de precipitados grosseiros nos contornos de uma fase denominada sigma ( $\sigma$ ), que é rica em Cromo (Cr) e extremamente dura, o que compromete a resistência à corrosão e a tenacidade do material, sendo necessário somente 4 % dessa para que isto ocorra [14]–[16].

Este trabalho estudou a capacidade de substituição da bobina receptora por um sensor de efeito Hall, em um ensaio eletromagnético baseado na análise do RMB. A onda emitida percorre o material e um sensor de efeito Hall, posicionado na face oposta do material em relação à bobina emissora, capta a onda resultante da interação. O sensor é o diferencial na nova configuração, pois os métodos tradicionais utilizam duas bobinas, sendo uma emissora e outra receptora. As características da onda emissora para a geração do RMB foram estudadas pela aplicação dessa com diferentes frequências e amplitudes. Um aço inoxidável duplex foi escolhido para este estudo por apresentar mudança de permeabilidade pela formação de uma fase denominada sigma. Pequenas quantidades dessa fase já são suficientes para fragilização do material e a detecção dela serviu para a qualificação do ensaio.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Estudar uma nova configuração de ensaio eletromagnético para obtenção do Ruído Magnético de Barkhausen (RMB), com a substituição da bobina receptora, posicionada na superfície da amostra, no lado oposto ao da bobina emissora, por um sensor de efeito Hall, a fim de detectar a formação de pequenas quantidades de fases paramagnéticas no material.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir uma bancada de ensaio eletromagnético, com a substituição da bobina receptora por um sensor de efeito Hall;
- Estudar as características da onda emissora capaz de detectar a presença da fase  $\sigma$  em um aço inoxidável duplex, através da nova configuração;
- Estudar o efeito da espessura do material na capacidade de detecção da fase  $\sigma$  pelo RMB.

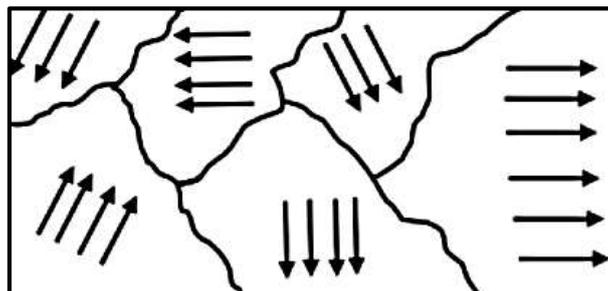
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo há uma revisão da literatura sobre temas relacionados ao problema analisado no trabalho, tais como o comportamento dos materiais ferromagnéticos, o Ruído Magnético de Barkhausen (RMB), o Aço Inoxidável Duplex (AID), o sensor de efeito Hall e aplicações em ensaios eletromagnéticos, promovendo uma análise das publicações abordadas por alguns autores.

### 2.1 COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS

Materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos podem existir, tanto no estado magnetizado quanto desmagnetizado, e isso se deve a orientação (alinhamento) dos momentos magnéticos atômicos ou moleculares no material. Cada átomo se comporta como um minúsculo ímã permanente e, eventualmente, se alinha paralelamente aos seus vizinhos em regiões dentro do material [1]. Tais regiões são denominadas de domínios magnéticos. O conceito de domínio tem sua origem na necessidade de explicar o comportamento de materiais magnéticos desmagnetizados, que mantêm magnetização espontânea diferente de zero. O fato é que, embora certas regiões no interior do material estejam magnetizadas em uma direção, de forma espontânea, os domínios estão arranjados aleatoriamente uns em relação aos outros como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Disposição aleatória de domínios magnéticos dentro de um material.

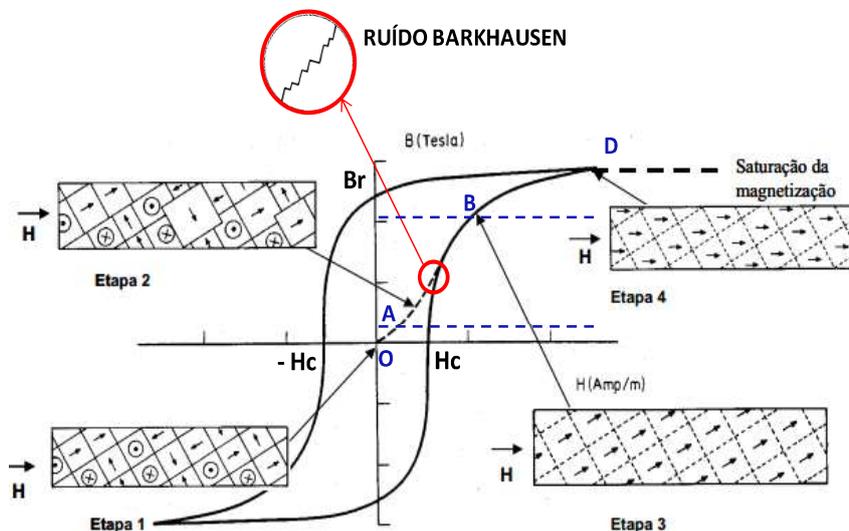


Fonte: adaptada de [17].

O comportamento dos materiais ferromagnéticos é representado pela curva de magnetização (Figura 2), que relaciona o campo de magnetização com a indução magnética. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 2, onde  $H$  representa a intensidade de

campo magnético,  $B$  a densidade de fluxo magnético,  $B_r$  a remanescência e  $H_c$  o campo coercitivo [18], [19].

Figura 2 - Curva de magnetização característica para materiais ferromagnéticos.



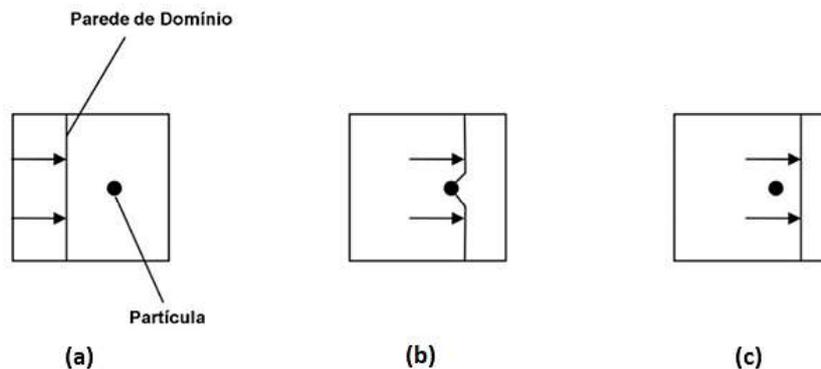
Fonte: adaptada de [20].

A região O-A representa a faixa de deslocamento reversível das paredes de domínio, onde os domínios estão orientados ao acaso e a aplicação de campos magnéticos de baixo valor não causa sua orientação permanente. A região A-B, mostra que a aplicação de um campo magnético crescente é suficiente para favorecer o crescimento de domínios orientados na mesma direção do campo aplicado e causar a contração de domínios não orientados, fazendo com que os mesmos diminuam ou desapareçam, até que, aumentando-se continuamente o campo magnético, os domínios tendam a se orientar na direção do eixo de fácil magnetização mais próxima da direção de aplicação do campo. A região B-D retrata a última rotação, onde os domínios estão completamente alinhados na mesma direção do campo magnético aplicado. As regiões A-B e B-D são as regiões de irreversibilidade e de rotação, respectivamente. Um material que tenha sido magnetizado até o ponto D da curva não retornará pelo mesmo caminho ao ponto O, efeito este conhecido como histerese magnética [20].

O processo de magnetização é afetado pela presença de tensões e defeitos na estrutura cristalina do material, conhecidos como pontos de ancoragem, tais como vacâncias, inclusões, partículas de segunda fase, discordâncias, defeitos pontuais e contornos de grão. Quando uma parede de domínio encontra um ponto de ancoragem no processo de magnetização, a energia necessária para realizar a movimentação e ultrapassá-lo, aumenta. Esse processo continua até

a parede encontrar um novo ponto de ancoragem em sua trajetória. Conseqüentemente, em função da movimentação das paredes dos domínios magnéticos, pequenos saltos abruptos de magnetização, conhecidos como Ruído Magnético de Barkhausen (RMB), são produzidos (Figura 3) [2], [5], [21].

**Figura 3 - Saltos abruptos no processo de magnetização: (a) a parede do domínio começar a se mover em direção à partícula, (b) a parede de domínio atinge um ponto de ancoragem e (c) a parede de domínio libera o local de fixação e gera um salto de Barkhausen.**



Fonte: adaptada de [5].

## 2.2 RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN (RMB)

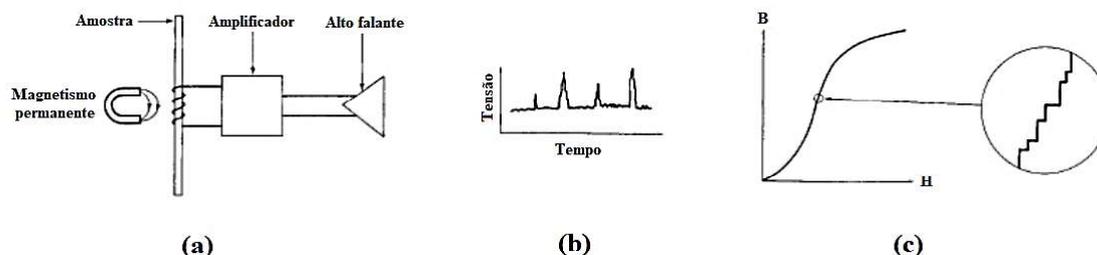
O RMB é um fenômeno de mudanças descontínuas na densidade de fluxo dentro de um material ferromagnético, quando este é submetido a um campo magnético variável. Inicialmente, o processo foi observado pelo professor alemão Heinrich Barkhausen em 1917, no entanto, o método não atraiu a atenção para o uso em aplicações industriais até o início dos anos 80. Hoje, é usado em ensaios não destrutivos para a caracterização de materiais e a determinação de defeitos de tratamento térmico [6], [7], [14].

No experimento original, Heinrich Barkhausen descobriu que, durante a magnetização de uma barra de ferro, pulsos de tensão elétrica de curta duração eram induzidos em uma bobina enrolada em torno da barra. Esses pulsos foram detectados como cliques audíveis em um alto falante, conforme configuração retratada na Figura 4. Ao mudar lentamente o campo de magnetização, as descontinuidades persistiram, demonstrando que o fenômeno era um processo inerentemente discreto [22].

Geralmente, para captar as descontinuidades da densidade de fluxo, são utilizadas bobinas leitoras de indução como elementos sensores. Estas bobinas são constituídas por um

enrolamento com grande número de voltas de fio de cobre. Por sua simplicidade, elas constituem os sensores magnéticos mais antigos e conhecidos [22].

**Figura 4 – (a) Experimento original de Heinrich Barkhausen, (b) saltos de tensão registrados pela bobina e (c) curva de magnetização.**



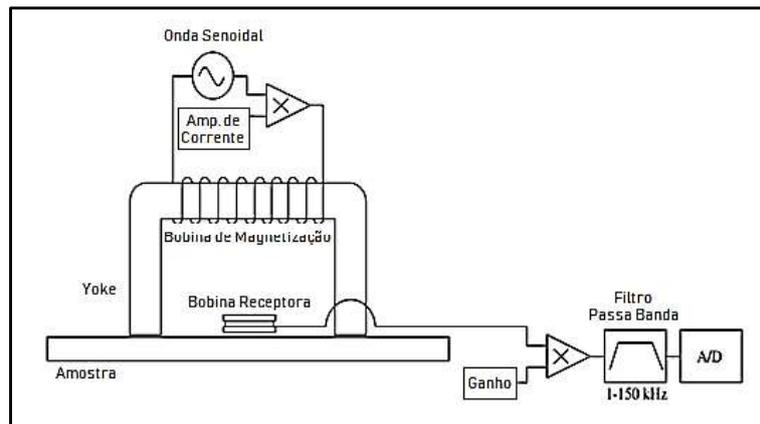
Fonte: adaptada de [23].

Esta técnica tem sido amplamente usada, não só para medição de tensão mecânica aplicada, como também para medição de tensões residuais, assim como na distinção de outras características, tais como tamanho de grão, teor de carbono, fluência, tratamento térmico, fadiga, deformações, tanto plásticas como elásticas entre outras [3], [4], [24]–[27].

## 2.3 APLICAÇÕES DO RMB EM ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS

Existem diversos equipamentos para Ensaios Não Destrutivos (END) utilizando o princípio do RMB. Seus parâmetros de confecção dependem tanto do formato quanto do tipo de material que se deseja analisar. A Figura 5 ilustra a configuração experimental clássica para a medição do RMB, composta por um eletroímã e uma bobina receptora. A magnetização do eletroímã, localizado na superfície de uma amostra ferromagnética, é gerada por uma onda senoidal que passa através de um amplificador de corrente. Esta corrente amplificada circula por meio da bobina de magnetização, enrolada no seu núcleo (material ferromagnético em forma de U, usualmente chamado de *yoke*). A magnetização alternada, com frequências entre 1 e 50 Hz, causa mudanças na estrutura magnética do material, em escala atômica, gerando transientes magnéticos em frequências superiores a 1 kHz, os quais são captados na superfície pela bobina receptora, localizada entre os polos do *yoke*. Devido às diferenças entre as frequências de excitação e a resposta magnética, é possível isolar o RMB mediante a amplificação e o uso de filtros passa-banda [22].

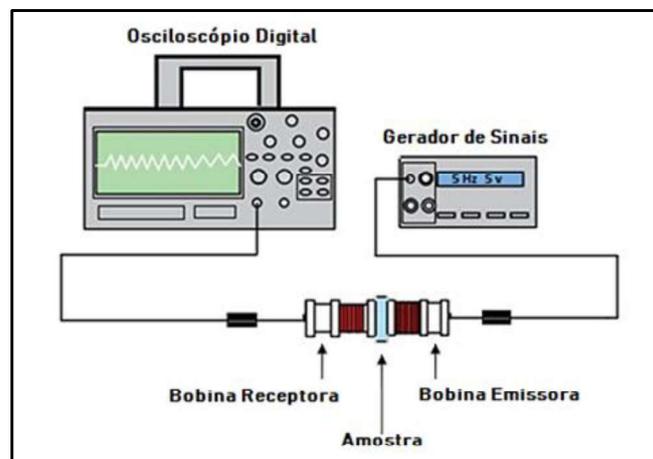
**Figura 5 - Equipamento clássico para ensaios RMB.**



Fonte: adaptada de [22].

Em [6] foi realizado um ensaio eletromagnético baseado no RMB para acompanhamento de transformações microestruturais em um AID SAF 2205. No ensaio, foram utilizadas duas bobinas de superfície, cada uma posicionada em uma das faces da amostra, conforme configuração detalhada na Figura 6.

**Figura 6 - Configuração detalhada do experimento.**

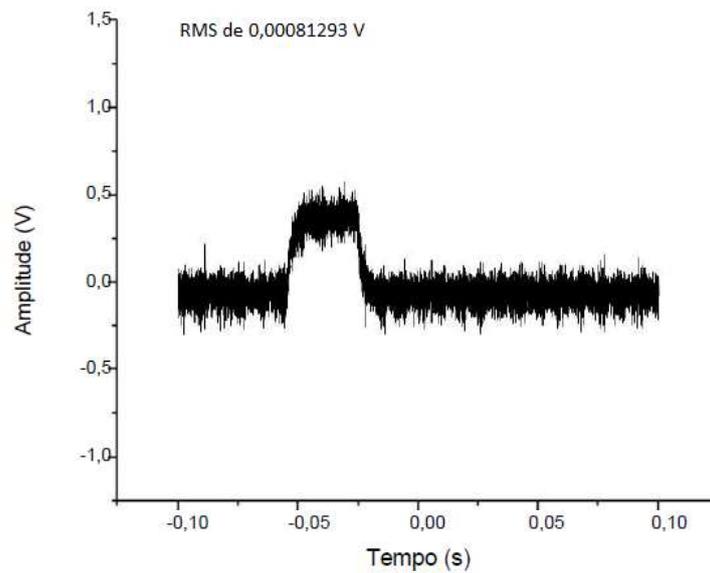


Fonte: adaptada de [6].

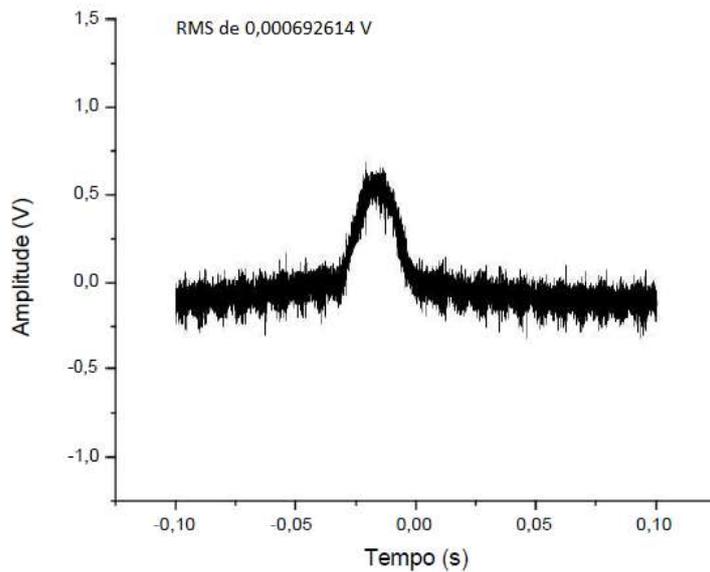
Primeiramente, foi determinada a forma de onda a ser utilizada. A fim de verificar o melhor tipo desta, foram utilizadas ondas de mesma amplitude e frequência de 5 Hz nas formas quadrada, senoidal e triangular, como pode ser visto na Figura 7. Optou-se por uma amostra submetida a um tratamento térmico na temperatura de 475 °C por 100 h e resfriamento ao ar. O autor aplicou um filtro passa alta digital de 3,5 kHz no sinal de saída e usou a raiz do valor quadrático médio ou RMS (do inglês *Root Mean Square*) como parâmetro de análise. O resultado obtido com a onda quadrada apresentou maior valor de RMS, indicando a presença

maior de ruído gerado da interação entre movimento das paredes dos domínios e microestrutura, no entanto este teve interferência dos harmônicos da onda principal, logo se optou pelo uso da onda na forma triangular para realização do estudo.

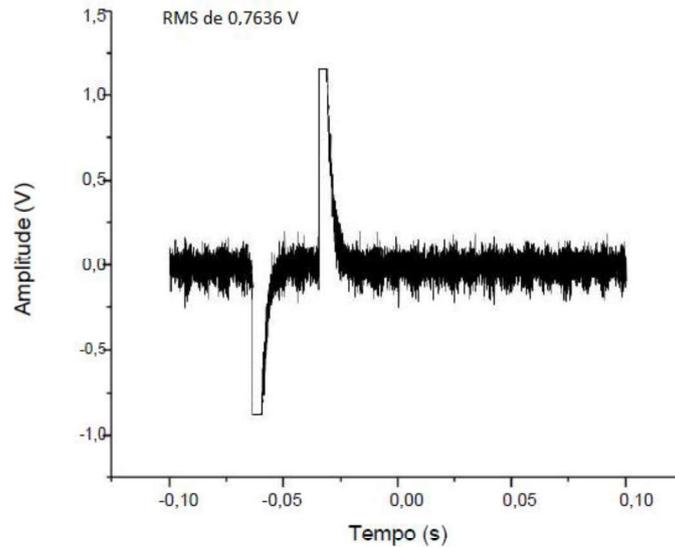
**Figura 7 - Resultado da interação entre o sinal de entrada e a aplicação das ondas: (a) triangular, (b) senoidal e (c) quadrada, com frequência de 5 Hz para amostras com precipitados.**



**(a)**



**(b)**

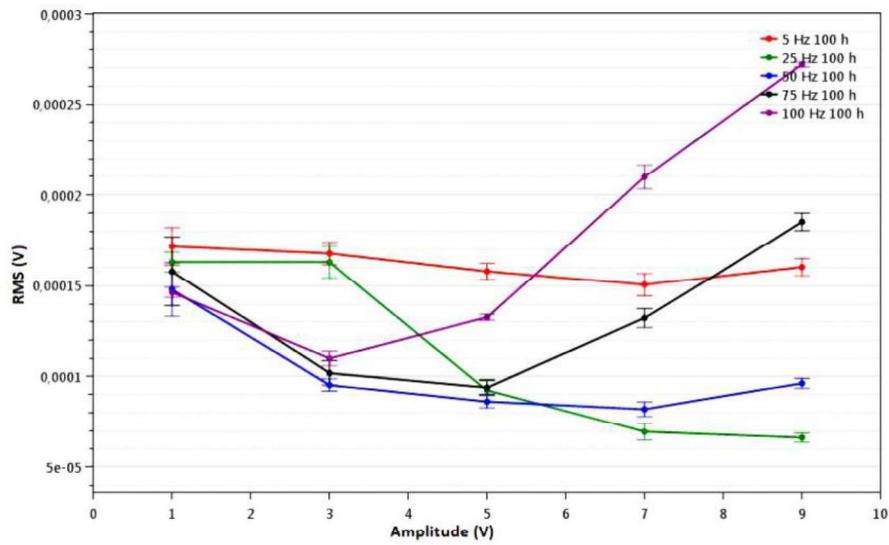


(c)

Fonte: [6].

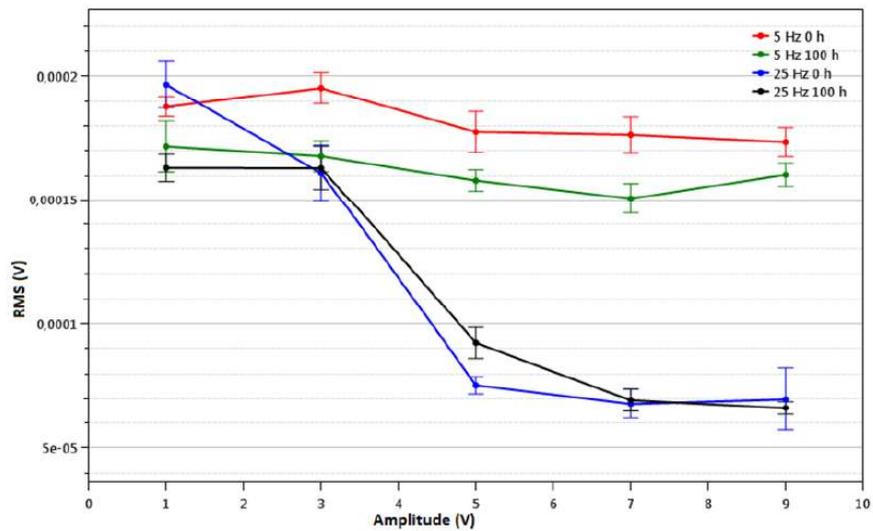
Posteriormente, foram determinadas a frequência e a amplitude da onda ideal. Ondas triangulares com as frequências de 5, 25, 50, 75 e 100 Hz e amplitudes de 1, 3, 5 e 9 V foram geradas e aplicadas na bobina emissora. O sinal foi capturado pelo conjunto bobina receptora e osciloscópio, com tempo de aquisição de 2 s. A Figura 8 apresenta medidas do valor RMS para amostras com precipitados formados, em função de diferentes amplitudes e frequências e a Figura 9 faz um comparativo entre as amostras com e sem precipitados, sob as mesmas condições. Pode-se observar que a maior diferença dos valores RMS entre a condição com e sem tratamento foram obtidas para as ondas de 5 Hz, a qual teve os melhores resultados, e ondas de 25 Hz com amplitudes abaixo de 3 V. Para as demais frequências, não houve diferença significativa entre as condições com e sem tratamento. Com base nos resultados, o autor concluiu que ondas com frequências inferiores a 25 Hz são preferíveis para se trabalhar com o RMB nas condições estudadas.

**Figura 8 - Variação do valor RMS da onda, em função da amplitude e frequência da onda aplicada para a condição com precipitados formados.**

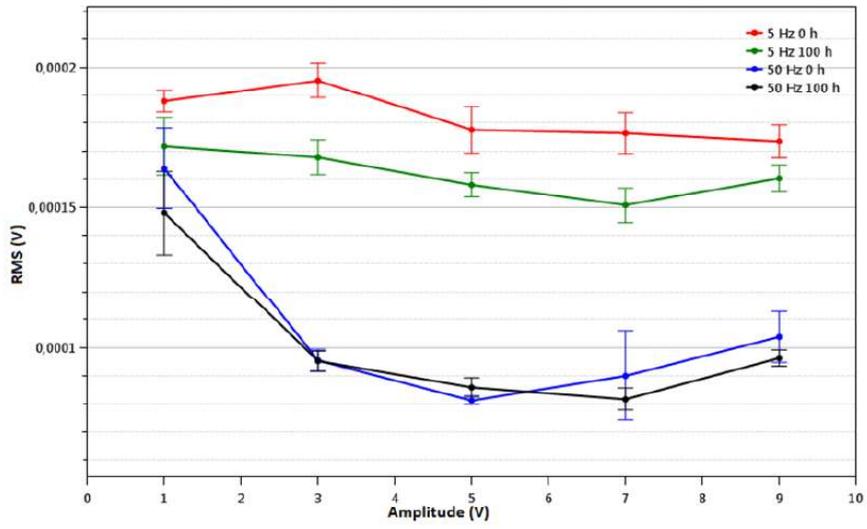


Fonte: [6].

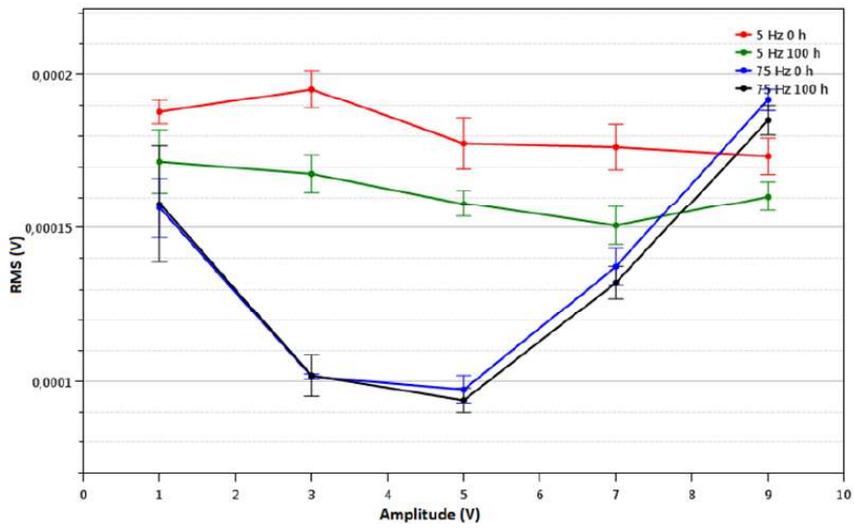
**Figura 9 - Medidas do valor RMS, para amostras com e sem precipitados, em função de diferentes amplitudes e das ondas com frequências de 5 Hz e (a) 25 Hz, (b) 50Hz, (c) 75 Hz e (d) 100Hz.**



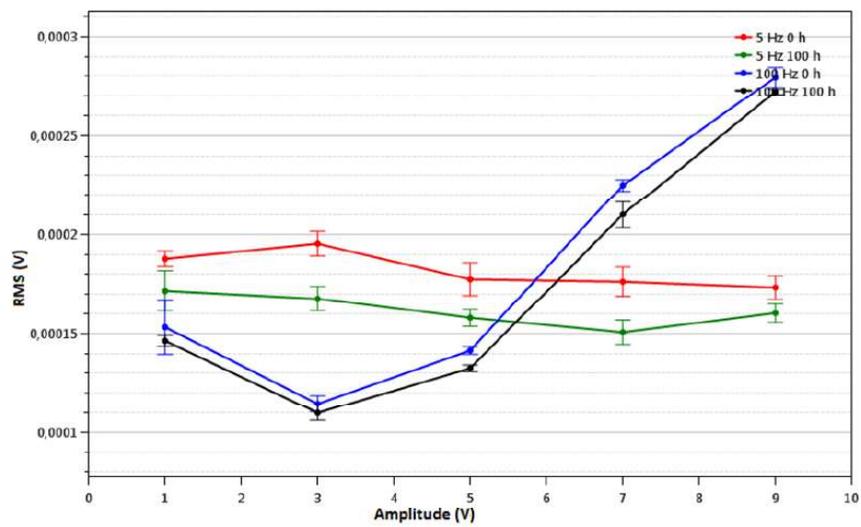
(a)



(b)



(c)



(d)

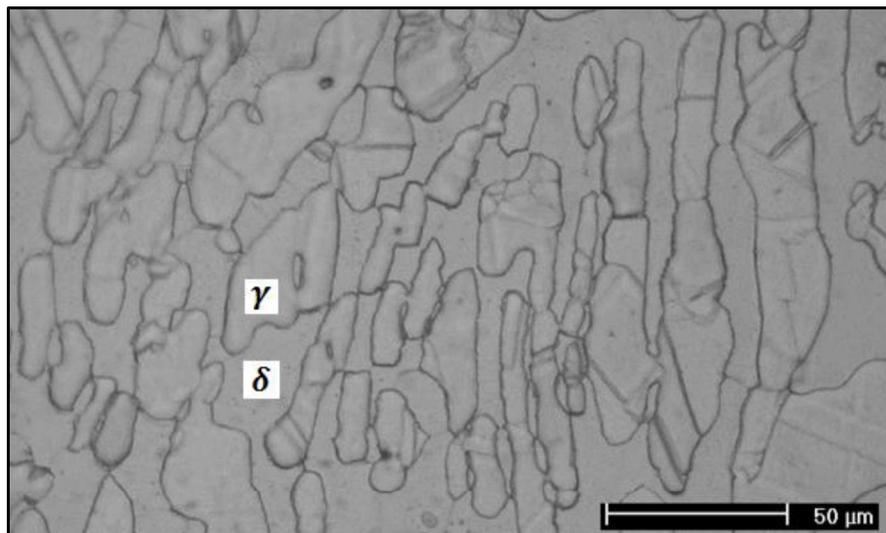
Fonte: [6].

Por fim, o autor propôs como trabalhos futuros estudar um número maior de frequências e amplitudes para ondas aplicadas na região abaixo de 25 Hz, a fim de se obter maior precisão na característica da onda estudada.

## 2.4 AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX (AID)

O AID SAF 2205 tem como principais características alta resistência à corrosão e resistência mecânica, devido à composição da sua microestrutura (Figura 10), que é formada 50% de fase ferrítica e 50% de fase austenítica [13]. Por isso, ele é amplamente utilizado na indústria, a exemplo das indústrias petroquímicas, alimentícias, de papel e celulose, petróleo e gás entre outras [15].

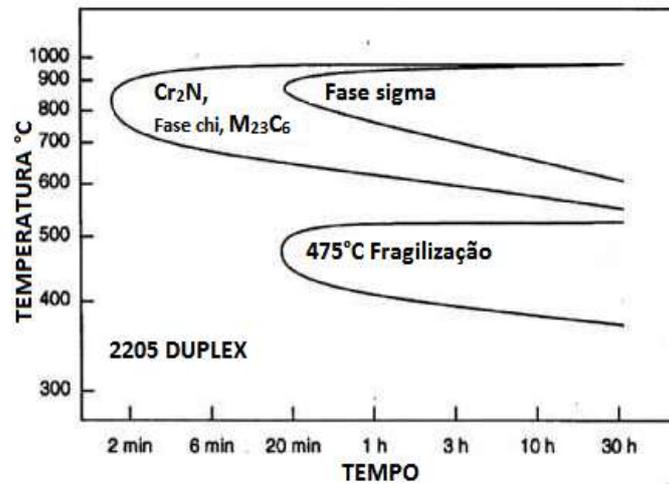
**Figura 10 - Microestrutura típica de um AID: matriz de ferrita ( $\delta$ ) e ilhas de austenita ( $\gamma$ ) alongadas na direção de laminação.**



Fonte: adaptada de [13].

Embora apresente ótimas características, ao ser aquecido a elevadas temperaturas, esse tipo de aço começa a formar precipitados que prejudicam suas propriedades, tornando-o um material frágil. A Figura 11 apresenta o diagrama de Temperatura, Tempo e Precipitação (TTP) de um AID SAF 2205 [28]. Neste, pode-se notar duas regiões distintas, uma acima de 550 °C e outra abaixo desta temperatura.

Figura 11 - Diagrama TTP de um AID SAF 2205.



Fonte: adaptado de [28].

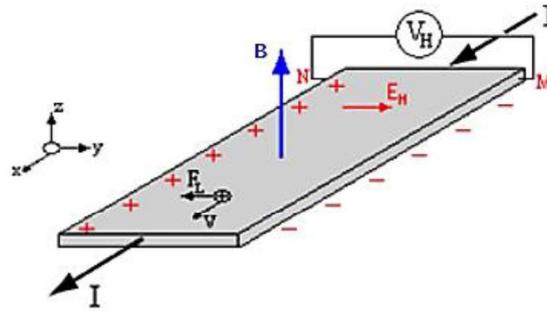
As principais fases formadas nesses materiais são as fases sigma ( $\sigma$ ) e alfa linha ( $\alpha'$ ), que são exatamente as responsáveis pela fragilização desse material quando o mesmo é submetido às temperaturas que as geram [9], [15].

A fase  $\sigma$  possui elevada dureza, em torno de 1000 HV, e grande fragilidade. Segundo [15], uma pequena quantidade de 4% dessa fase é suficiente para comprometer a tenacidade do material. Esta fase se forma por uma reação de decomposição da ferrita ferromagnética, o que causa diminuição na quantidade dos constituintes ferromagnéticos [10], [16]. Ela também pode se formar a partir da fase austenita, após o consumo de toda a ferrita, por decomposição eutetóide durante o envelhecimento do AID SAF 2205 a 850°C, o que ocorre após várias horas de tratamento [29].

## 2.5 SENSOR DE EFEITO HALL

Ao fazer circular cargas elétricas ( $I$ ) em um condutor induzido por um campo magnético ( $B$ ), é produzida uma força eletromagnética chamada força de Lorentz ( $F_L$ ), que desloca os portadores de carga para uma das extremidades do condutor, a depender do sentido da corrente elétrica aplicada [30], conforme se pode observar na Figura 12.

Figura 12 - Aplicação de um campo elétrico em uma barra de metal.



Fonte: adaptada de [30].

A força de Lorentz tende a entrar em equilíbrio com uma força eletrostática, gerada pelo deslocamento das cargas elétricas, comumente chamada de campo elétrico Hall ( $E_H$ ). O deslocamento das cargas para umas das extremidades do condutor produz uma diferença de potencial, chamada de tensão Hall ( $V_H$ ). A força de Lorentz se contrapõe ao campo elétrico Hall, tendo ambas as mesmas intensidades. A partir dessa igualdade pode-se chegar a uma equação que relaciona a dimensão do elemento Hall existente no sensor com a corrente aplicada e o ângulo de incidência ( $\alpha$ ) das linhas de campo magnético sobre esse elemento, conforme a Equação (1).

$$V_H = \frac{I \times B \times \text{sen}\alpha}{n \times q \times L} \quad (1)$$

Onde:

$V_H$ : tensão Hall (V);

$I$ : corrente elétrica (A);

$B$ : densidade de campo magnético (T);

$\alpha$ : ângulo de incidência ( $^\circ$ );

$n$ : densidade de carga (C/m);

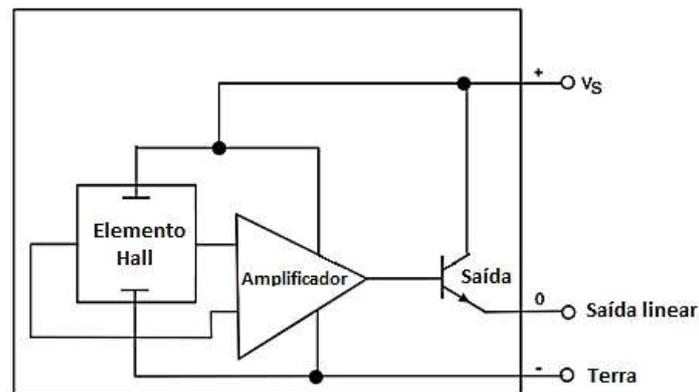
$q$ : carga de elétron (C);

$L$ : espessura do elemento Hall (m).

Da análise da Equação (1) pode-se verificar que o ângulo de incidência do campo magnético também influencia nos valores de tensão Hall produzidos.

Os valores de tensão Hall gerados são pequenos, da ordem de  $\mu V$ , motivo pelo qual nos sensores de efeito Hall comerciais um amplificador diferencial é encapsulado junto com o elemento Hall, com a finalidade de amplificar seus valores [31], [32]. Um esquema elétrico interno de um sensor Hall pode ser observado na Figura 13.

**Figura 13 - Esquema elétrico da montagem de um sensor Hall.**

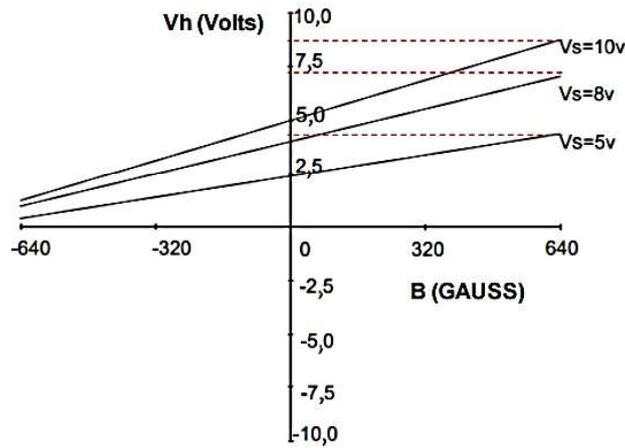


**Fonte: adaptada de [31].**

A configuração proposta na Figura 13 torna possível que valores pequenos de campos magnéticos possam ser medidos com sensores Hall lineares e de baixo custo, como os da série SS49, da Allegro Microsystems. Esses sensores têm uma boa sensibilidade, da ordem de 3,125 mV/Gauss, podendo ser alimentados com tensões elétricas variando entre 0 e 10 V, e tem seu sinal de saída proporcional à tensão de alimentação.

A curva de transferência característica do sensor SS495A pode ser vista na Figura 14. No eixo das ordenadas são apresentados os valores de tensão Hall. No eixo das abcissas são apresentados os valores de campo magnético induzido ao qual o sensor foi submetido. Os valores de tensão de alimentação sugeridos no *datasheet* do sensor são representados por  $V_S$ .

Figura 14 - Funções de transferências típicas do sensor SS495A.



Fonte: adaptada de [31].

As tensões de alimentação do sensor apresentadas nos gráficos da Figura 14 representam a tensão de polo sul. Essa tensão se relaciona com a tensão do polo norte ( $V_N$ ). Desta forma, supondo-se um caso onde a tensão de alimentação do sensor tenha sido de 5 V, pode-se encontrar uma equação que relaciona a tensão de *offset* ( $V_{off}$ ) do sensor com as tensões de polos sul e norte, conforme apresentada na Equação (2).

$$V_S - 2,5 = 2,5 - V_N \quad (2)$$

Onde:

$V_S$ : tensão de polo sul (V);

$V_{off}$ : tensão de *offset* (2,5);

$V_N$ : tensão de polo norte (V).

Para o sensor em questão, conforme apresentado no *datasheet* [32], a relação entre a densidade de campo magnético e os valores de tensões dos polos sul e norte pode ser dada pela seguinte relação apresentada na Equação (3).

$$B = \frac{V_S - V_N}{S_s} \quad (3)$$

Onde:

$B$ : densidade de campo magnético (Gauss);

$V_S$ : tensão de polo sul (V);

$V_N$ : tensão de polo norte (V);

$S_S$ : sensibilidade de saída do sensor (mV/Gauss);

Associando-se as Equações 1, 2 e 3, encontra-se uma equação que permite relacionar a permeabilidade magnética com as características do sensor, apresentadas na Equação (4).

$$\mu = \frac{(V_S - 2,5) \times 10^3}{S_S \times H} \quad (4)$$

Onde:

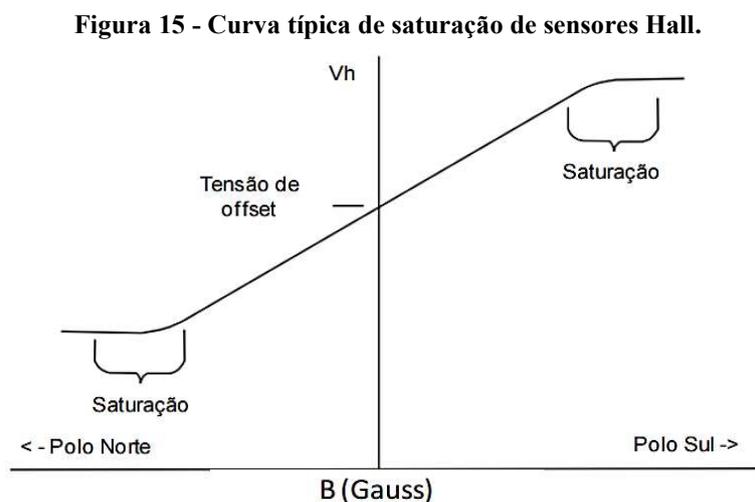
$\mu$ : permeabilidade magnética;

$V_S$ : tensão de saída (V);

$S_S$ : sensibilidade de saída do sensor (mV/Gauss);

$H$ : intensidade de campo magnético (Oe);

Apesar de poder relacionar a densidade de campo com a intensidade de campo e a permeabilidade através das Equações 3 e 4 e verificar o comportamento linear das curvas de  $V_H \times B$ , deve-se observar que esses sensores trabalham em uma faixa limitada de detecção de campos magnéticos. Uma curva de saturação típica de sensores de efeito Hall pode ser vista na Figura 15.

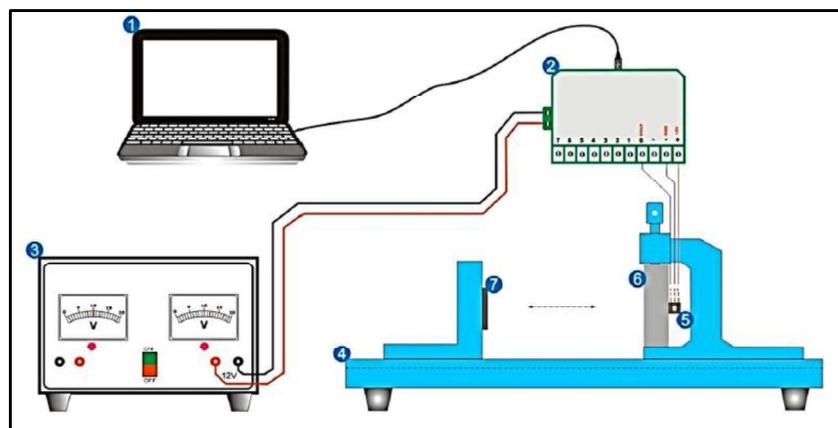


Fonte: adaptada de [32].

## 2.6 APLICAÇÕES DO SENSOR DE EFEITO HALL EM ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS

Em [9] foi desenvolvida uma metodologia não destrutiva utilizando um sensor de efeito Hall para detectar as variações microestruturais do AID SAF 2205. Os testes não destrutivos foram realizados conforme a configuração experimental detalhada na Figura 16.

**Figura 16 - Configuração experimental: computador (1), placa de aquisição de dados com um conversor digital analógico de 10 bits (2), fonte de alimentação (3), bancada de testes (4); sensor de efeito Hall (5), amostra de AID (6) e ímã permanente (7).**

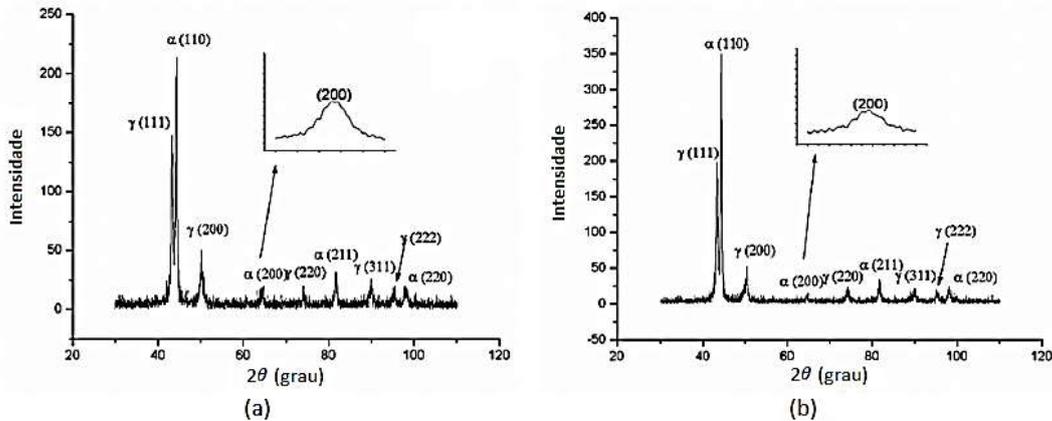


Fonte: adaptada de [9].

Primeiramente, as amostras do AID SAF 2205 foram envelhecidas às temperaturas de 425 e 475 °C a 12, 24, 48, 100 e 200 h e à temperatura de 525 °C por 200 h, para acompanhar a formação da fase  $\alpha'$ . Posteriormente, estas amostras envelhecidas e uma amostra na condição como recebida foram submetidas às técnicas de escala de Rockwell C, Difração de Raios X (DRX) e teste de permeabilidade magnética.

Os testes de DRX foram realizados para identificar as fases microestruturais nas amostras antes e após os tratamentos de envelhecimento. A Figura 17 mostra as medidas de DRX para as amostras como recebidas e envelhecidas durante 200 h a 525 °C. Nesta figura, somente as fases  $\gamma$  e  $\alpha$  são visíveis e variações na forma do pico (200) podem ser observadas.

Figura 17 - Difratograma da amostra como recebida, mostrando apenas a presença (a) das fases  $\gamma$  e  $\alpha$  e (b) da amostra envelhecida a 550 °C por 200 h.

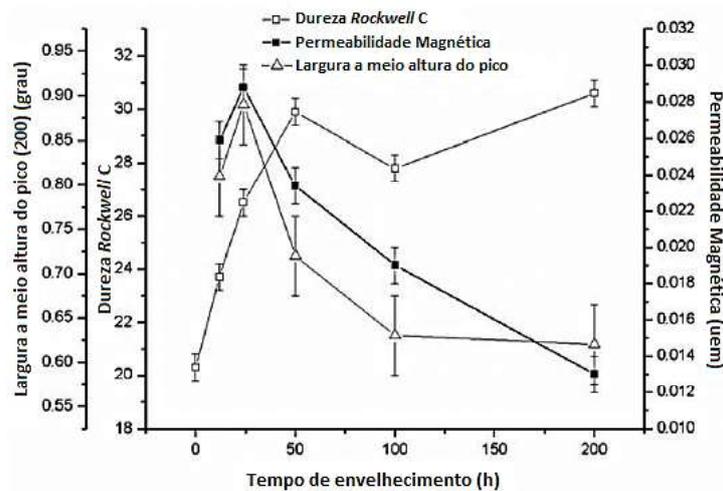


Fonte: adaptada de [9].

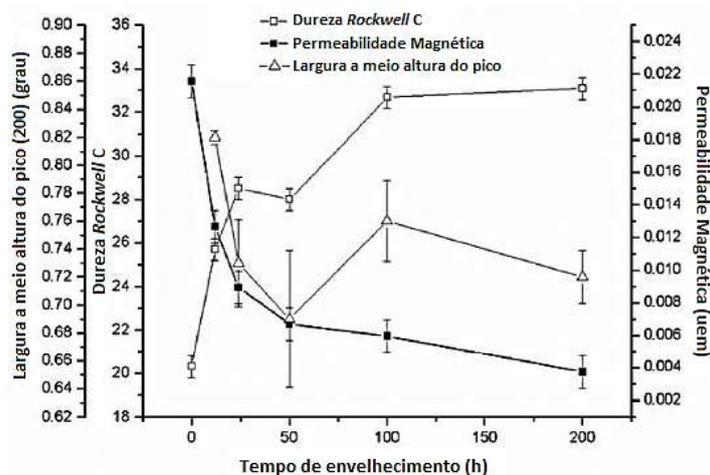
Para a realização do teste de permeabilidade magnética, um campo magnético de 430 G foi aplicado, levando-se em conta que o sensor utilizado satura a 600 G, e a permeabilidade magnética  $\mu$  foi calculada com base na tensão Hall por meio da Equação (4).

Os autores estudaram as mudanças de fase em temperaturas variando de 425 a 525 °C. Para as amostras envelhecidas nas temperaturas de 425 e 475 °C (Figura 18 (a) e (b), respectivamente), os resultados de dureza mostraram a presença de dois estágios de endurecimento, cada um com taxas bastante diferentes de endurecimento.

Figura 18 - Variação da permeabilidade magnética, dureza e meia altura para as amostras de material envelhecidas a (a) 425 °C e a (b) 475 °C.



(a)



(b)

Fonte: adaptada de [9].

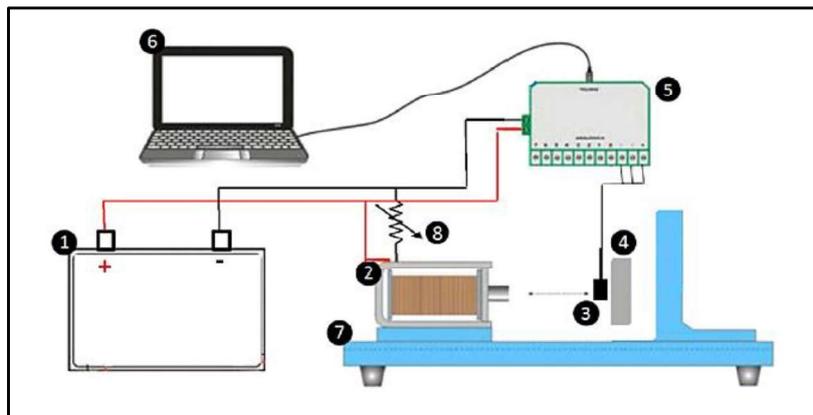
Foi observado pelos autores um aumento da largura a meia altura para tempos de envelhecimento até cerca de 24 h (Figura 18 (a)). Este aumento foi causado pela formação da fase  $\alpha'$  e corresponde ao primeiro estágio de endurecimento.

Os resultados da permeabilidade magnética, calculados com base nas tensões de saída do sensor de efeito Hall, tiveram um comportamento semelhante ao da largura em medidas de meia altura e foram afetados pelas variações microestruturais dos materiais em estudo. As curvas de permeabilidade magnética revelaram redução significativa para tempos de envelhecimento inferiores a 50 h (Figura 18 (b)), e tiveram uma tendência de estabilização após esse tempo de envelhecimento devido à formação cinética da fase  $\alpha'$  e suas características ferromagnéticas.

Os autores perceberam, por meio dos resultados obtidos, que as medições de tensão Hall são afetadas pelas transformações de fase que ocorrem no aço inoxidável duplex SAF 2205 nas duas temperaturas estudadas (425 e 475° C), e são adequadas para rastrear a formação da fase  $\alpha'$  de uma maneira não destrutiva. Isto foi confirmado pela correlação com a técnica de Difração de Raios X (DRX) que é uma técnica de inspeção já consolidada neste domínio. Logo, os autores concluíram que a permeabilidade magnética, uma abordagem simples e de baixo custo, pode ser usada para monitorar continuamente as estruturas em serviço que são suscetíveis à fragilização.

Em [10] também foi desenvolvida uma metodologia não destrutiva utilizando um sensor de efeito Hall para detectar a fase sigma em um AID SAF 2205. Os testes não destrutivos foram realizados conforme a configuração experimental detalhada na Figura 19.

**Figura 19 - Configuração experimental: fonte de alimentação (1), solenoide (2), sensor de efeito Hall (3), amostra de AID (4), placa de aquisição de dados com um conversor digital analógico de 10 bits (5), computador (6), bancada de testes (7) e potenciômetro (8).**



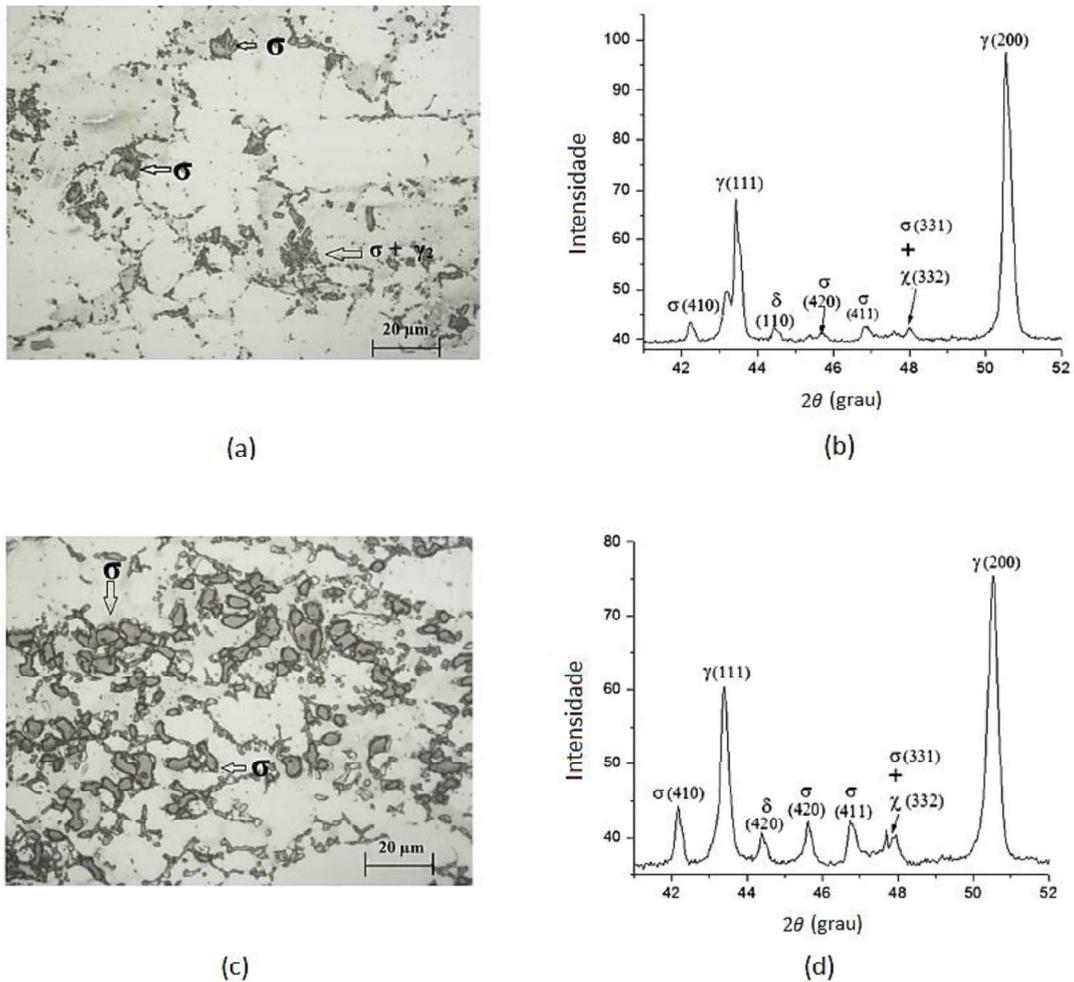
Fonte: adaptada de [10].

As amostras do AID SAF 2205 foram envelhecidas termicamente em forno de resistência elétrica nas temperaturas de 700, 750, 800, 850, 900 e 1000 °C por 0,25, 1 e 2 h. Essas amostras foram preparadas por polimento mecânico e gravação eletrolítica em solução de Hidróxido de Potássio (KOH) a 10% com tensão de 3 V por 15 s, revelando principalmente a fase sigma. A quantidade da fase sigma foi quantificada em imagens microestruturais obtidas por microscopia ótica. A fração volumétrica da fase sigma foi calculada usando uma ferramenta computacional de processamento e análise de imagens. Quarenta imagens foram analisadas e a fração volumétrica foi determinada considerando-se um intervalo de confiança de 95%, com erro máximo de 5%. O teste de impacto de Charpy foi realizado nas amostras submetidas aos mesmos tratamentos.

Cinco amostras foram usadas para cada tempo e as temperaturas de 800 e 900 °C foram particularmente estudadas, porque nestas a quantidade da fase sigma necessária para fragmentar o material (4%) é atingida mais rapidamente devido à cinética da formação associada às altas temperaturas. As microestruturas superficiais das amostras como recebidas e as amostras envelhecidas a 800 e 900 °C foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para fraturas. A formação da fase sigma foi estudada usando testes de Difração de Raios X (DRX). O ângulo de varredura variou de 41 a 53° com passos de 0,02°.

A Figura 20 mostra as microestruturas das amostras envelhecidas termicamente a 800 e 900 °C por 2 h e seus padrões de DRX. Esta figura revelou uma quantidade maior de precipitados a 900 °C. Já a 800 °C, a microestrutura mostrou a fase sigma ( $\sigma$ ) formada a partir da fase ferrita ( $\delta$ ), bem como a reação das fases  $\sigma$  + austenita ( $\gamma_2$ ).

**Figura 20 – Microestruturas das amostras envelhecidas termicamente a (a) 800 °C e (c) 900 °C por 2 h e (b) e (d) difratometria de raios X relacionada, respectivamente.**



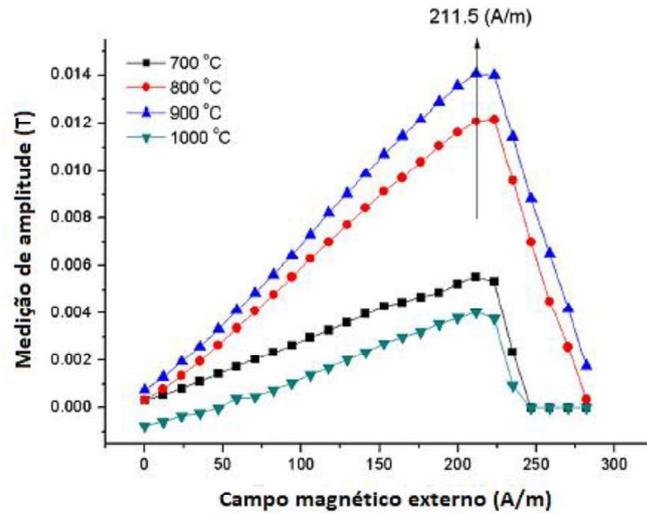
**Fonte: adaptada de [10].**

Para o ensaio eletromagnético, campos magnéticos externos de até 282 A/m foram aplicados para gerar os campos induzidos na região do movimento da parede do domínio reversível, não deixando nenhuma magnetização permanente na amostra sob teste.

A Figura 21 apresenta a diferença, que é chamada de medição de amplitude, entre os campos magnéticos induzidos para as amostras envelhecidas por 2 h e o AID recebido contra os campos externos aplicados.

A Figura 21 demonstra que os valores aumentaram até um pico máximo de 211,5 A/m e diminuiram logo após. A última diminuição de amplitude deveu-se ao início da saturação do sensor de efeito Hall utilizado. Esta figura ainda mostra o efeito da temperatura na formação da fase sigma.

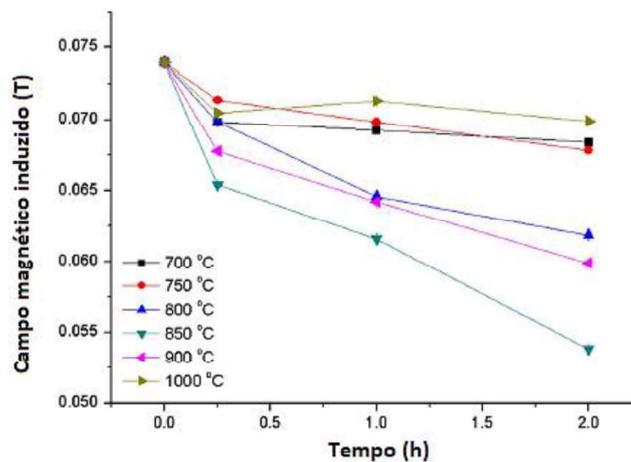
**Figura 21 - Amplitude versus campo magnético externo para as temperaturas de envelhecimento estudadas.**



Fonte: adaptada de [10].

A Figura 22 mostra os valores dos campos magnéticos induzidos em função do tempo e temperatura, com um campo externo aplicado de 211,5 A/m. O campo magnético induzido diminuiu devido à presença da fase sigma paramagnética. A maior taxa de precipitação ocorreu a 850 °C.

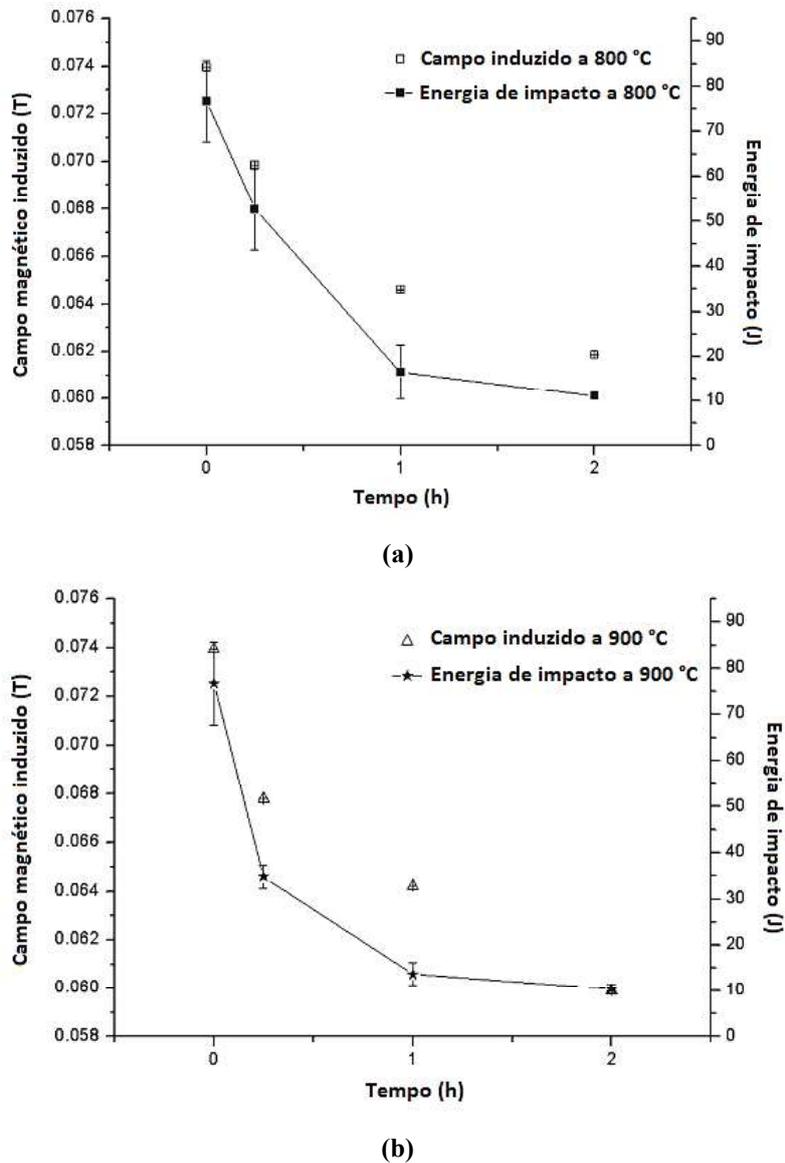
**Figura 22 - Campo magnético induzido versus o externo para as temperaturas de 700, 750, 800, 850, 900 e 1000 °C e tempos até 2 h.**



Fonte: adaptada de [10].

A Figura 23 mostra a energia de impacto absorvida em função do campo induzido para as amostras envelhecidas a 800 e 900 °C e tempos de até 2 h. Esta figura também demonstra que o campo magnético induzido é capaz de seguir o processo de fragilização do aço analisado.

Figura 23 - Campo magnético induzido e energia de impacto Charpy para as amostras envelhecidas a (a) 800 °C e (b) 900 °C por até 2 h.

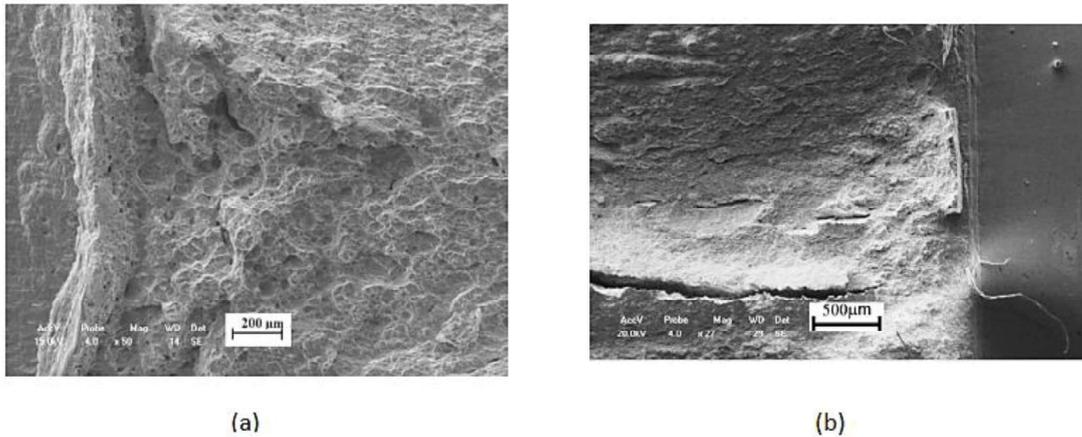


Fonte: adaptada de [10].

A Figura 24 mostra as superfícies fraturadas obtidas por MEV das amostras envelhecidas a 800 e 900 °C por 0,25 h. Uma mudança no mecanismo de fratura de dúctil a frágil foi aparente nesta figura. Para a amostra de 800 °C a microestrutura mostrou um modo de fratura dúctil com um grande número de covinhas profundas visíveis, e com algumas

rachaduras já perceptíveis devido à presença da fase sigma. Essas rachaduras foram ainda mais visíveis na amostra de 900 °C.

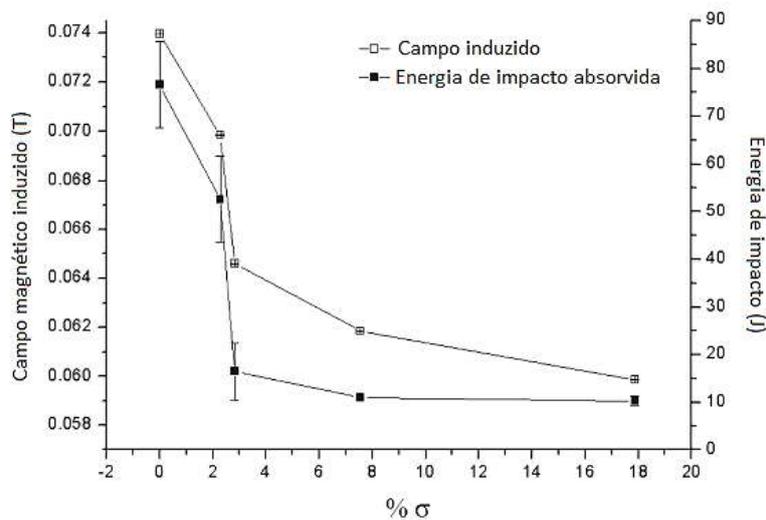
**Figura 24 - Microestruturas de superfície de fratura das amostras envelhecidas a (a) 800 °C e (b) 900 °C por 0,25 h.**



**Fonte: adaptada de [10].**

As variações do campo magnético induzido e da energia de impacto em função da quantidade da fase sigma são apresentadas na Figura 25. Nesta, a energia absorvida diminuiu rapidamente, tendendo a um platô à medida que o material se torna frágil. A Figura 25 também mostra que o campo magnético induzido seguiu a formação da fase sigma e que existe um valor crítico correspondente à condição frágil do material.

**Figura 25 - Campo magnético induzido e energia absorvida em termos da porcentagem da fase sigma.**



**Fonte: adaptada de [10].**

Com base nos resultados, os autores concluíram que a abordagem de testes proposta pode prever com precisão e eficiência o melhor momento para a realização de serviços de manutenção, reduzindo custos e tempo de manutenção.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico encontra-se uma descrição detalhada dos procedimentos metodológicos utilizados no desenvolvimento da técnica de ensaio proposta, baseada no RMB, para detecção da formação de pequenas quantidades de fases paramagnéticas no material estudado.

#### 3.1 MATERIAL UTILIZADO

Para a realização deste trabalho foram utilizadas quatro amostras do AID SAF 2205 (Figura 26), usinadas pelo processo de eletroerosão em formato circular, com diâmetro de 24 mm e espessuras de 4 e 8 mm, como recebidas, ou seja, sem envelhecimento, e também envelhecidas na temperatura de 850 °C a 15 min, em forno de resistência e resfriadas em água. Este tratamento é capaz de gerar 4% de fase sigma no material, o suficiente para a fragilização do aço em estudo, afetando sua microestrutura e comprometendo suas propriedades mecânicas [15]. Estas amostras fazem parte do acervo do Grupo de Simulação de Comportamento dos Materiais (GSCMat) do Instituto Federal da Paraíba (IFPB).

**Figura 26 - Amostras do AID SAF 2205 utilizadas.**



**Fonte: própria.**

A composição química do material da amostra, como recebido, é apresentada na Tabela 1, em percentual de peso.

**Tabela 1 - 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: adaptada de [33].

### 3.2 EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL DE TESTE

O equipamento de teste foi desenvolvido no laboratório do GSCMat do IFPB. A bancada é constituída de dois módulos, sendo um de emissão e outro de aquisição. O esquema da nova configuração experimental está detalhado na Figura 27.

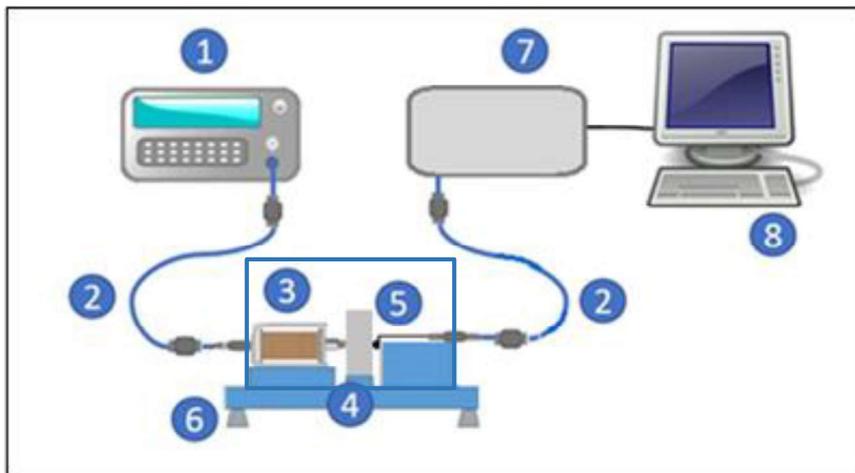
O módulo de emissão é composto por um gerador de função Minipa modelo MFG 4205B e a bobina emissora. O gerador de função transmite para a bobina emissora ondas de diversos formatos, sendo as ondas nas formas triangular e senoidal as que indicam a maior presença de ruído gerado da interação entre o movimento das paredes dos domínios e a microestrutura com menor interferência dos harmônicos da onda principal [6], por isso, optou-se pelo estudo com ondas senoidais para o desenvolvimento da bancada. A bobina é posicionada no centro de uma das faces da amostra, tendo a função de introduzir uma densidade de fluxo magnético no material.

O módulo de aquisição é composto por um sensor de efeito Hall, uma placa de aquisição e um computador. O sensor é posicionado no centro da outra face da amostra, conforme ilustração da Figura 29, com a finalidade de detectar o campo resultante da interação entre a onda emissora e o material. A placa de aquisição, confeccionada no projeto Grades/Endesa do GSCMat do IFPB, faz conexão com o sensor e o computador via cabos USB. O computador realiza a aquisição automática dos dados utilizando o programa Permeabilidade GSCMat desenvolvido pelo grupo.

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

O sensor escolhido é de efeito Hall, linear, modelo SS495A, da Allegro Microsystems, com sensibilidade de 3,125 mVolts/Gauss e tensão de alimentação entre 0 e 10 V, alimentado com uma tensão contínua de 5 V [32].

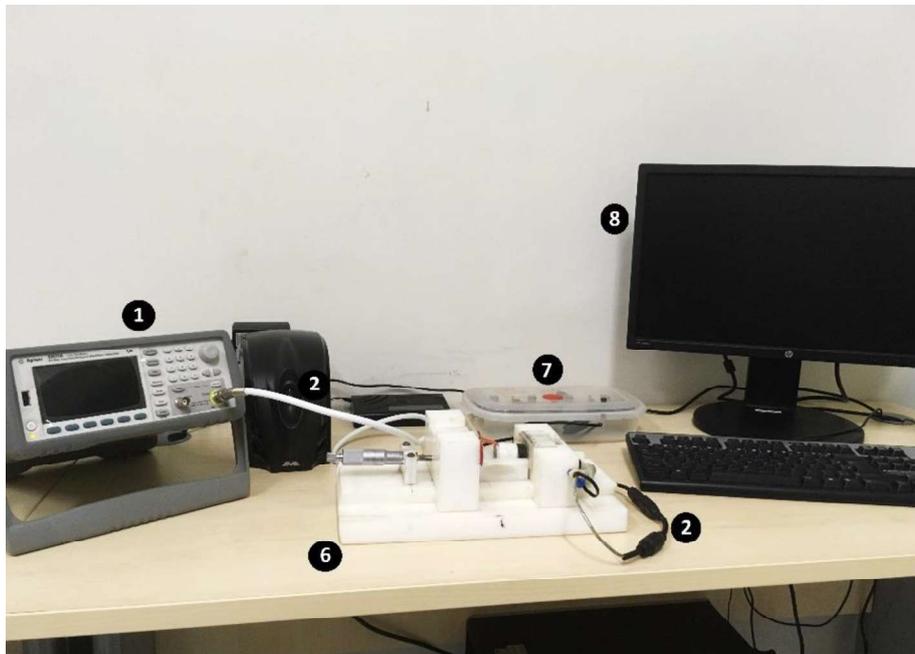
**Figura 27 - Configuração experimental: (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (3) bobina emissora, (4) amostra, (5) sensor de efeito Hall, (6) bancada de testes com gaiola de Faraday, (7) placa de aquisição e (8) computador.**



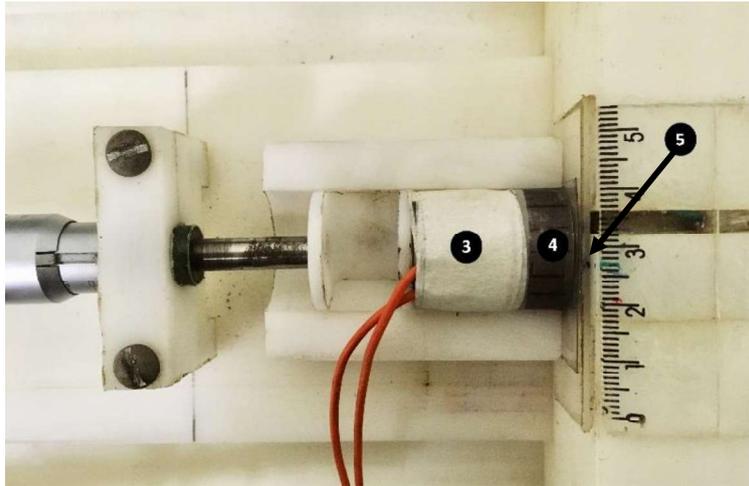
Fonte: própria.

A bancada serve como base para a fixação da bobina, da amostra e do sensor. Foi confeccionada em poliacetal, visando minimizar a influência do material no direcionamento das linhas de campo. As fotos do equipamento de END são apresentadas na Figura 28.

**Figura 28 - Equipamento de ensaio: (a) (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (6) bancada de testes, (7) placa de aquisição, (8) computador e (b) (3) bobina emissora, (4) amostra, (5) sensor de efeito Hall.**



(a)

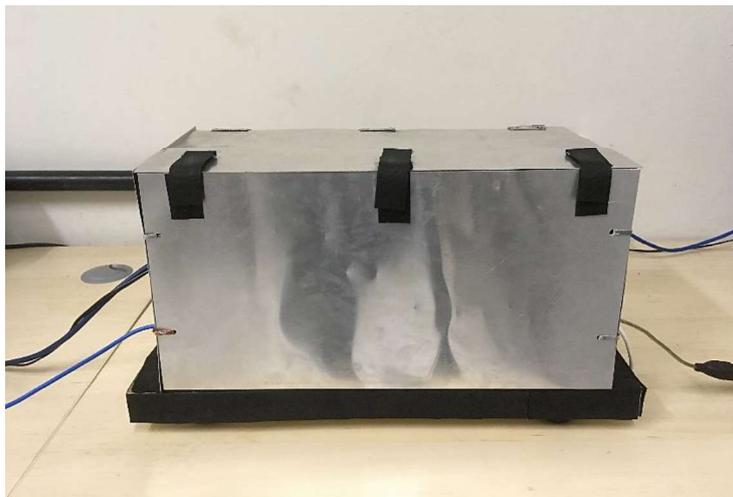


(b)

Fonte: própria.

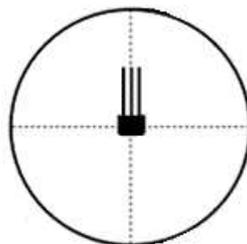
Foi construída uma Gaiola de Faraday, a fim de bloquear interferências de ondas eletromagnéticas externas no experimento. Esta pode ser visualizada por meio da Figura 29.

Figura 29 - Gaiola de Faraday.



Fonte: própria.

Figura 30 - Posicionamento do sensor em relação à amostra.



Fonte: própria.

## 3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 3.3.1 Ensaio Preliminar para Teste da Bancada

Para a verificação da funcionalidade da bancada experimental, foram utilizadas duas amostras com espessuras de 8 mm cada, uma na condição como recebida, que não apresenta precipitados, e outra tratada na temperatura de 850 °C, envelhecida a 15 min.

Foi aplicado um sinal de onda senoidal na bobina emissora, com frequência de 5 Hz, uma das frequências analisadas e recomendadas por [7] para trabalhar com o Ruído Magnético de Barkhausen (RMB), e amplitude de 5 V.

Um estudo da quantidade de sinais a serem adquiridos foi realizado com a finalidade de se obter medidas com o menor intervalo de erro, sem sobreposição de dados. Foram analisadas aquisições de 10, 20 e 30 sinais, com 500 pontos a cada 1 ms, através do sensor de efeito Hall posicionado no lado oposto da amostra em relação a bobina emissora.

O parâmetro utilizado para a análise da onda foi o RMS da onda. Este parâmetro foi escolhido devido a sua simplicidade e uso sucessivo na literatura para interpretar o RMB. O valor RMS é calculado conforme a Equação (5).

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (5)$$

Onde:

N: número do elemento na sequência de medição;

$x_i$ : amplitudes do RMB.

Os RMS dos sinais foram obtidos com um intervalo de confiança de 95%, após aplicação da FFT (do inglês *Fast Fourier Transform*) dos mesmos, com um corte de frequência a partir de 200 Hz, pois para esta configuração, foi observado por [34] que não precisava da utilização de um filtro passa altas e que apenas um corte de frequência seria suficiente.

A Tabela 2 resume todos os parâmetros da onda que foram utilizados para realizar o teste da bancada.

**Tabela 2 - Parâmetros da onda para o teste da bancada.**

Sinal aplicado na bobina emissora	Parâmetros da onda		Quantidade de amostras	Tempo de aquisição (ms)
	Frequências (Hz)	Amplitudes (V)		
Onda Senoidal	5	5	500	1
Quantidade de sinais	Intervalo de confiança	Parâmetro para análise da onda	Tratamento do Sinal	Corte de Frequência (Hz)
10, 20 e 30	95%	RMS do sinal	FFT	200

Fonte: própria.

### **3.3.2 Determinação das Características da Onda Emissora para as Amostras de 8 mm**

Para a determinação das características da onda emissora nas amostras de 8 mm, foram utilizadas duas amostras, uma na condição como recebida, que não apresenta precipitados, e outra tratada na temperatura de 850 °C, envelhecida a 15 min.

O objetivo desta etapa foi determinar a melhor onda para produzir uma amplitude de medida entre as duas condições, a fim de ter sensibilidade para acompanhar a formação da fase fragilizante  $\sigma$ .

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. Foram realizadas a aquisição de 1000 pontos a cada 1 ms, através do sensor de efeito Hall posicionado no lado oposto da amostra em relação a bobina emissora, que detectou o RMB.

Foram capturados 50 sinais de cada arranjo de frequência e amplitude, para cada amostra, com o objetivo de analisar a região que produz a maior diferença de RMS entre a condição com e sem tratamento. Esta quantidade de sinais foi escolhida visando reduzir ainda mais a faixa de erro.

A Tabela 3 resume todos os parâmetros da onda que foram utilizados para a determinação das características da onda emissora nas amostras de 8 mm.

**Tabela 3 - Parâmetros da onda para as amostras de 8 mm.**

Sinal aplicado na bobina emissora	Parâmetros da onda		Quantidade de amostras	Tempo de aquisição (ms)
	Frequências (Hz)	Amplitudes (V)		
Onda Senoidal	5, 10, 15, 20, 25 e 50	0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2; 3; 5; 7 e 9	1000	1
Quantidade de sinais	Intervalo de confiança	Parâmetro para análise da onda	Tratamento do Sinal	Corte de Frequência (Hz)
50	95%	RMS do sinal	FFT	200

Fonte: própria.

### 3.3.3 Determinação das Características da Onda Emissora para as Amostras de 4 mm

Para a determinação das características da onda emissora nas amostras de 4 mm, foram utilizadas duas amostras, uma na condição como recebida, que não apresenta precipitados, e outra tratada na temperatura de 850 °C, envelhecida a 15 min.

O objetivo desta etapa foi determinar a melhor onda para produzir uma amplitude de medida entre as duas condições, a fim de ter sensibilidade para acompanhar a formação da fase fragilizante  $\sigma$ .

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 e 2 V, na bobina emissora. Esta variação de amplitudes até 2V foi definida após a análise dos resultados obtidos com as amostras de 8 mm. Foram realizadas a aquisição de 1000 pontos a cada 1 ms, através do sensor de efeito Hall posicionado no lado oposto da amostra em relação a bobina emissora, que detectou o RMB.

Foram capturados 50 sinais de cada arranjo de frequência e amplitude, para cada amostra, com o objetivo de analisar a região que produz a maior diferença de RMS entre a condição com e sem tratamento. Esta quantidade de sinais foi escolhida visando reduzir ainda mais a faixa de erro.

A Tabela 4 resume todos os parâmetros da onda que foram utilizados para a determinação das características da onda emissora nas amostras de 4 mm.

**Tabela 4 - Parâmetros da onda para as amostras de 4 mm.**

Sinal aplicado na bobina emissora	Parâmetros da onda		Quantidade de amostras	Tempo de aquisição (ms)
	Frequências (Hz)	Amplitudes (V)		
Onda Senoidal	5, 10, 15, 20, 25 e 50	0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75 e 2	1000	1
Quantidade de sinais	Intervalo de confiança	Parâmetro para análise da onda	Tratamento do Sinal	Corte de Frequência (Hz)
50	95%	RMS do sinal	FFT	200

Fonte: própria.

### **3.3.4 Comparação dos Resultados Obtidos com as Duas Espessuras**

Após a captura dos sinais e a análise individual dos dados de cada amostra, foi realizado um estudo comparativo entre as duas espessuras, a fim de observar o efeito da espessura. Optou-se por analisar apenas as frequências de 5, 15, 25 e 50 Hz, para facilitar a visualização dos resultados.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

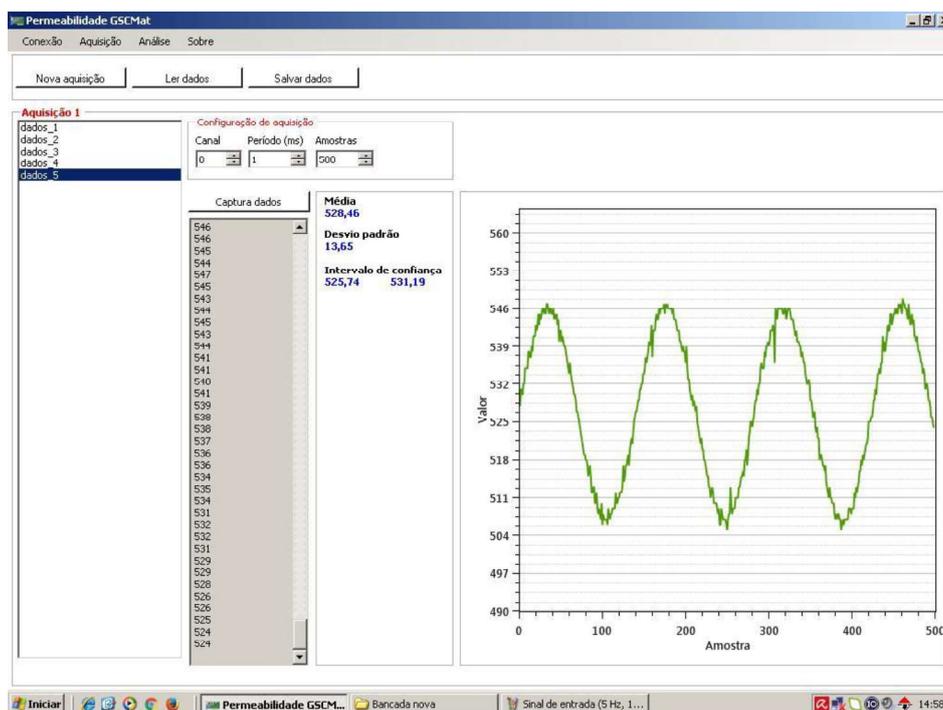
O presente trabalho mostrou a capacidade de um sensor de efeito Hall substituir a bobina receptora e captar o ruído magnético de Barkhausen em um ensaio eletromagnético. Neste capítulo são apresentadas as condições de amplitudes e frequências das ondas emissoras para a realização dos ensaios nas amostras circulares de AID, com espessuras de 4 e 8 mm.

### 4.1 ENSAIO PRELIMINAR PARA TESTE DA BANCADA

A etapa inicial do presente trabalho consistiu na construção de uma bancada de medições conforme a nova configuração proposta de ensaio eletromagnético para análise do Ruído Magnético de Barkhausen (RMB). Testes preliminares foram realizados a fim de verificar a funcionalidade da mesma. Um aço inoxidável duplex foi escolhido para esse estudo.

A Figura 31 apresenta a tela do programa utilizado para realizar a aquisição automática dos sinais. Neste, configura-se o tempo de aquisição e a quantidade de amostras e são retornados a média do sinal, o desvio padrão, o intervalo de confiança de 95% e o gráfico do sinal.

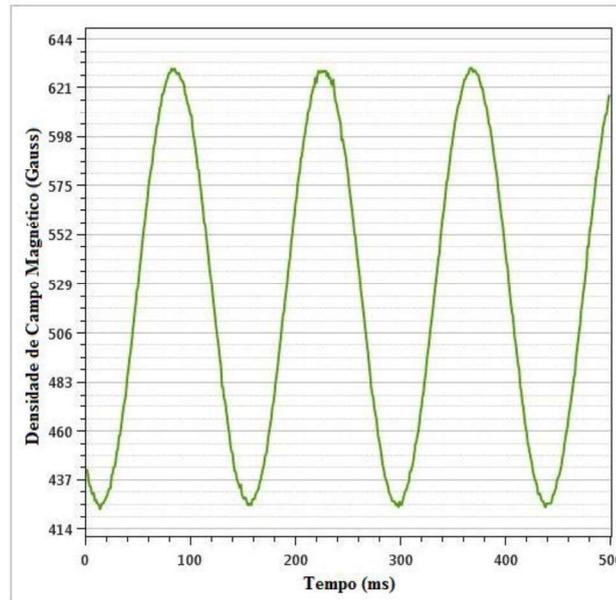
Figura 31 - Tela do programa utilizado para realizar a aquisição automática dos sinais.



Fonte: própria.

A Figura 32 mostra uma onda senoidal com frequência de 5 Hz e amplitude de 5 V, emitida pelo gerador de sinais na bobina e capturada pelo sensor de efeito Hall, sem a presença de uma amostra.

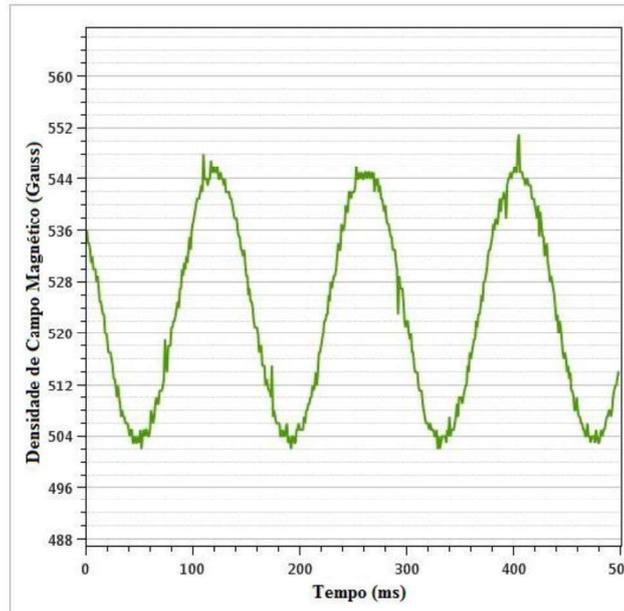
**Figura 32 - Onda gerada na bobina emissora com a aplicação de um sinal com frequência de 5 Hz e amplitude de 5 V captada pelo sensor.**



**Fonte: própria.**

A Figura 33 mostra o sinal após atravessar a amostra sem tratamento. Nesta, nota-se a presença de ruído proveniente da interação da onda com a microestrutura. Neste caso, o material apresenta somente as fases austenita (paramagnética) e ferrita (ferroamagnética).

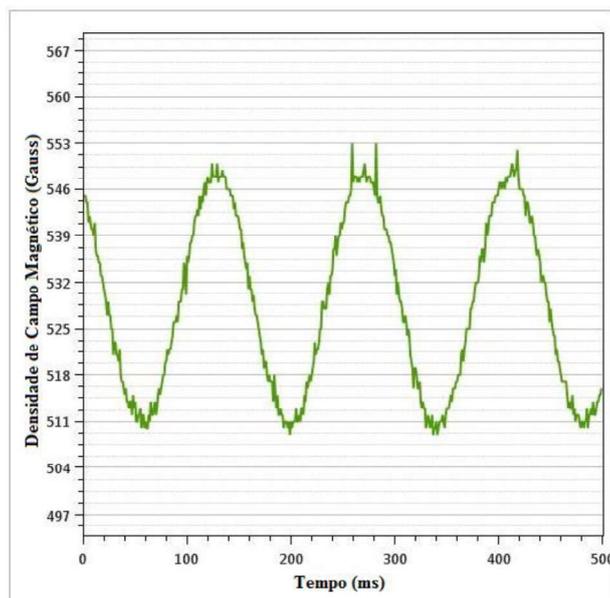
**Figura 33 - Onda resultante da interação da bobina com o material sem tratamento, com a aplicação de um sinal com frequência de 5 Hz e amplitude de 5 V captada pelo sensor.**



**Fonte: própria.**

A Figura 34 mostra o sinal após atravessar a amostra com tratamento. Nesta, nota-se um aumento do ruído, como também uma diminuição da densidade de campo magnético, pois além da ferrita e austenita, tem-se a formação da fase fragilizante sigma ( $\sigma$ ) paramagnética, a partir da estrutura ferrita.

**Figura 34 - Onda resultante da interação da bobina com o material com tratamento, com a aplicação de um sinal com frequência de 5 Hz e amplitude de 5 V captada pelo sensor.**



**Fonte: própria.**

A Figura 35 apresenta a tela do programa utilizado para realizar o tratamento dos dados. Neste, os sinais adquiridos são submetidos à FFT com a aplicação de um corte das frequências abaixo de 200 Hz. São retornados os valores de RMS do sinal, dos harmônicos e dos ruídos, e o gráfico da transformada do sinal. Foi utilizado por [34] um sensor de efeito Hall posicionado junto da bobina emissora, para analisar o ruído magnético de Barkhausen e concluiu que nesta configuração pode-se utilizar o corte de frequência sem a necessidade da utilização do filtro passa altas.

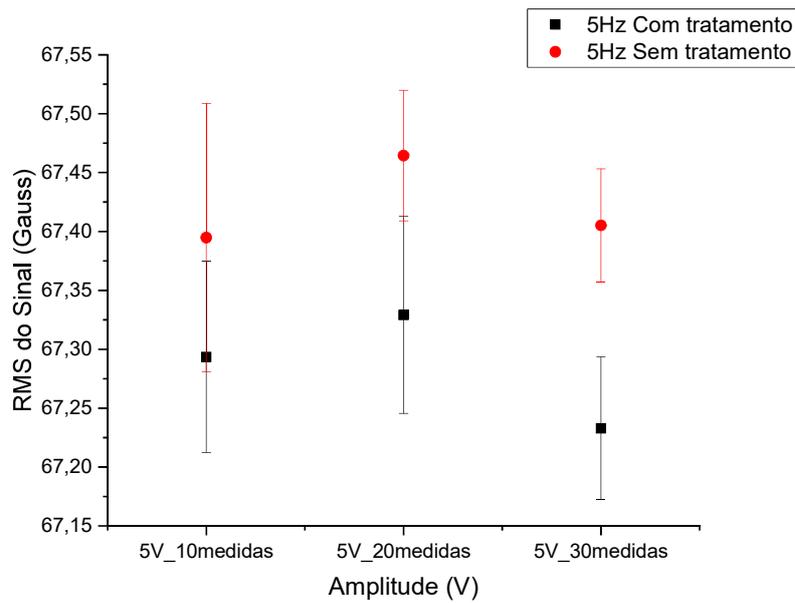
**Figura 35 - Tela do programa utilizado para realizar o tratamento dos sinais adquiridos.**



Fonte: própria.

A Figura 36 apresenta um gráfico amplitude contra RMS do sinal, com frequência de 5 Hz e amplitude de 5 V, das amostras sem tratamento e com tratamento, com três quantidades diferentes de aquisição de sinais, 10, 20 e 30 medições. Estas medições foram realizadas com um intervalo de confiança de 95%.

Figura 36 - Gráfico das amostras com e sem tratamento com aquisição de 10, 20 e 30 sinais.



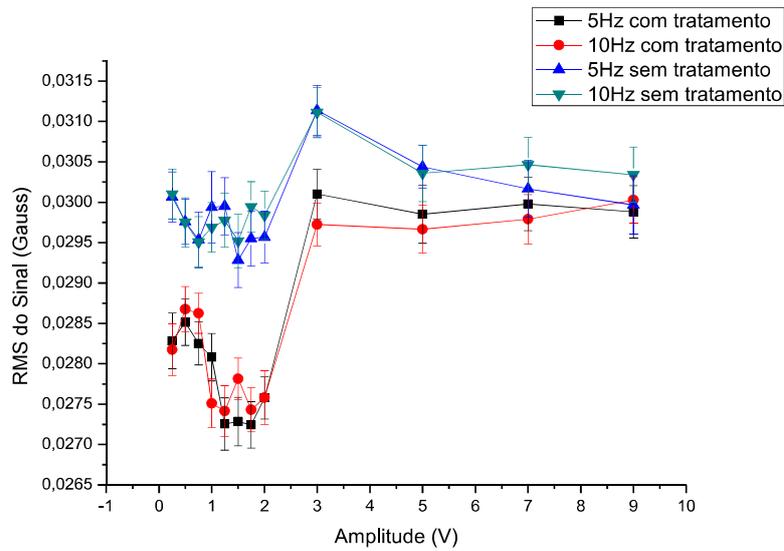
Fonte: própria.

Pela análise da Figura 36 percebe-se que a amostra com tratamento apresentou valores menores de RMS do sinal em relação à amostra sem tratamento, comprovando a influência da presença de precipitados no material em estudo devido à formação da fase  $\sigma$ . Essa redução se deve ao paramagnetismo da fase  $\sigma$  diminuir a permeabilidade do material [10], [16]. Além disso, ao observar o número de aquisições, nota-se que a utilização de 30 sinais apresentou a menor faixa de erro sem sobreposição de dados, com intervalo de confiança de 95%. Logo, essa quantidade de medidas foi adotada para o estudo do ensaio eletromagnético.

## 4.2 ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DA ONDA EMISSORA PARA DETECÇÃO DA FASE SIGMA PARA ESPESSURAS DE 8 MM

A seguir será apresentado o estudo para determinação das características da onda emissora capaz de detectar a presença da fase sigma, pela análise do ruído magnético de Barkhausen, em amostras com espessuras de 8 mm. A Figura 37 mostra a variação do RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras sem precipitado e tratadas na temperatura de 850 °C por 15 min, para as frequências de 5 e 10 Hz e amplitudes de 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2; 3; 5; 7 e 9 V.

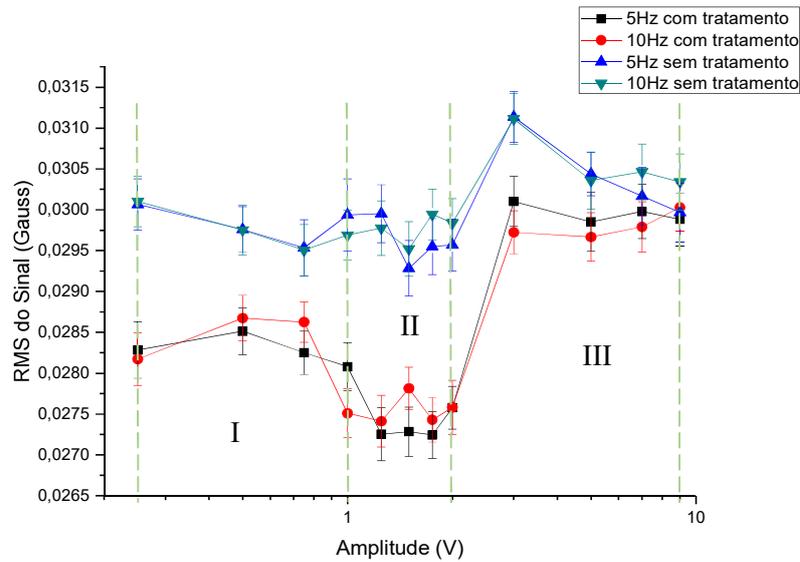
**Figura 37 - RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 8 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 10 Hz.**



**Fonte: própria.**

Pela análise da Figura 37, percebe-se a existência de três regiões distintas, denominadas de I, II e III, uma para amplitudes pequenas (0,25 a 1 V), outra para amplitudes intermediárias (1 a 2 V) e a última para amplitudes maiores (2 a 9 V). Devido à dificuldade de se analisar em um só gráfico valores abaixo de 1 V e acima deste, na escala linear, optou-se por utilizar a escala logarítmica que apresenta uma visualização melhor das regiões, conforme pode-se observar na Figura 38.

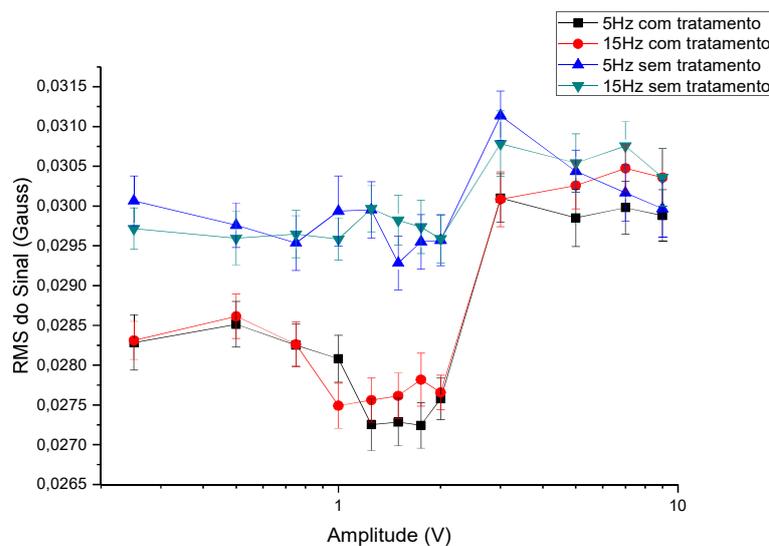
**Figura 38 - RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 8 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 10 Hz.**



Fonte: própria.

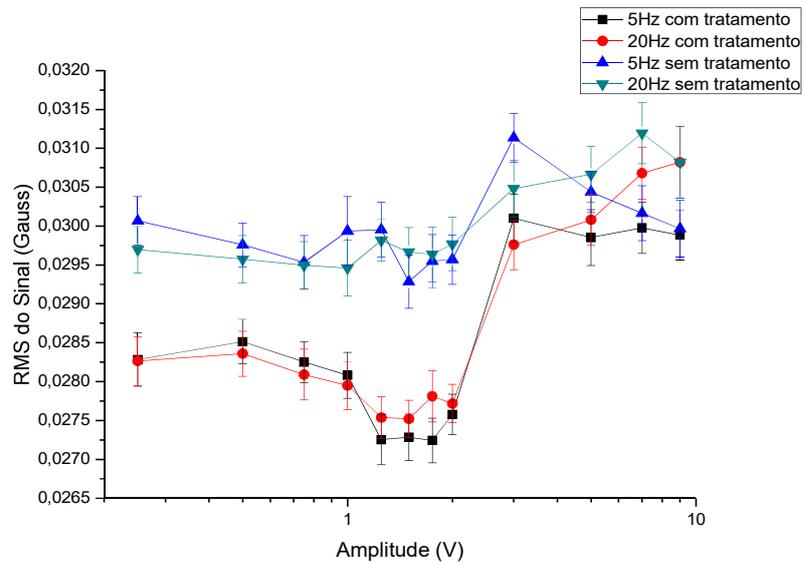
As Figuras 39, 40, 41 e 42 mostram a variação do RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude e da frequência da onda emissora, para as demais frequências (15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz) aplicadas nas amostras de 8 mm, com e sem tratamento, fazendo-se sempre um comparativo com a frequência de 5Hz.

**Figura 39 - RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 8 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 15 Hz.**



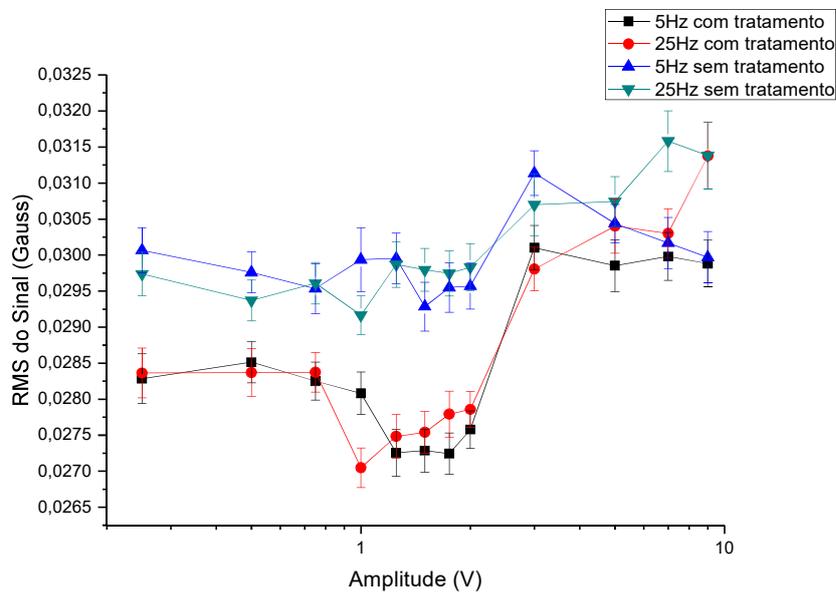
Fonte: própria.

**Figura 40 - RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 8 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 20 Hz.**



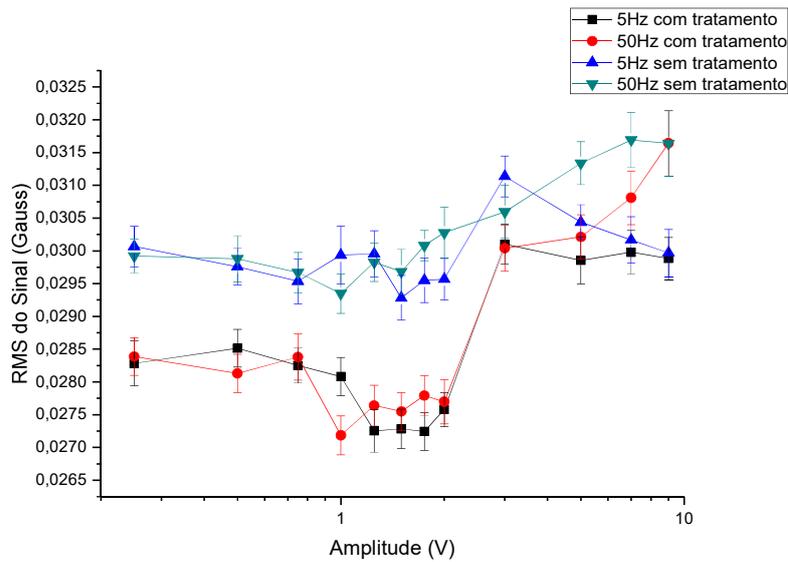
Fonte: própria.

**Figura 41 - RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 8 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 25 Hz.**



Fonte: própria.

**Figura 42 - RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 8 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 50 Hz.**



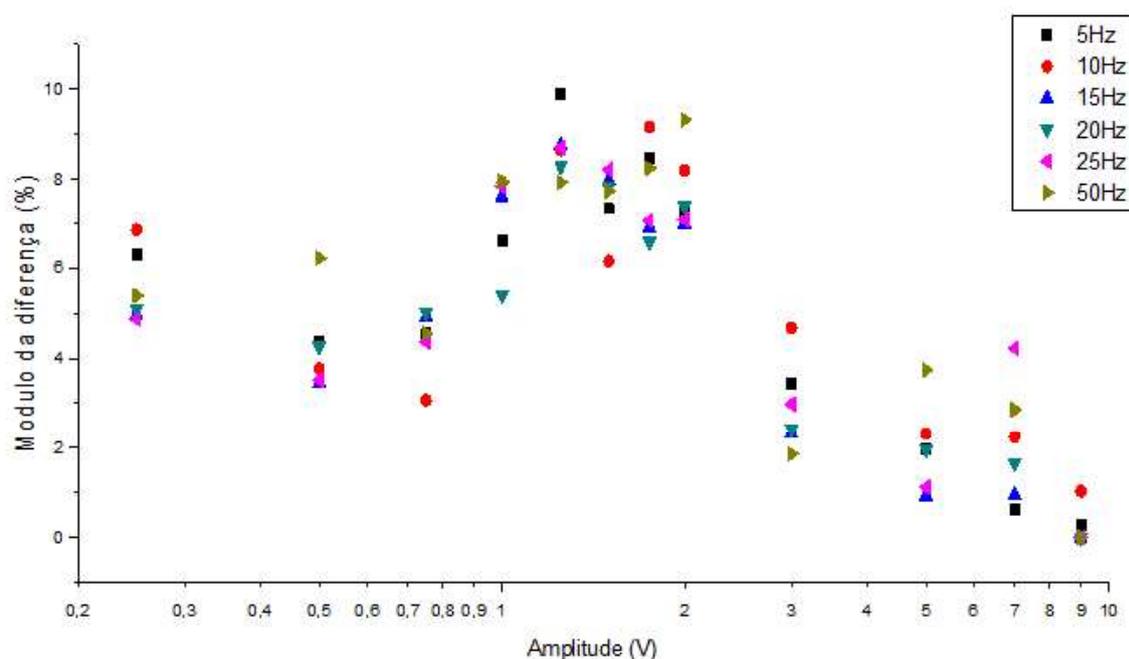
**Fonte: própria.**

Observa-se em todos os gráficos, das Figuras 38 a 42, a presença das mesmas regiões. Nota-se também que os valores do RMS do sinal da amostra com tratamento são menores do que os da amostra sem tratamento. Isto pode ter ocorrido devido a dois fatores: ou ao paramagnetismo da fase sigma ou ao bloqueio do movimento das paredes dos domínios magnéticos, em consequência da presença dessa nova estrutura formada [10], [29].

O comportamento observado na região I pode ser associado ao bloqueio do movimento das paredes dos domínios, pois o fluxo magnético de baixa intensidade não é suficiente para detectar a presença do paramagnetismo da fase formada. Contudo, na região II, como o fluxo magnético é maior, o efeito do paramagnetismo torna-se mais sensível, reduzindo os valores, inclusive observa-se uma diferença maior de RMS entre as duas amostras, justamente pela presença de precipitados na amostra com tratamento. Na região III, como há um grande fluxo magnético tem-se o aumento do efeito do ruído magnético de Barkhausen, devido à movimentação das paredes dos domínios magnéticos, e esse efeito passa a superar o paramagnetismo da fase sigma. Em [16] foram realizados ensaios para medição do RMB em amostras que não passaram por tratamento térmico e em amostras que foram sujeitas a tratamento. Os resultados das medições do RMB observados 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.

Para visualizar a melhor região de trabalho para essa espessura, foi realizada uma análise utilizando a diferença em módulo do RMS das duas condições, com e sem a presença da fase sigma, conforme a Figura 43. Nesta, nota-se diferenças maiores entre as duas condições na região central do gráfico, sendo assim a mais apropriada para o ensaio apresentado na detecção da fase sigma.

**Figura 43 - Módulo da diferença do RMS em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras, para todas as frequências.**



Fonte: própria.

A Tabela 5 resume a presença das regiões no comportamento dos gráficos para as amostras de 8 mm.

**Tabela 5 - Presença das regiões no comportamento dos gráficos para as amostras de 8 mm.**

FREQUÊNCIA	REGIÃO I	REGIÃO II	REGIÃO III
5, 10, 15, 20, 25 e 50 Hz	0,25 V	A partir de 1 V	A partir de 2 V
	0,5 V	1,25 V	3 V
	0,75 V	1,5 V	5 V
	Até 1 V	1,75 V	7 V
		Até 2 V	9 V

Fonte: própria.

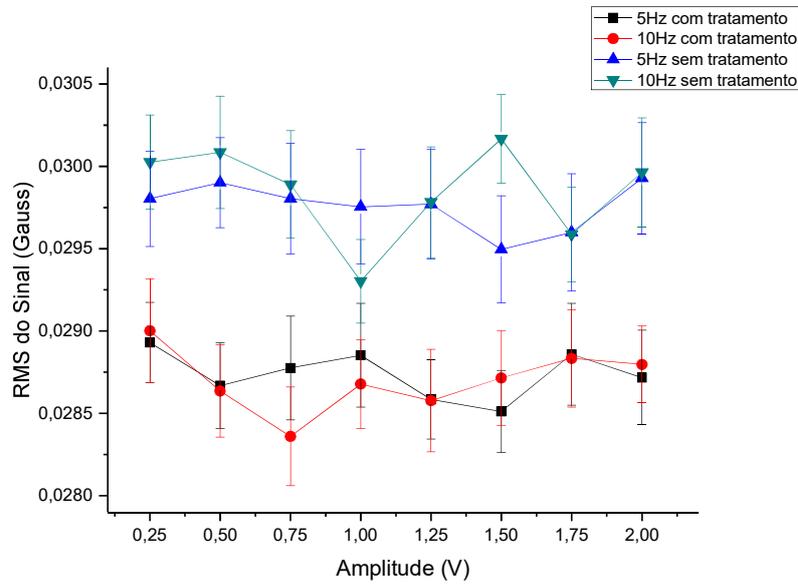
### 4.3 ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DA ONDA EMISSORA PARA DETECÇÃO DA FASE SIGMA PARA ESPESSURAS DE 4 MM

Para a determinação das características da onda emissora a ser aplicada nas amostras de 4 mm, foram utilizadas duas amostras, uma na condição como recebida, ou seja, que não apresenta precipitados, e outra tratada na temperatura de 850 °C, envelhecida por 15 min. Foram aplicados sinais de ondas senoidais na bobina emissora, com frequências de 5, 10, 15, 20, 25 e 50 Hz e amplitudes de 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75 e 2 V. O valor de 2 V corresponde ao final da segunda região da análise das amostras de 8 mm. Estes valores foram escolhidos devido a espessura menor necessitar de uma menor energia de onda para ser analisada e por corresponder à melhor região para análise das amostras de 8 mm.

As Figuras 44, 45, 46, 47 e 48 mostram a variação do RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude e da frequência da onda emissora, para todas as frequências aplicadas nas amostras de 4 mm, com e sem tratamento, fazendo-se sempre um comparativo com a frequência de 5Hz.

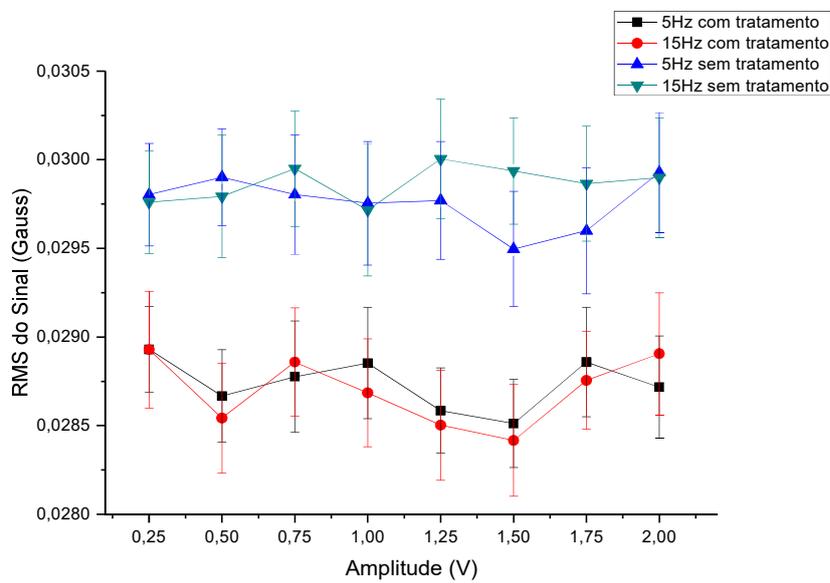
As Figuras 44 e 45 revelam que a aplicação de ondas com frequências de 5, 10 e 15 Hz apresentam, considerando-se a faixa de erro, comportamento semelhantes, ou seja, valores de RMS quase independentes das amplitudes das ondas emissoras. Além disso, as medidas da amostra com tratamento continuaram inferiores em relação às da amostra sem tratamento.

**Figura 44 - RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 10 Hz.**



Fonte: própria.

**Figura 45 - RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 15 Hz.**

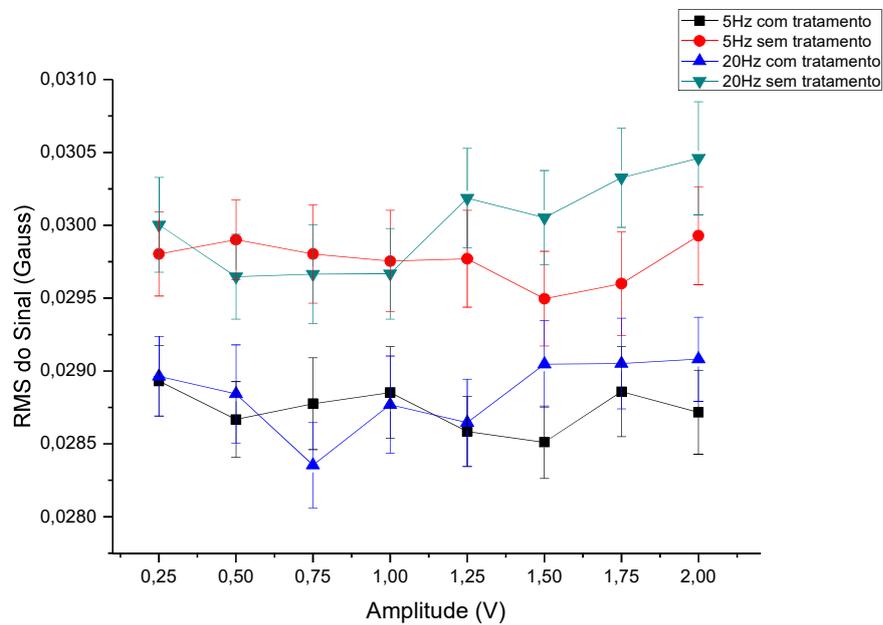


Fonte: própria.

As Figuras 46, 47 e 48 revelam que o aumento da frequência para 20, 25 e 50 Hz leva ao aumento dos valores de RMS para amplitudes acima de 1 V. Isto indica que com a redução

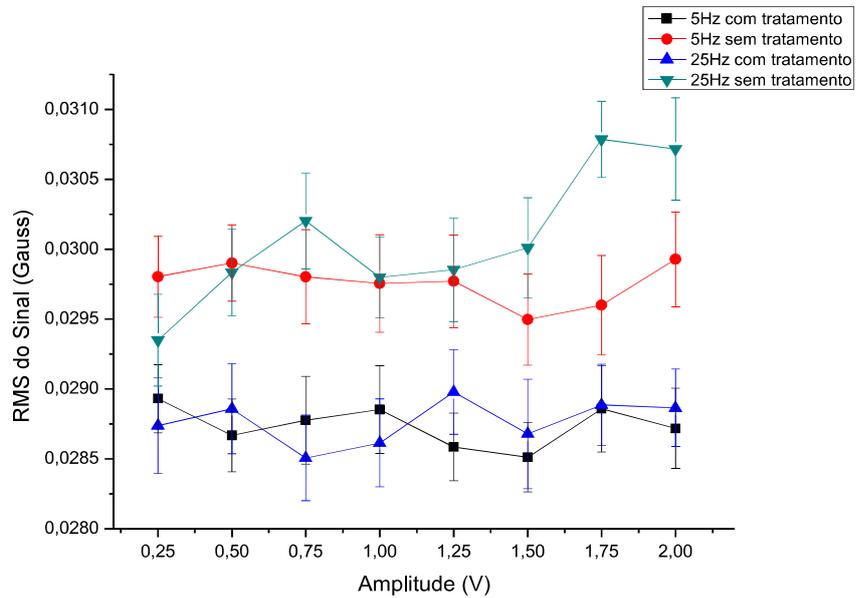
da espessura e a aplicação das ondas estudadas, houve a supressão da primeira região observada para amostras com 8 mm. Pode-se observar que os valores de amplitudes até 2 V para frequências até 15 Hz apresentaram a segunda região, observada nas amostras de 8 mm. Para as frequências a partir de 20 Hz pode-se observar a presença da segunda região para as amplitudes até 1 V e o início da terceira região para as amplitudes entre 1 e 2 V. Assim, a segunda região, que foi considerada como melhor para se trabalhar, passaria a ser de 5 Hz até 15 Hz para todas as amplitudes e até 1 V para as demais frequências estudadas.

**Figura 46 - RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 20 Hz.**



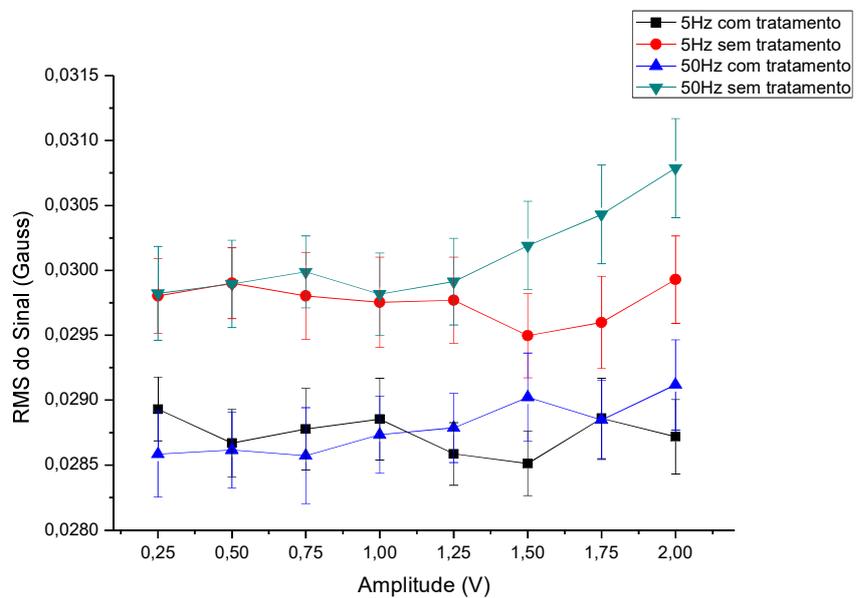
**Fonte: própria.**

**Figura 47 - RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 25 Hz.**



Fonte: própria.

**Figura 48 - RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm com e sem tratamento, para as frequências de 5 e 50 Hz.**



Fonte: própria.

A Tabela 6 resume a presença das regiões no comportamento dos gráficos para as amostras de 4 mm.

**Tabela 6 - Presença das regiões no comportamento dos gráficos para as amostras de 4 mm.**

FREQUÊNCIA	REGIÃO I	REGIÃO II	REGIÃO III
5, 10 e 15 Hz	-	0,25 V 0,5 V 0,75 V 1 V 1,25 V 1,5 V 1,75 V 2 V	-
20, 25 e 50 Hz	-	0,25 V 0,5 V 0,75 V Até 1 V	A partir de 1 V 1,25 V 1,5 V 1,75 V 2 V

Fonte: própria.

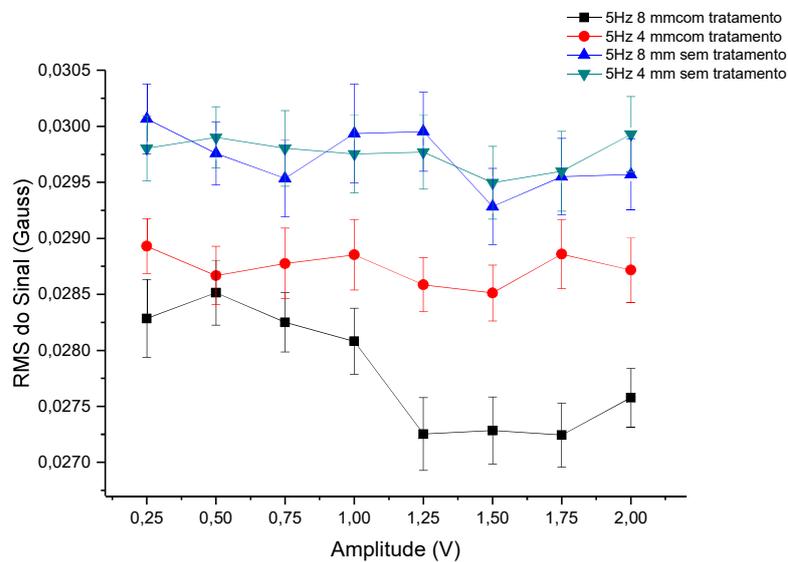
#### 4.4 ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA ENTRE AS DUAS AMOSTRAS

As Figuras 49, 50, 51 e 52 mostram o efeito das espessuras de 4 mm e 8 mm nos valores de RMS em função da amplitude da onda emissora, para as frequências de 5, 15, 25 e 50 Hz. Nota-se para todas as frequências que os valores de RMS para as duas espessuras, para a condição sem tratamento são similares. Porém, com a presença da fase sigma ocorreu uma redução desses para valores aproximadamente independentes das amplitudes estudadas, para a espessura de 4 mm, mas com uma leve tendência de crescimento para a frequência de 50 Hz. Contudo, com o aumento da espessura para 8 mm, nota-se a formação de duas regiões, sendo a primeira até 1 V para a frequência de 5 Hz e até 0,75 V para as frequências de 15, 25 e 50 Hz.

A segunda região formada para as amostras de 8 mm, devido a fase sigma, apresentou valores menores de RMS, isto indica que o aumento da densidade de fluxo magnético é capaz de detectar o efeito do paramagnetismo dessa microestrutura e superar o efeito do bloqueio do

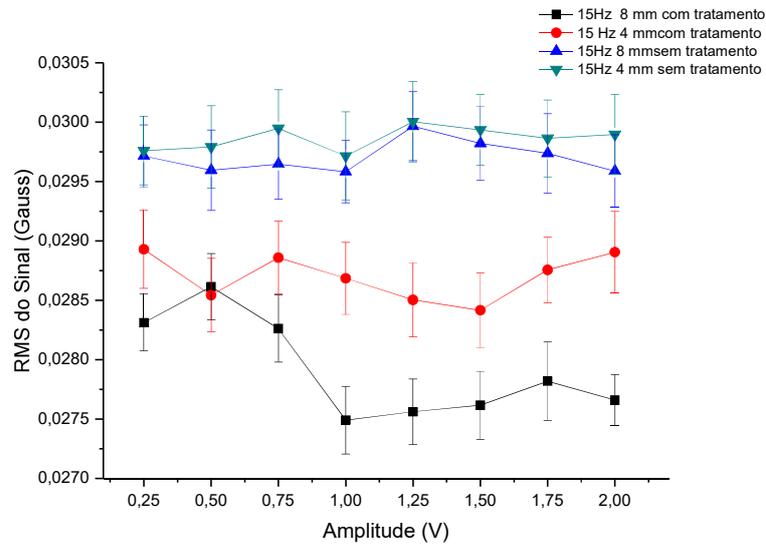
movimento das paredes dos domínios magnéticos, que deve predominar na primeira região. Logo, o aumento da densidade de fluxo magnético leva ao aumento da diferença de valores entre as condições com e sem tratamento, melhorando a detecção da presença da fase prejudicial sigma. Contudo, os resultados para a espessura de 4 mm não apresentaram essa queda, podendo-se supor que a densidade de fluxo magnético aplicada já deve estar na segunda região para a amostra de 4 mm. Todavia, estudos mais detalhados, com densidades de fluxos magnéticos menores, deverão ser realizados em trabalhos futuros para esta espessura, de modo a estudar a primeira região nessas amostras.

**Figura 49 - RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm e 8 mm, com e sem tratamento, para a frequência de 5 Hz.**



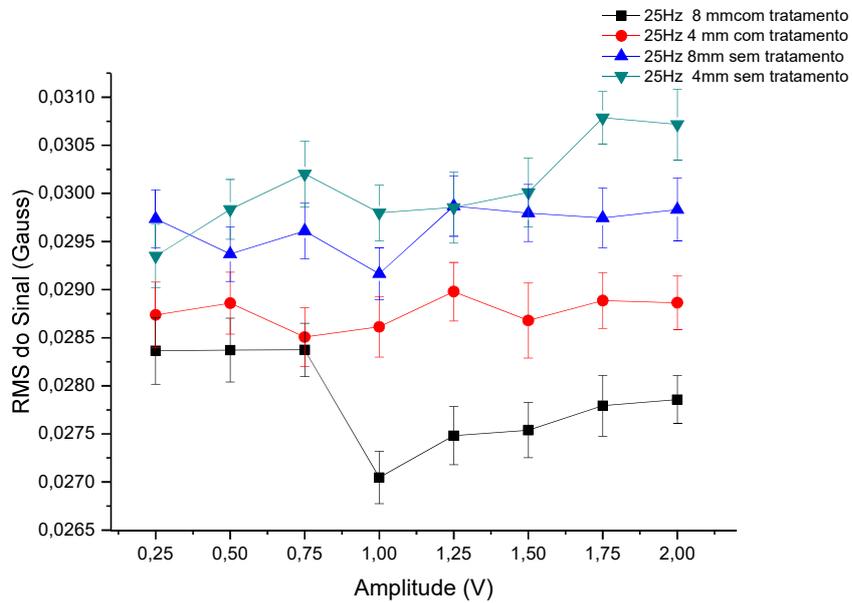
Fonte: própria.

**Figura 50 - RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm e 8 mm, com e sem tratamento, para a frequência de 15 Hz.**



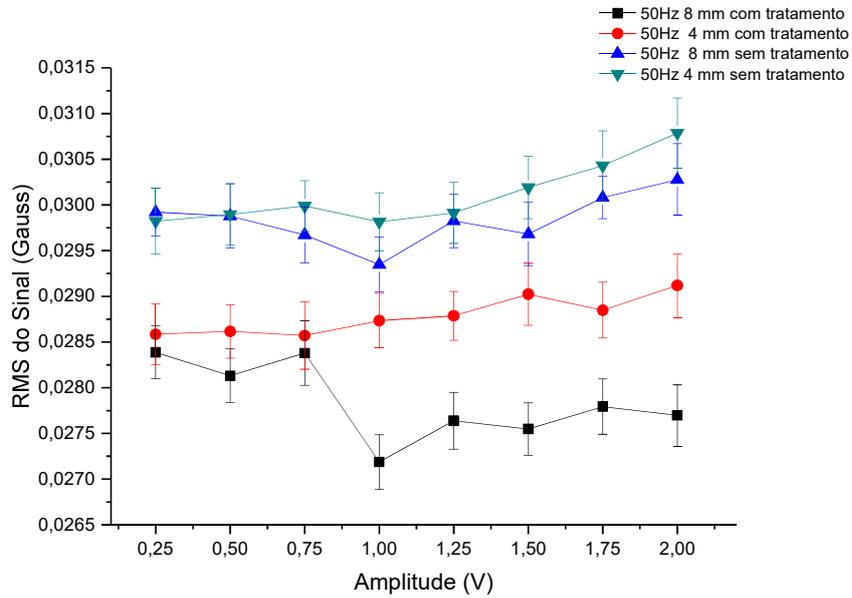
Fonte: própria.

**Figura 51 - RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm e 8 mm, com e sem tratamento, para a frequência de 25 Hz.**



Fonte: própria.

**Figura 52 - RMS do sinal captado pelo sensor Hall, em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras de 4 mm e 8 mm, com e sem tratamento, para a frequência de 50 Hz.**



**Fonte: própria.**

O presente trabalho estudou a possibilidade de substituição da bobina receptora em um ensaio eletromagnético baseado na análise do ruído magnético de Barkhausen, pelo uso de um sensor de efeito Hall. Os resultados mostraram ser capaz a utilização deste para a detecção da presença da formação de novas microestruturas, no caso da fase prejudicial sigma, em um aço inoxidável duplex, além de simplificar o ensaio a ser realizado.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um ensaio eletromagnético para análise do Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) com a substituição da bobina receptora por um sensor de efeito Hall, chegando-se as seguintes conclusões:

- O ensaio eletromagnético realizado na bancada construída foi capaz de detectar a presença da fase sigma, com a substituição da bobina receptora pelo sensor de efeito Hall, sendo determinado que a aquisição de 30 sinais já é suficiente para diferenciar a condição com e sem essa microestrutura, com um intervalo de confiança de 95 %.
- Os valores de RMS das amostras com a presença da fase sigma foram inferiores para as amostras com espessuras de 4 mm e 8 mm, em relação à condição do material somente com as fases ferrita e austenita, presentes no material como recebido.
- A amostra com espessura de 8 mm e com a presença da fase sigma apresentou três regiões distintas dos valores de RMS, sendo a primeira até amplitudes da onda emissora de 0,75 V, a segunda entre 1 V e 2 V e a terceira acima de 2 V, para as amplitudes estudadas.
- A redução dos valores de RMS na primeira região das amostras de 8 mm, ocorreu provavelmente devido aos movimentos das paredes dos domínios magnéticos serem bloqueados pela presença da fase sigma, enquanto que o aumento da densidade de fluxo magnético tornou possível a detecção do paramagnetismo da fase sigma e a formação da segunda região. Contudo, para valores maiores de fluxo magnético tem-se a geração do ruído de Barkhausen, capaz de superar os efeitos da primeira e segunda região e a formação da terceira, com o aumento dos valores de RMS.
- Amostras com espessuras de 4 mm mostraram a presença somente da segunda região, pois a redução dessa leva a necessidade de uma densidade de fluxo magnético menor do que nas amostras de 8mm.
- As ondas formadas com as frequências estudadas e amplitudes até 2 V foram capazes de detectar a presença da fase sigma para amostras de 4 mm. Estas ondas também podem ser aplicadas para amostras com 8 mm de espessura,

sendo que para amplitudes na faixa de 1 V até 2 V tem-se uma maior região de análise.

## 5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros:

- Realizar experimentos com várias amostras nas mesmas condições e dimensões, para verificar a uniformidade das propriedades ao longo do material estudado.
- Realizar o estudo com outras espessuras, como 2 mm e 6 mm, sendo que o Laboratório GSCMat já possui estas amostras com e sem tratamento no seu acervo.
- Realizar estudo com aplicações de filtros digitais para ver o efeito destes na caracterização do ruído de Barkhausen.

## 5.2 TRABALHOS PUBLICADOS

E. de M. Silva *et al.*, R. S. de A. T. Lins, A. F. P. Lima, A. M. R. P. Leite, B. R. de Araújo, F. E. M da Silva, A. M. Rodrigues, “Análise harmônica para acompanhamento de microestrutura paramagnética fragilizante em um aço”, *18º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO) e o 13º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (CBMag)*, Santa Rita do Sapucaí, Minas Gerais, 2018.

E. de M. Silva, R. S. de A. T. Lins, A. F. P. Lima, A. M. R. P. Leite, B. R. de Araújo, M. N. A. Lima, C. R. M. Lima, “Acompanhamento de microestrutura paramagnética fragilizante usando análise harmônica da tensão induzida”, *XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*, Campina Grande, Paraíba, 2018.

## REFERÊNCIAS

- [1] R. N. Faria e L. F. C. P. Lima, *Introdução ao Magnetismo dos Materiais*, 1ª edição. São Paulo, Brasil, 2005.
- [2] S. Ghanei, A. S. Alam, e M. Kashefi, “Nondestructive characterization of microstructure and mechanical properties of intercritically annealed dual-phase steel by magnetic Barkhausen noise technique”, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 607, p. 253–260, 2014.
- [3] A. A. Samimi, T. W. Krause, e L. Clapham, “Multi-parameter Evaluation of Magnetic Barkhausen Noise in Carbon Steel”, *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 35, nº 3, 2016.
- [4] G. M. Vega, T. F. Columbié, J. M. V. Isla, e Y. M. Herrera, “Emisión magnética de Barkhausen en la caracterización del acero AISI 1045 deformado plásticamente”, *Minería y Geología*, vol. 34, p. 223–235, 2018.
- [5] N. Chukwuchekwa, “Investigation of Magnetic Properties and Barkhausen Noise of Electrical Steel”, PhD Thesis. Cardiff University, Wales, 2011.
- [6] J. A. de Carvalho Filho, “Ensaio Eletromagnético Baseado no Ruído de Barkhausen para Acompanhamento de Transformações Microestruturais”, Dissertação de Mestrado. Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- [7] B. R. de Araújo, “Caracterização da Onda Emissora para Geração do Efeito de Barkhausen para Detecção de Precipitados Nanométricos em um Ensaio Eletromagnético”, Dissertação de Mestrado. Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.
- [8] K. Kosmas, C. Sargentis, D. Tsamakis, e E. Hristoforou, “Non-destructive evaluation of magnetic metallic materials using Hall sensors”, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 161, nº 1-2 SPEC. ISS., p. 359–362, 2005.

- [9] E. de M. Silva *et al.*, “Evaluation of the Magnetic Permeability for the Microstructural Characterization of a Duplex Stainless Steel”, *J. Test. Eval.*, vol. 44, n° 3, p. 20130313, 2016.
- [10] E. de M. Silva, J. P. Leite, J. P. Leite, W. M. L. Fialho, V. H. C. de Albuquerque, e J. M. R. S. Tavares, “Induced Magnetic Field Used to Detect the Sigma Phase of a 2205 Duplex Stainless Steel”, *J. Nondestruct. Eval.*, n° 2, 2016.
- [11] R. Badji, M. Bouabdallah, B. Bacroix, C. Kahloun, K. Bettahar, e N. Kherrouba, “Effect of solution treatment temperature on the precipitation kinetic of  $\sigma$ -phase in 2205 duplex stainless steel welds”, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 496, n° 1–2, p. 447–454, 2008.
- [12] M. Martins e C. Luiz Carlos, “Microstructural characteristics and corrosion behavior of a super duplex stainless steel casting”, *Mater. Charact.*, vol. 60, n° 2, p. 150–155, 2009.
- [13] E. de M. Silva, V. H. C. de Albuquerque, J. P. Leite, A. C. G. Varela, E. P. de Moura, e J. M. R. S. Tavares, “Phase Transformations Evaluation on a UNS S31803 Duplex Stainless Steel based on Nondestructive Testing”, *Mater. Sci. Eng. a*, 2009.
- [14] P. G. Normando, E. P. Moura, J. A. Souza, S. S. M. Tavares, e L. R. Padovese, “Ultrasound, eddy current and magnetic Barkhausen noise as tools for sigma phase detection on a UNS S31803 duplex stainless steel”, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 527, p. 2886–2891, 2010.
- [15] S. S. M. Tavares, J. M. Pardal, J. L. Guerreiro, A. M. Gomes, e M. R. da Silva, “Magnetic detection of sigma phase in duplex stainless steel UNS S31803”, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 322, p. L29–L33, 2010.
- [16] E. A. Huallpa, E. F. de Monlevade, J. Capó Sánchez, M. A. Campos, L. Padovese, e H. Goldenstein, “Use of Magnetic Barkhausen Noise (MBN) to Follow Up the Formation of Sigma Phase in Saf2205 (UNS S31803) Duplex Stainless Steel”, *Mater. Res.*, vol. 19, n° 5, p. 1008–1016, 2016.

- [17] F. S. J. Holanda, “Efeitos de Superfície nas Propriedades Magnéticas do Nanocompósito de CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Ag”, Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, 2012.
- [18] B. D. Cullity e C. D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials*, 2nd ed. USA, 2008.
- [19] W. D. Callister e D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering an Introduction*, 8th ed. USA, 2009.
- [20] C. P. Serna-Giraldo, “Avaliação de Juntas Soldadas de Aços Carbono Através do Ruído Magnético de Barkhausen”, Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.
- [21] A. J. Moses, H. V. Patel, e P. I. Williams, “AC Barkhausen Noise in Electrical Steels: Influence of Sensing Technique on Interpretation of Measurements”, *J. Electr. Eng.*, vol. 57, n° 8 SUPPL, p. 3–8, 2006.
- [22] M. Caldas-Morgan e L. R. Padovese, “Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational Barkhausen method”, *NDT&E Int.*, vol. 45, p. 148–155, 2012.
- [23] M. A. Caldas Morgan, “Ruído Magnético de Barkhausen contínuo rotacional”, Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.
- [24] C. P. Serna-Giraldo e L. R. Padovese, “Avaliação de Soldagem de Aço Estrutural através do Ruído Magnético de Barkhausen”, *Soldag. Inspeção*, vol. 15, n° 4, p. 273–280, 2010.
- [25] F. de los Reyes-Rodríguez, J. Capó-Sanchez, E. Franco-Fidalgo, e G. de Diego-Velasco, “Caracterización del envejecimiento de tuberías de vapor de centrales térmicas empleando el efecto Barkhausen”, *Ingeniería Mecánica*, vol. 15, n° 2, p. 123–133, 2012.
- [26] V. P. Vylezhnev, V. S. Malyshev, e Y. N. Simonov, “Effect of Plastic Deformation on

- Magnitude of Barkhausen Effect in Steel 40”, *Met. Sci. Heat Treat.*, vol. 57, n° 5–6, p. 261–263, 2015.
- [27] C. P. Serna-Giraldo e L. R. Padovese, “Monitoring of carbon steels welded joints by magnetic Barkhausen noise”, *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 23, n° 3, p. 413–420, 2015.
- [28] A. J. Sedriks, *Corrosion of Stainless Steels*, 2nd ed. USA, 1996.
- [29] R. Magnabosco, “Kinetics of Sigma Phase Formation In a Duplex Stainless Steel”, *Mater. Res.*, vol. 12, n° 3, p. 321–327, 2009.
- [30] M. S. da Luz, “Efeito Hall em supercondutores a campo magnético nulo”, Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, 2007.
- [31] Honeywell, *Hall Effect Sensing Application*. 2004.
- [32] M. Allegro, *Low Noise, Linear Hall Effect Sensor ICs with Analog Output*. 2019.
- [33] F. A. França Neto, “Estudo de uma nova técnica não destrutiva, baseada em medidas de permeabilidade magnética, para acompanhamento da fragilização de um aço inoxidável duplex”, Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.
- [34] A. M. R. P. Leite, “Ensaio Eletromagnético para Detecção de Anisotropia Magnética por Meio da Análise do Ruído Barkhausen”, Dissertação de Mestrado. Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.