



**Amanda Medeiros Rodrigues**

**Caracterização do Ruído Magnético de Barkhausen em  
Aço Utilizando Transformada Wavelet Discreta para  
Detecção do Constituinte Sigma**

**João Pessoa - PB**

**Junho de 2022**



**Amanda Medeiros Rodrigues**

## **Caracterização do Ruído Magnético de Barkhausen em Aço Utilizando Transformada Wavelet Discreta para Detecção do Constituinte Sigma**

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

Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Edgard de Macedo Silva, Dr.  
Orientador

Suzete Élide Nóbrega Correia, Dra  
Coorientadora

João Pessoa – PB, junho de 2022

©Amanda Medeiros Rodrigues – medeiros.amanda@academico.ifpb.edu.br

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

R696c

Rodrigues, Amanda Medeiros.

Caracterização do ruído magnético de Barkhausen em aço utilizando transformada wavelet discreta para detecção do constituinte sigma / Amanda Medeiros Rodrigues. – 2022.

72 f. : il.

Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2022.

Orientação : Prof<sup>o</sup> D.r Edgard de Macedo Silva.

Coorientação : Prof<sup>a</sup> D.ra Suzete Élide Nóbrega Correia.

1. Ruído magnético de Barkhausen. 2. Transformada de wavelet discreta. 3. Aço inoxidável duplex. 4. Análise de formação da fase sigma. I. Título.

CDU 537.8:621.391(043)

Lucrecia Camilo de Lima

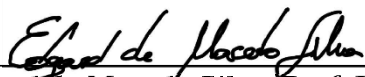
Bibliotecária – CRB 15/132

# **Caracterização do Ruído Magnético de Barkhausen em Aço Utilizando Transformada Wavelet Discreta para Detecção do Constituinte Sigma**

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.

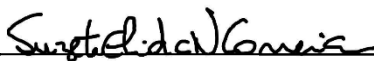
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 21 / 06 / 2022.

## **BANCA EXAMINADORA**



---

*Edgar de Macedo Silva, Prof. Dr., IFPB*  
*Orientador*



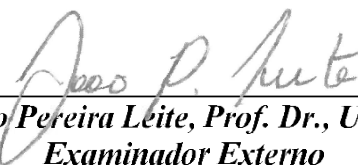
---

*Suzete Élida Nóbrega Correia, Prof.ª Dr.ª, IFPB*  
*Coorientadora*



---

*Alfredo Gomes Neto, Prof. Dr., IFPB*  
*Examinador Interno*



---

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

João Pessoa – PB  
Junho de 2022

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela dádiva da vida, por todas as conquistas e aprendizados durante este percurso, e por ter me dado forças para não desistir dos meus objetivos.

Aos meus pais, principalmente à minha mãe Maria Dalva, e minhas irmãs, por me acolherem e estarem comigo nas tribulações, me dando ânimo para seguir.

Ao meu sobrinho Francisco, pela alegria.

Aos meus orientadores, Edgard de Macedo e Suzete Correia, pela generosidade, motivação e paciência para a concretização deste trabalho.

Aos participantes da minha banca, Alfredo Gomes e João Pereira Leite, pelas contribuições e sugestões enriquecedoras.

Aos meus amigos, que estiveram comigo durante essa árdua caminhada.

Aos meus colegas de curso, pela constante troca de conhecimento, incentivos e auxílio na minha vida acadêmica.

Aos meus professores, que foram indispensáveis na construção do meu crescimento profissional e pessoal, contribuindo grandemente para minha chegada até aqui.

Ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB), por ter me proporcionado tantos aprendizados, suportes e experiências valiosas.

## RESUMO

Ensaio eletromagnéticos não destrutivos vêm sendo empregados para acompanhar transformações de fases que possam interferir nas propriedades mecânicas de materiais ferromagnéticos. No presente trabalho, o ruído magnético de Barkhausen (RMB) é avaliado através da transformada wavelet discreta (TWD), já que as interações das paredes dos domínios com a presença de novas microestruturas geram picos de tensões, os quais podem ser detectados. Nesse sentido, o aço inoxidável duplex (AID) é utilizado para o estudo, pois, quando submetido a ciclos térmicos superiores a 600 °C, sofre fragilização devido à presença de uma fase paramagnética denominada sigma, que muda a permeabilidade do material. Um ensaio é apresentado para acompanhar a formação dessa fase em um AID SAF 2205. Sob essa ótica, a primeira fase do experimento foi realizada aplicando-se a TWD com as famílias Daubechies de ordem 1 (Db1), 5 (Db5) e 10 (Db10) e seis níveis de detalhes para a frequência de 5 Hz. Assim, foi verificado que apenas dois níveis de detalhes eram necessários para prosseguir. Após isso, as mesmas famílias foram introduzidas para as frequências de 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz, e percebeu-se que há diferença na aplicação de um ou dois níveis. Concluiu-se que a análise do ruído magnético de Barkhausen utilizando a técnica de processamento de sinais pelo uso da TWD mostrou-se eficaz na detecção da formação de precipitados no interior do material, que levam à fragilização do mesmo. Os resultados obtidos com a utilização de ondas emissoras de 5 Hz, 25 Hz e 50 Hz foram satisfatórios, entretanto as ondas de 75 Hz e 100 Hz não lograram êxito para estas aplicações.

## **ABSTRACT**

Non-destructive electromagnetic tests have been used to monitor phase transformations that may interfere with the mechanical properties of ferromagnetic materials. In the present work, the Barkhausen magnetic noise (BMN) is evaluated through the discrete wavelet transform (DWT), since the interactions of the domain walls with the presence of new microstructures generate voltage peaks, which can be detected. In this sense, duplex stainless steel (DSS) is used for the study because, when subjected to thermal cycles above 600 °C, they suffer embrittlement due to the presence of a paramagnetic phase called sigma, which changes the permeability of the material. An assay is presented to follow the formation of this phase in an DSS SAF 2205. From this perspective, the first phase of the experiment was carried out by applying the DWT with Daubechies families of order 1 (Db1), 5 (Db5) and 10 (Db10) and six levels of detail for the 5 Hz frequency. Thus, it was found that only two levels of detail were needed to proceed. After that, the same families were introduced for the frequencies of 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz and 100 Hz, and it was noticed that there is a difference in the application of one or two levels. It was concluded that the analysis of the Barkhausen magnetic noise using the signal processing technique using DWT proved to be effective in detecting the formation of precipitates within the material, which lead to its embrittlement. The results obtained with the use of emitting waves of 5 Hz, 25 Hz and 50 Hz were satisfactory, however the waves of 75 Hz and 100 Hz were not successful for these applications.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de magnetização.....	18
Figura 2 - Experimento de Barkhausen. a) Aparato experimental para detecção do ruído de Barkhausen. b) Curva de magnetização esquemática.....	20
Figura 3 - Microestrutura na condição inicial do aço duplex.....	22
Figura 4 - Diagrama de formação de fase sigma para aço inoxidável duplex SAF 2205.....	23
Figura 5 - Microscopia óptica da fase sigma com ataque com KOH 10%.....	24
Figura 6 - Desenho esquemático dos equipamentos.....	25
Figura 7 - Medidas de RMS de amostras com e sem a precipitação da fase sigma, para ondas emissora de 5 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.....	26
Figura 8 - Medidas de RMS de amostras com e sem a precipitação da fase sigma, para ondas emissora de 5 Hz e 25 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V.....	27
Figura 9 - Bloco de emissão e recepção do sinal (detalhes internos). Bobina emissora do sinal (1); bobina receptora do sinal (2); amostra do material (3); carcaça do bloco com aterramento (4); amostra do material em geometria circular (5).....	27
Figura 10 - Variação dos valores RMS do ruído na bobina receptora em função da frequência e amplitude da onda aplicada na bobina emissora.....	29
Figura 11 - Medidas RMS do ruído na bobina receptora em função das amplitudes das ondas emissoras, para as frequências de 5 Hz e 15 Hz, para amostras com e sem a formação da fase sigma. Amostras com 4 mm de espessura.....	30
Figura 12 - Análise bidimensional de um sinal utilizando a STFT.....	31
Figura 13 - Análise de um sinal utilizando a transformada wavelet.....	31
Figura 14 - Representação de uma wavelet finita (a) e uma senoide infinita (b) de curta duração.....	32
Figura 15 - Representação da wavelet em baixa (a) e alta escala (b).....	32



Figura 16 - Diagrama de blocos básico para decomposição de um sinal.....	35
Figura 17 - Estrutura típica de decomposição em três níveis.....	35
Figura 18 – Exemplo de um sinal com ruído de Barkhausen decomposto em níveis de detalhe de D1 a D5.....	37
Figura 19 – Aplicação da TWD em um sinal com dois senos de frequências distintas.....	38
Figura 20 - Forno usado para o aquecimento das amostras.....	42
Figura 21 - Desenho esquemático dos equipamentos utilizados.....	43
Figura 22 - Fluxograma dos procedimentos a serem realizados.....	45
Figura 23 - Microestrutura típica de um aço inoxidável duplex SAF 2205. a) Como recebida. b) Tratada 850 °C. Aumento 400X.....	46
Figura 24 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e dois níveis de resolução.....	48
Figura 25 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e três níveis de resolução.....	48
Figura 26 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e quatro níveis de resolução.....	49
Figura 27 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e cinco níveis de resolução.....	49
Figura 28 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e seis níveis de resolução.....	50
Figura 29 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db1 e seis níveis de resolução.....	51
Figura 30 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e dois níveis de resolução.....	52

Figura 31 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e três níveis de resolução.....	52
Figura 32 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e quatro níveis de resolução.....	53
Figura 33 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e cinco níveis de resolução.....	53
Figura 34 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e seis níveis de resolução.....	54
Figura 35 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db5 e seis níveis de resolução.....	55
Figura 36 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e dois níveis de resolução.....	56
Figura 37 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e três níveis de resolução.....	57
Figura 38 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e quatro níveis de resolução.....	57
Figura 39 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e cinco níveis de resolução.....	58
Figura 40 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e seis níveis de resolução.....	58
Figura 41 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db10 e seis níveis de resolução.....	59

Figura 42 - Variação do valor RMS do sinal de 25 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e dois níveis de resolução.....	60
Figura 43 - Variação do valor RMS do sinal de 25 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e dois níveis de resolução.....	61
Figura 44 - Variação do valor RMS do sinal de 25 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e dois níveis de resolução.....	61
Figura 45 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 25 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família DB1 e dois níveis de resolução.....	63
Figura 46 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 25 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família DB5 e dois níveis de resolução.....	63
Figura 47 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 25 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família DB10 e dois níveis de resolução.....	64
Figura 48 - Variação do valor RMS do sinal de 50 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e dois níveis de resolução.....	65
Figura 49 - Variação do valor RMS do sinal de 50 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e dois níveis de resolução.....	66
Figura 50 - Variação do valor RMS do sinal de 50 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e dois níveis de resolução.....	66
Figura 51 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 50 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db1 e dois níveis de resolução.....	67

Figura 52 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 50 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db5 e dois níveis de resolução.....	68
Figura 53 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 50 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db10 e dois níveis de resolução.....	68
Figura 54 - Variação do valor RMS do sinal de 75 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e dois níveis de resolução.....	69
Figura 55 - Variação do valor RMS do sinal de 75 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e dois níveis de resolução.....	70
Figura 56 - Variação do valor RMS do sinal de 75 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e dois níveis de resolução.....	70
Figura 57 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 75 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db1 e dois níveis de resolução.....	71
Figura 58 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 75 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db5 e dois níveis de resolução.....	72
Figura 59 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 75 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db10 e dois níveis de resolução.....	73
Figura 60 - Variação do valor RMS do sinal de 100 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e dois níveis de resolução.....	74
Figura 61 - Variação do valor RMS do sinal de 100 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e dois níveis de resolução.....	75

Figura 62 - Variação do valor RMS do sinal de 100 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e dois níveis de resolução.....	75
Figura 63 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db1 e dois níveis de resolução.....	76
Figura 64 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db5 e dois níveis de resolução.....	77
Figura 65 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db10 e dois níveis de resolução.....	77
Figura 66 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75Hz e 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db1 e um nível de resolução.....	78
Figura 67 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75Hz e 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db1 e dois níveis de resolução.....	79
Figura 68 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75Hz e 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db5 e um nível de resolução.....	80

Figura 69 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75Hz e 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db5 e dois níveis de resolução.....	80
Figura 70 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75Hz e 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db10 e um nível de resolução.....	81
Figura 71 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75Hz e 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db10 e dois níveis de resolução.....	82
Figura 72 - Variação RMS do sinal de 5 Hz e 25 Hz para amostras com e sem precipitados, obtidos por Lima (2019).....	83
Figura 73 - Variação RMS do sinal de 5 Hz e 25 Hz para amostras com e sem precipitados, através da TWD com a família Db1 e dois níveis de resolução.....	84
Figura 74 - Variação dos valores RMS do ruído na bobina receptora em função da frequência e amplitude da onda aplicada na bobina emissora, obtidos por Viegas (2019).....	84
Figura 75 - Variação RMS do sinal de 5 Hz e 25 Hz para amostras com e sem precipitados, através da TWD com a família Db10 e um nível de resolução.....	85

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 -	Composição química do AID SAF 2205	42
Tabela 2 -	Características das ondas emisoras a serem utilizadas	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AID	Aço Inoxidável Duplex
A	Coefficiente de Aproximação
D	Coefficiente de Detalhe
Db	Daubechies
DFT	Transformada Discreta de Fourier
D1	Coefficientes de Detalhe na Resolução Um
D2	Coefficientes de Detalhe na Resolução Dois
D3	Coefficientes de Detalhe na Resolução Três
D4	Coefficientes de Detalhe na Resolução Quatro
D5	Coefficientes de Detalhe na Resolução Cinco
D6	Coefficientes de Detalhe na Resolução Seis
END	Ensaio Não Destrutivo
Hz	Hertz
mm	Milímetro
N	Número de Amostras
RMB	Ruído Magnético de Barkhausen
RMS	<i>Root Means Square</i>
SAF	<i>Sandvik Austenite Ferrite</i>
STFT	<i>Short-time Fourier Transform</i>
TF	Transformada de Fourier
TW	Transformada Wavelet
TWC	Transformada Wavelet Contínua
TWD	Transformada Wavelet Discreta
V	Volts



# SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>15</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 Objetivos .....	17
1.1.1 Objetivo geral .....	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
2.1 Ruído magnético de barkhausen .....	18
2.2 Aço inoxidável duplex .....	22
2.3 análise da formação da fase sigma através do rmb .....	24
2.4 Transformada wavelet.....	30
2.4.1 Wavelets .....	31
2.5 Trabalhos relacionados à transformada wavelet .....	39
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>41</b>
3.1 Material de estudo .....	41
3.2 Bancada experimental para medida do ruído magnético de barkhausen .....	42
3.3 Procedimentos experimentais .....	43
3.3.1 Características dos sinais a serem utilizados.....	43
3.3.2 Procedimentos .....	44
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>46</b>
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>86</b>
5.1 propostas para trabalhos futuros .....	87
5.2 trabalhos publicados.....	88
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>89</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A formação de novas microestruturas dentro de alguns materiais, devido à imposição de ciclos térmicos, leva a mudanças nas suas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão. Métodos não destrutivos como ultrassom, correntes parasitas e ruído magnético de Barkhausen (RMB) vêm sendo estudados para aplicações nestes casos. Esses ensaios são aplicados para monitoramento de tubulações dos setores de petróleo e gás, em serviço, em busca da determinação do melhor momento para intervenção em estruturas, sem que ocorram vazamentos, perdas econômicas, humanas e desastres ecológicos. Entre os materiais utilizados nesses setores, destaca-se o AID, mas a sua permanência em temperaturas superiores a 600 °C provoca a formação de fases fragilizantes, com destaque para a fase sigma. A precipitação dessa microestrutura prejudica as suas propriedades mecânicas, sobretudo a tenacidade ao impacto e a resistência à corrosão.

Estudos relacionados à formação da fase sigma são de extrema importância, visto que pequenas quantidades, em torno de 4%, já são suficientes para fragilizar o AID. Em decorrência disso, é comum que em alguns casos outras fases precipitadas nestes aços sejam desconsideradas, elegendo-se a fase sigma como a principal responsável pela fragilização do material (TAVARES et al., 2010).

As interações entre um campo magnético gerado por uma onda e material na região de irreversibilidade dos domínios magnéticos geram um ruído denominado de Barkhausen. Esse ruído deve-se aos saltos abruptos causados pelo desprendimento das paredes dos domínios, ao passarem por pontos de ancoragem como contornos de grãos, discordâncias, heterogeneidades ou outras imperfeições. A superação das paredes de domínio sobre esses pontos produz saltos discretos na indução magnética, gerando pulsos magnéticos conhecidos como RMB (DE QUEIROZ, 2008; YAMAZAKI et al., 2019). Sendo assim, a análise do ruído passa a ser importante, pois carrega informação do que possa ter sido modificado, internamente, no material (SILVA et al., 2016).

A transformada wavelet tem sido aplicada para remoção de ruídos em sinais, por apresentar uma técnica de janelamento variável, permitindo o uso de intervalos de tempo longos para análise dos componentes de baixa frequência e de intervalos de tempos curtos para análise das regiões de alta frequência do sinal (FARIAS, 2005). Devido a sua eficiência na remoção de ruído este tipo de transformada passou a ser de interesse na separação do RMB do sinal

principal, a fim de analisar as informações provenientes desse. Logo, tendo em vista que o RMB é um sinal não-estacionário e aleatório, a transformada wavelet será útil para avaliação da presença do constituinte sigma em um aço inoxidável duplex, por ser capaz de fornecer informações mais eficazes e refinadas do RMB, através de diferentes níveis de decomposição (WANG et al., 2013; YAMAZAKI et al., 2019).

Este trabalho busca verificar a capacidade da transformada wavelet discreta (TWD) em detectar a presença do constituinte prejudicial sigma, em um AID SAF 2205, pela análise do RMB, a fim acompanhar a formação de novas microestruturas em aços.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo deste trabalho é avaliar a utilização da TWD na análise do RMB para identificar a formação de microestruturas fragilizantes em um aço.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar entre as wavelets da família Daubechies a que melhor pode ser aplicada para acompanhamento da fase sigma em um AID;
- Determinar os melhores níveis de decomposição da TWD capazes de identificar a formação da fase sigma no aço SAF 2205;
- Estudar os efeitos da frequência e amplitude das ondas emissoras aplicadas sobre a capacidade de detecção da fase sigma;
- Avaliar os resultados obtidos.

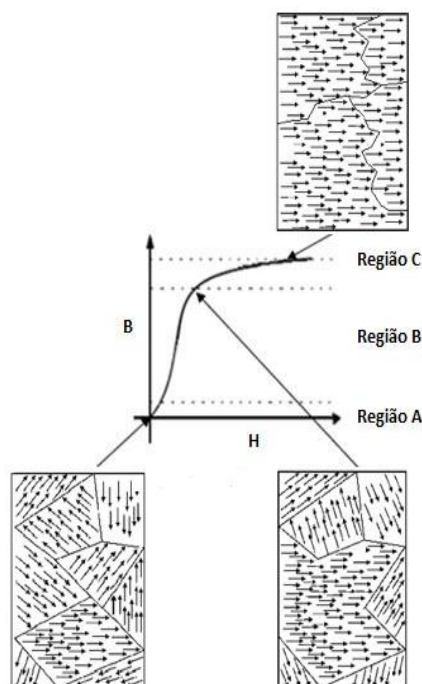
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica, segmentada em cinco seções, as quais tratam dos seguintes tópicos: a seção 2.1 aborda o RMB; a seção 2.2 discorre sobre o AID; a seção 2.3 aponta os trabalhos que analisaram a formação da fase sigma utilizando o RMB; a seção 2.4 disserta acerca da transformada wavelet e, por fim, a seção 2.5 relata os trabalhos relacionados à transformada wavelet na detecção da fase sigma.

### 2.1 RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN

A Figura 1 mostra uma curva de magnetização esquemática de um material ferromagnético. A variável  $B$  representa a densidade de fluxo magnético e o  $H$  refere-se à intensidade de campo magnético aplicado. A curva está dividida em três regiões. A primeira (região A) corresponde a região de reversibilidade, a segunda (região B) equivale a região de irreversibilidade e a terceira (região C) constitui a região de rotação (CULLITY; GRAHAM, 2011).

Figura 1 - Curva de magnetização



Fonte: (Silva, 2019)

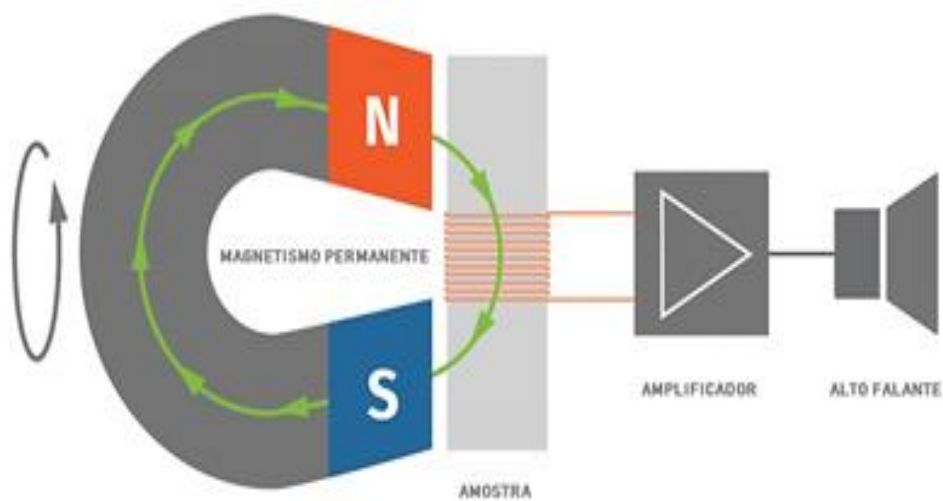
Na região de irreversibilidade, o material está exposto a um campo mais elevado em relação à região de reversibilidade. As paredes dos domínios nesta região encontram obstáculos à sua movimentação, que são contornos de grão, impurezas, discordâncias, precipitados, entre outros. Quando os domínios vencem esses pontos de ancoragem, provocam um ruído característico dessa região que é o ruído Barkhausen. Nesta região, ocorre a formação de um magnetismo residual após a intensidade de campo magnético aplicado ser cessada. Seguindo com o aumento na intensidade do campo magnético aplicado, os domínios magnéticos se alinham na direção de fácil magnetização e depois começam a rotacionar para se alinhar com o campo magnético externo no ponto de saturação (CULLITY; GRAHAM, 2011).

O RMB, gerado na região de irreversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos, é um fenômeno eletromagnético proveniente do movimento irregular e irreversível das paredes do domínio magnético sob excitação de campo magnético externo. As flutuações repentinas induzidas na magnetização estão ligadas à interação entre a dinâmica dos domínios magnéticos e os obstáculos microestruturais, como discordâncias, precipitados, fases, contornos de grão e micro tensões relacionadas. O RMB tem sido amplamente utilizado como fonte para levantamento de parâmetros para desenvolvimento de ensaios não destrutivos para avaliação de tensões mecânicas, caracterização microestrutural e anisotropia magnética de materiais ferromagnéticos (QIU et al., 2021).

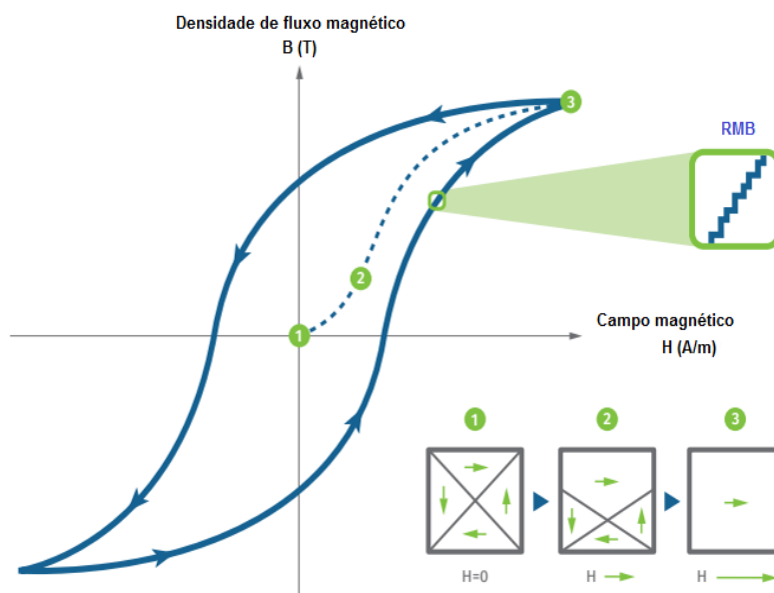
O efeito de Barkhausen é uma homenagem ao seu descobridor Heinrich Barkhausen, que, em 1919, observou que materiais ferromagnéticos submetidos a variações de campos magnéticos, emitiam ruídos sonoros e, estes ruídos apresentavam variações de um material para outro, utilizando as mesmas frequências e/ou amplitudes (CULLITY, 2009; PRAXEDES, 2012). Esse fenômeno pode ser demonstrado pelo experimento apresentado na Figura 2, em que uma bobina é enrolada em uma amostra e conectada a um amplificador e a um alto-falante. A amostra é, então, submetida a um campo magnético contínuo e suave. Nessa experiência observou-se que o aumento suave e contínuo no campo magnético aplicado a um material ferromagnético, provoca saltos na magnetização, que são percebidos como sons distintos em um alto-falante (Figura 2a). Caso a bobina seja conectada a um osciloscópio, no lugar do alto-falante, serão observados picos, os quais são conhecidos como ruído de Barkhausen. O campo magnético induzido na bobina não é constante em função do tempo e mostra mudanças descontínuas. Tal fato pode ser observado na Figura 2b, onde uma parte da curva foi ampliada.

Este comportamento serrilhado deve-se à presença do ruído de Barkhausen (CULLITY; GRAHAM, 2011).

Figura 2 – Experimento de Barkhausen. a) Aparato experimental para detecção do ruído de Barkhausen. b) Curva de magnetização esquemática



a)



b)

Fonte: Adaptado de (Junkersfeld, 2019)

O RMB pode ser analisado por meio de diversos parâmetros calculados a partir do mesmo, como a raiz quadrada do valor quadrático médio e a energia do sinal. Como o sinal do RMB é centrado em amplitude, sua componente média é igual a zero e, dessa forma, o desvio padrão se torna similar ao valor RMS (*Root Mean Square*) do sinal. Devido a isso, na literatura, o principal parâmetro avaliado para o RMB é o seu valor RMS (GHANEI, S. et al., 2014). Esse valor representa a raiz quadrada do valor quadrático médio. No ruído de Barkhausen, esse valor é dado na grandeza de tensão elétrica, em volts. Segundo essa relação, o valor RMS pode ser descrito por:

$$RMB_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_i^N (V_i - V_m)^2}{N}} \quad (1)$$

em que:

$V_i$  = tensão elétrica

$V_m$  = valor médio do sinal

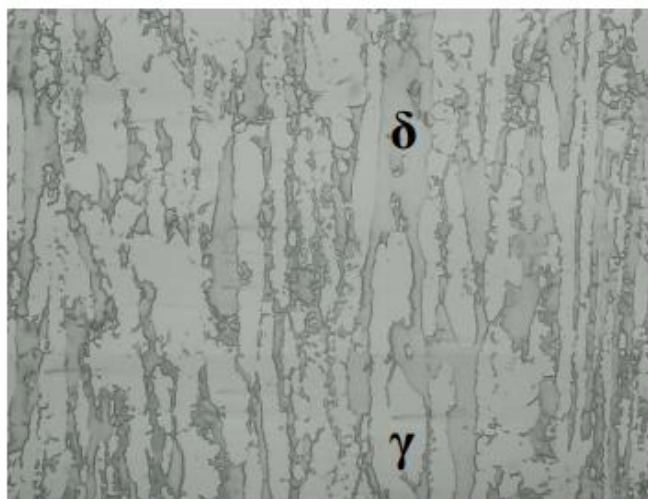
N = número de amostras do sinal

O ruído de Barkhausen tem sido correlacionado com características microestruturais como discordâncias, tamanho e contornos de grão, precipitados, fases secundárias e estados de tensões em materiais (ROCÍO et al., 2015, LINDGREN; LEPISTÖ, 2004, GHANEI; KASHEFI; MAZINANI, 2014, KTENA et al., 2014). Porém, o método baseado nesse ruído ainda não foi padronizado devido à variedade de dispositivos utilizados, frequências e tensões de magnetização, bem como características da bobina receptora como forma e frequência de resposta, que resultam em diferenças no sinal do ruído recebido (BLAŽEK et al., 2016). Desse modo, a transformada wavelet tem um grande potencial para obter um maior número de informações a partir da análise do RMB, com características muito mais eficazes e refinadas (WANG et al., 2013).

## 2.2 AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX

Os aços inoxidáveis duplex são ligas bifásicas que apresentam propriedades de alta resistência à corrosão e resistência mecânica, devido à sua microestrutura composta de fases ferrita ( $\alpha$ ), a qual eleva o limite de resistência mecânica e resistência à corrosão, e austenita ( $\gamma$ ), que favorece a tenacidade do material. Ambas estão presentes em frações de volume aproximadamente iguais. Essas características fazem com que o AID seja muito utilizado na indústria petroquímica, papel e celulose, e setores de óleo e gás (BARRETO, 2016). A Figura 3 mostra a microestrutura do material, em que é possível visualizar as regiões escuras, que correspondem à ferrita, e as claras, que são a austenita.

Figura 3 - Microestrutura na condição inicial do aço duplex



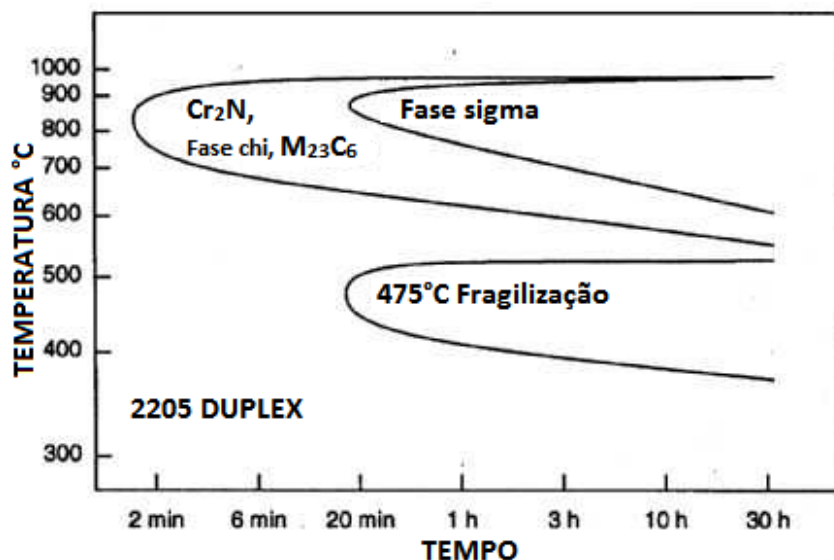
Fonte: Adaptado de (Silva et al., 2020)

O AID é susceptível às transformações microestruturais quando submetido a tratamentos térmicos, processo de soldagem, trabalho a quente e até mesmo quando colocado em serviço a elevadas temperaturas. A Figura 4 mostra um diagrama temperatura-tempo-transformação (Curva TTT) que é utilizado para identificar os constituintes formados através de tratamentos isotérmicos em várias temperaturas. Nela podem-se notar duas regiões, a primeira corresponde ao intervalo de 300 °C a 600 °C, onde há a formação de um constituinte fragilizante que é denominada alfa linha e a segunda no intervalo de 600 °C a 1000 °C, onde a



microestrutura prejudicial às propriedades mecânicas e de resistência à corrosão é denominada de sigma (TAVARES et al., 2000; GUNN, 2003 e SMUK, 2004 apud PARDAL, 2009).

Figura 4 - Diagrama de formação de fase sigma para aço inoxidável duplex SAF 2205

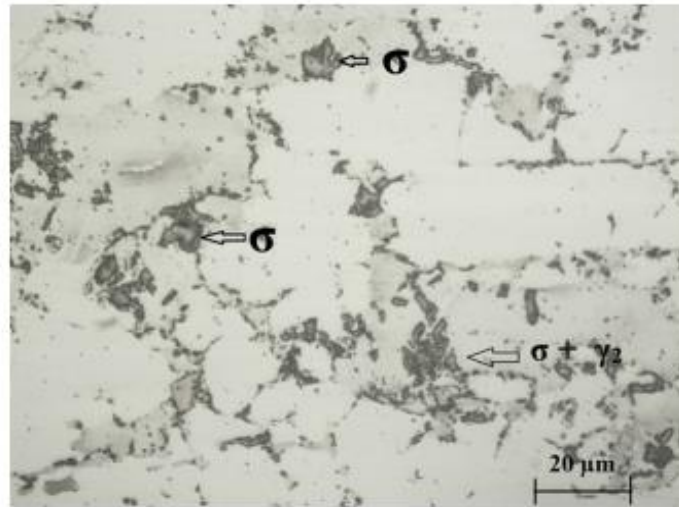


Fonte: Adaptado de (SEDRIKS, 1996)

A fase sigma é paramagnética e é o constituinte de interesse no presente estudo. Uma quantidade de 4 % dessa fase já é suficiente para reduzir a capacidade de absorver energia por impacto do aço inoxidável duplex e, assim, ensaios não destrutivos vêm sendo desenvolvidos para a detecção dessa microestrutura fragilizante (SILVA 2016, TAVARES 2018).

A Figura 5 mostra a presença da fase sigma em um AID SAF 2205, formada pela decomposição do constituinte ferrita que é ferromagnética e a formação de sigma e uma austenita secundária. Essa transformação reduz o ferromagnetismo do material e muda a permeabilidade magnética final (SILVA 2016).

**Figura 5 - Microscopia óptica da fase sigma com ataque KOH 10%**

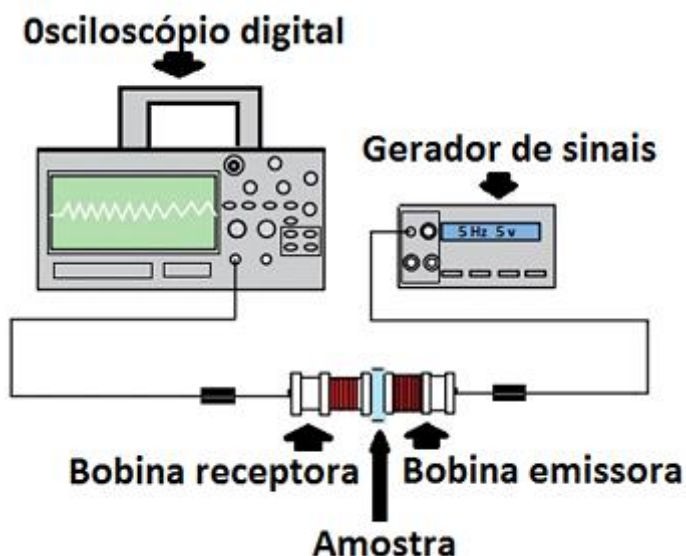


Fonte: (Silva et al., 2016)

### **2.3 ANÁLISE DA FORMAÇÃO DA FASE SIGMA ATRAVÉS DO RMB**

Lima (2019) realizou um estudo para detecção da presença da fase sigma em um aço SAF 2205, através da análise do RMB. Ondas senoidais de frequências de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz e amplitudes de 1 V, 3 V, 5 V, 7 V e 9 V foram aplicadas em uma bobina emissora posicionada em uma das faces das amostras do aço estudado. O sinal obtido da interação das ondas com o material foi capturado numa bobina receptora posicionada na face oposta da amostra analisada. Foram obtidas amostras com diferentes quantidades de fase sigma, envelhecendo amostras de um aço SAF 2205 na temperatura de 850 °C por 15 minutos, além de uma amostra sem tratamento. A bancada utilizada para a realização do experimento é composta por duas bobinas: uma emissora, conectada a um gerador de sinais, e outra receptora, ligada a um osciloscópio digital, conforme consta na Figura 6. Ademais, foi aplicado um filtro passa-altas de 3 kHz para reduzir a influência dos harmônicos na região dos ruídos gerados.

Figura 6 - Desenho esquemático dos equipamentos

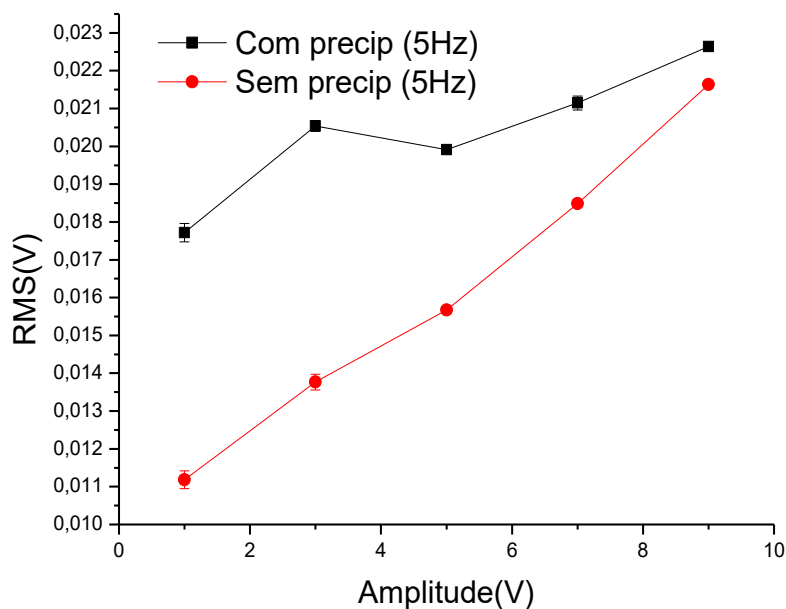


Fonte: (Carvalho Filho, 2018)

No trabalho de Lima (2019), o ruído de Barkhausen foi medido por meio da raiz do valor quadrático médio. Os resultados mostraram que se faz necessário a frequência de até 25 Hz e amplitudes a partir de 1 V para se trabalhar com o RMB, em que o sinal com as ondas com frequência de até 5 Hz e amplitudes de 3 V apresentaram os melhores resultados. As Figuras 7 e 8 referem-se aos resultados obtidos para aplicação das ondas com frequências de 5 Hz e 25 Hz. Na Figura 7 é apresentada a variação das medidas de RMS para a frequência de 5 Hz, em função da amplitude da onda emissora, para as condições com e sem a precipitação da fase sigma. Da análise da Figura 7 observou-se um aumento nos valores de RMS para as amostras com e sem a presença da fase deletéria, com tendência de interseção das curvas para valores acima de 9 V. Acrescente-se que a diferença entre as duas condições apresentadas representa a presença de 5% de fase sigma. Essa diferença de sinal entre as condições estudadas aponta que as ondas emissoras com frequência de 5 Hz e amplitudes abaixo de 9 V são capazes de acompanhar a formação da porcentagem do precipitado analisado.

Segundo Lima (2019) a fase sigma funciona como ponto de ancoragem para o movimento das paredes dos domínios magnéticos e a geração do ruído de Barkhausen. Isso explica os maiores valores da condição com precipitados. Entretanto, como a fase sigma é paramagnética, o aumento da frequência da onda emissora detecta o efeito paramagnético desse precipitado, proporcionado, pois, uma taxa de redução dos valores de RMS, o que acarreta na interseção das curvas, Figura 7.

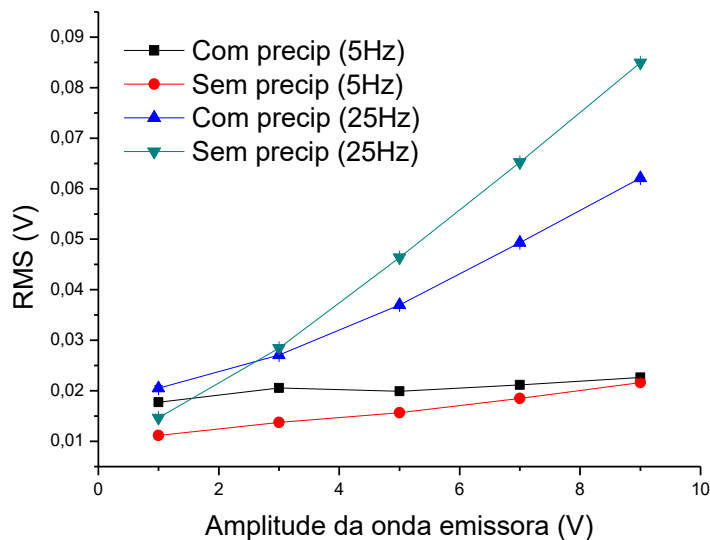
**Figura 7 - Medidas de RMS de amostras com e sem a precipitação da fase sigma, para ondas emissora de 5 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V**



Fonte: (LIMA, 2019)

A Figura 8 mostra os resultados obtidos com as ondas emissoras de frequência de 5 Hz e 25 Hz. Notou-se que com a frequência de 25 Hz há a inversão das curvas de com e sem precipitados, para a amplitude de 3 V. Na frequência de 5 Hz os valores de RMS eram maiores para a condição com precipitado e tinha uma tendência de inversão de comportamento para valores superiores de 9 V. Porém, para a frequência de 25 Hz, essa inversão surgiu com a aplicação da amplitude de 3 V. Após isso, a condição com precipitado cresceu em uma taxa menor. Esse comportamento deve-se ao efeito paramagnético da fase sigma ser melhor captada com o aumento da frequência e amplitude.

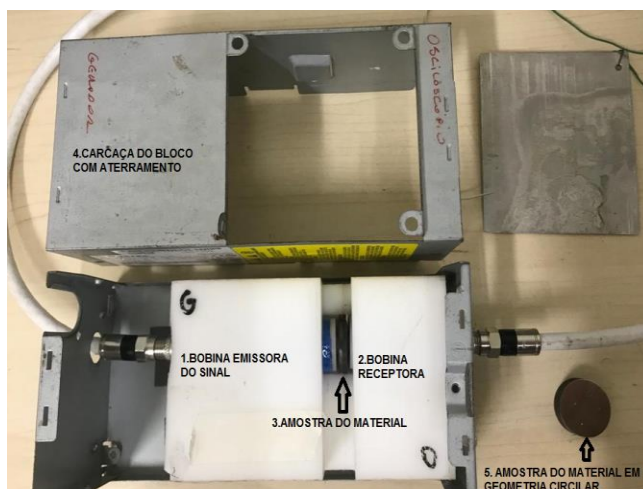
**Figura 8 - Medidas de RMS de amostras com e sem a precipitação da fase sigma, para ondas emissoras de 5 Hz e 25 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V**



Fonte: (LIMA, 2019)

Viegas (2019) formulou um estudo sobre o uso de ondas emissoras, com formato senoidal, para identificar a presença da fase sigma, utilizando bobinas emissora e receptora, posicionadas em superfícies opostas, a fim de varrer um volume maior do material. A visualização da disposição dessa configuração está ilustrada na Figura 9.

**Figura 9 – Bloco de emissão e recepção do sinal (detalhes internos). Bobina emissora do sinal (1); bobina receptora do sinal (2); amostra do material (3); carcaça do bloco com aterramento (4); amostra do material em geometria circular (5)**

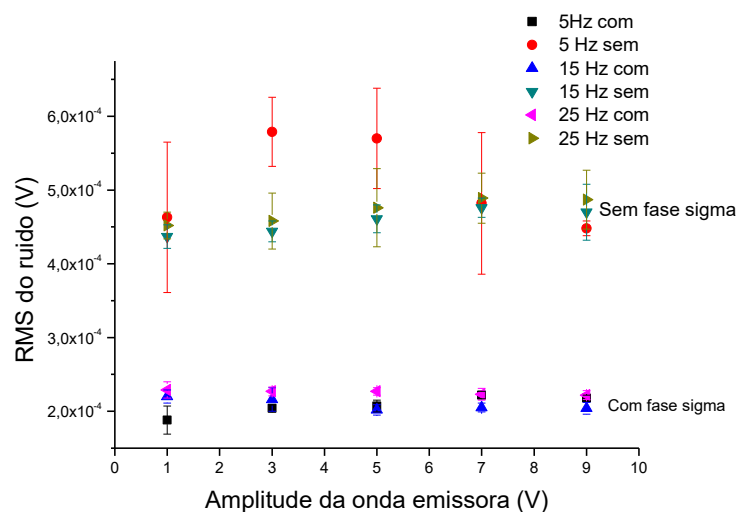


Fonte: (VIEGAS, 2019)

No estudo de Viegas (2019), foram utilizadas amostras de um AID SAF 2205, sendo um tipo que não passou por tratamento térmico e um segundo tipo de amostra que foi tratada na temperatura de 850 °C, com tempo de tratamento de 15 minutos. Foram usadas ondas com frequência de 5 Hz, 15 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz, com amplitude variando de 1 V a 9 V, empregadas em amostras de 4 mm e 8 mm de espessura. Os sinais foram captados e foi obtida a sua transformada rápida de Fourier através de um programa específico que permite selecionar e aplicar um filtro passa-altas de 3 kHz. Em seguida, foram obtidos os valores médios RMS do sinal, utilizando-se um intervalo de confiança de 95%, para cada frequência e amplitude aplicada.

Com relação ao efeito da espessura de 8 mm, a Figura 10 mostra a variação do RMS do ruído gerado na bobina receptora, em razão das amplitudes que variaram de 1 V a 9 V e frequências de 5 Hz, 15 Hz e 25 Hz das ondas aplicadas na bobina emissora. Os valores de RMS para as frequências e amplitudes citadas, nas amostras com a presença da fase sigma, apresentaram poucas variações. Entretanto, para a situação sem precipitado, tem-se valores semelhantes para as frequências de 15 Hz e 25 Hz, sendo que a frequência de 5 Hz apresentou maior dispersão nos resultados para amplitudes até 7 V. Ademais, os valores de RMS para as frequências de 5 Hz, 15 Hz e 25 Hz, para ambas as condições, mostram ser independentes da amplitude e apresentam duas regiões distintas. Ressalte-se que os resultados obtidos com a presença da fase deletéria apresentam valores de RMS inferiores aos do material sem a sua presença.

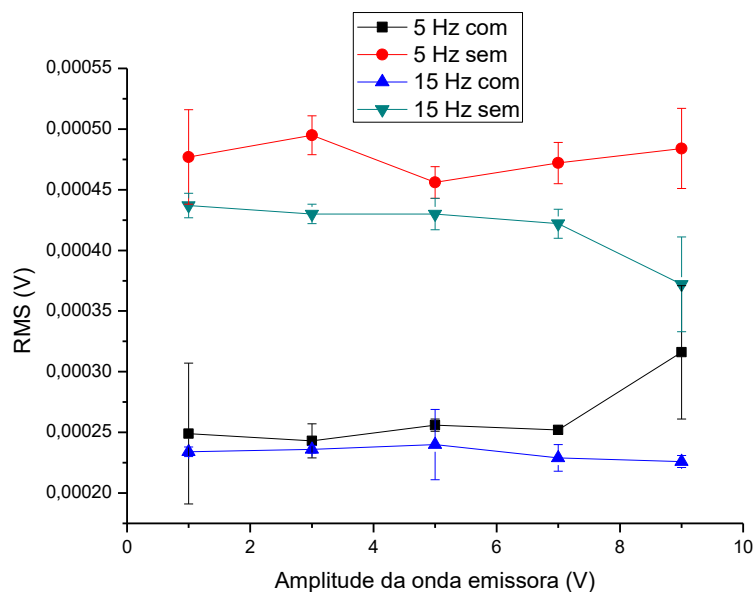
**Figura 10 - Variação dos valores RMS do ruído na bobina receptora em função da frequência e amplitude da onda aplicada na bobina emissora**



**Fonte: (VIEGAS, 2019)**

No que tange à espessura de 4 mm, a Figura 11 ilustra a variação de RMS em função da amplitude da onda emissora para frequências aplicadas de 5 Hz e 15 Hz. Observa-se que a de 5 Hz tem um comportamento quase independente da amplitude aplicada para a condição sem precipitado. Esse comportamento também é notado para a condição com a fase sigma, apesar do aumento ocorrido para a aplicação da amplitude de 9 V. As medidas realizadas para 15 Hz apresentam uma tendência de redução nos valores de RMS conforme aumenta-se a amplitude para amostras sem a fase sigma, enquanto na condição com precipitado, o comportamento continua independente da amplitude. Além disso, a redução nos resultados nas amostras sem precipitados pode estar atrelada ao aumento da frequência induzir o fluxo magnético a perceber a presença da fase paramagnética austenita do aço.

**Figura 11 - Medidas RMS do ruído na bobina receptora em função das amplitudes das ondas emissoras, para as frequências de 5 Hz e 15 Hz, para amostras com e sem a formação da fase sigma. Amostras com 4 mm de espessura**



Fonte: (VIEGAS, 2019)

## 2.4 TRANSFORMADA WAVELET

A transformada wavelet é uma ferramenta matemática desenvolvida para análise de sinais estacionários e não-estacionários. Nos últimos anos, ela vem sendo muito aplicada nas áreas de meteorologia, análise e compressão de dados, processamento de sinais e imagem, e principalmente, na área de diagnóstico de falhas de máquinas (SANTIAGO, 2004).

Uma das vantagens da transformada wavelet é cobrir a deficiência apresentada pela STFT (*Short Time Fourier Transform*), uma vez que apresenta uma técnica de janelamento variável ao longo do sinal, permitindo o uso de intervalos de tempo longos para análise das componentes de baixa frequência e intervalos de tempos curtos para a análise das regiões de alta frequência do sinal (FARIAS, 2005). Dessa forma, a transformada wavelet é capaz de entregar, de maneira mais precisa, resultados para sinais não-estacionários e com características de alta frequência, como o RMB, uma vez que a decomposição permite a análise multirresolução. As Figuras 12 e 13 mostram o janelamento fixo da STFT e o janelamento variável da transformada wavelet, respectivamente.



Figura 12 - Análise bidimensional de um sinal utilizando a STFT



Fonte: (MATHWORKS, 2020)

Figura 13 - Análise de um sinal utilizando a transformada wavelet

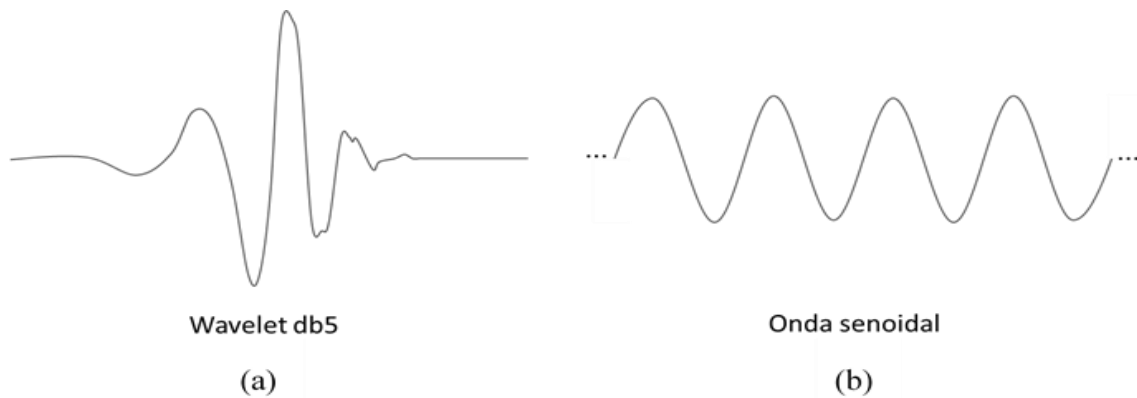


Fonte: (MATHWORKS, 2020)

#### 2.4.1. WAVELETS

Uma wavelet é uma forma de onda de curta duração que possui valor médio igual a zero, Figura 14 (a). Comparando uma wavelet com uma função senoidal, Figura 14 (b), que é a base da transformada de Fourier, verifica-se que a senoide não possui uma duração limitada, estendendo-se de forma suave e determinada de menos infinito a mais infinito, diferente das wavelets que são irregulares e assimétricas (FARIAS, 2005).

**Figura 14 – Representação de uma wavelet finita (a) e uma senoide infinita (b) de curta duração**

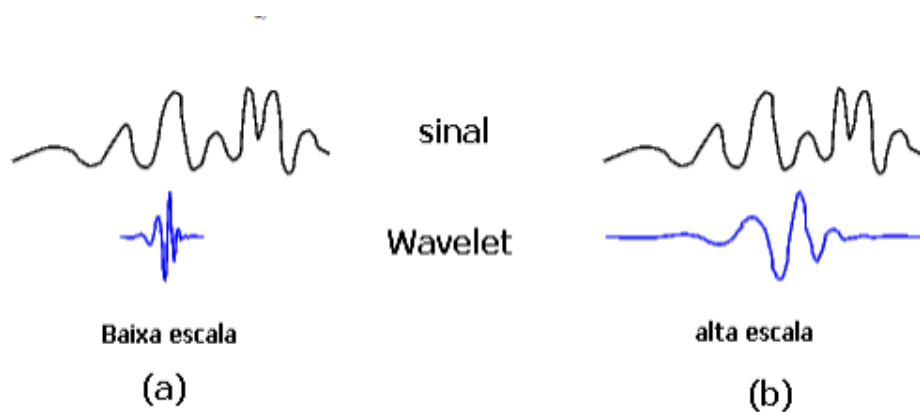


**Fonte: (ARAÚJO, 2011)**

Uma wavelet pode ser deslocada e dilatada, como é mostrado nas Figuras 15 (a) e (b). A função wavelet mãe ( $\psi$ ) dilata-se ou comprime-se com o fator de escalonamento  $a$ , ao mesmo tempo que se desloca ou translada ao longo do sinal através do fator de translação  $b$  (FARIAS, 2005). Deste modo, a forma geral de uma família wavelet é dada por:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

**Figura 15 - Representação da wavelet em baixa (a) e alta escala (b)**



**Fonte: (FARIAS, 2005)**

A transformada wavelet contínua (TWC) associa o sinal em análise  $s(t)$  com a função elementar, chamada wavelet mãe  $\psi(t)$ , de acordo com o produto interno (ARAÚJO, 2011):

$$TWC(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int s(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad a \neq 0 \quad (3)$$

Para que possa dar origem a uma família wavelet exige-se que: a wavelet mãe seja absolutamente integrável, possuindo energia finita (MATHEWORKS, 2005),

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t)^2 dt < \infty \quad (4)$$

Outra condição a ser satisfeita é a de admissibilidade:

$$C = \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)| dt < \infty \quad (5)$$

Que implica, na prática, que a wavelet não apresenta componente DC. Portanto:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (6)$$

A TWC é uma representação redundante, isto é, o deslocamento da wavelet no domínio do tempo é contínuo e desse modo haverá uma sobreposição parcial destas funções. Dependendo da resolução requerida, pode-se escolher um valor mínimo e máximo para definir a dilatação, sabendo que o valor máximo resultará numa melhor resolução, mas também num aumento de esforço computacional necessário para o cálculo dos coeficientes das wavelets. Essa redundância na representação do sinal através da TWC caracteriza uma situação, em que o sinal é representado por mais informações que o necessário. Uma solução para os casos em que seja necessário um número mínimo de coeficientes é utilizar uma versão amostrada da TWC, em que são utilizados apenas determinados valores para os parâmetros  $a$  e  $b$ , diminuindo ou eliminando a redundância. Nessa lógica, a TWD utiliza parâmetros de escalonamento e translação discretos (PENHA,1999), sendo definida por:

$$TWD_{(m,p)} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi_{m,p} dt < \infty \quad (7)$$

A partir da função wavelet mãe, conforme os parâmetros de escalonamento e translação discretos ( $m$  e  $p$ , respectivamente),  $\psi_{m,p}$  forma uma base de funções wavelets, e  $\psi_{m,p}(t)$  é dado por:

$$\psi_{m,p} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t}{a_0^m} - p \cdot b_0\right) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t - p \cdot a_0^m \cdot b_0}{a_0^m}\right) \quad (8)$$

em que  $m$  e  $p$  pertencem ao conjunto dos inteiros e  $a_0$  e  $b_0$  são constantes. Sendo  $m$  e  $p$  os parâmetros de dilatação e translação, respectivamente, a constante  $a_0$  refere-se à variação da dilatação e  $b_0$  ao passo da translação.

A TWD é amostrada escolhendo-se valores de escalas e posições (parâmetros  $a$  e  $b$ ) baseados em potência de dois. Essa variação é chamada diádica. Logo, a wavelet diádica é amostrada a uma taxa de  $2^m$  e as constantes  $a_0$  e  $b_0$  assumem os valores  $a_0 = 2$  e  $b_0 = 1$ .

A reconstrução do sinal é dada por meio da Equação (9) (SHENG, 2000):

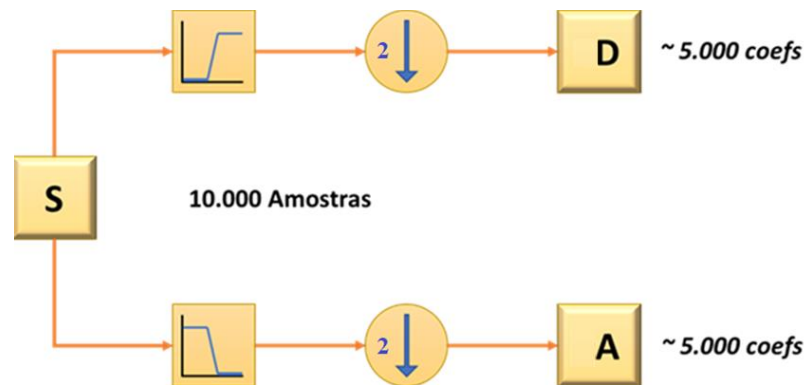
$$f(t) = \frac{2}{A+B} \sum_m \sum_p \psi_{m,p}(t) \quad (9)$$

Mallat (1989) desenvolveu um algoritmo para calcular os coeficientes da TWD, que reduz significante o esforço computacional. O processo é similar ao que ocorre na utilização da transformada rápida de Fourier, em alternativa à transformada discreta de Fourier. Esse algoritmo resulta na transformada wavelet rápida. O maior benefício é que os coeficientes da transformada são calculados sem a necessidade do cálculo explícito da função wavelet, sendo decomposta em uma análise multirresolução, que permite analisar sinais em múltiplas bandas de frequência.

Para filtrar e decimar o sinal na TWD empregam-se os filtros digitais. Conforme Penna (2002), decimar um sinal significa eliminar dados ou pontos intercalados. Na TWD esse procedimento é realizado por um fator de 2, isso significa que a cada dois pontos um é eliminado. Logo, restará apenas metade do sinal original e, por conseguinte, o período amostrado será elevado. A Figura 16 (BACK, et al., 2015) ilustra que o processo de decomposição sucessiva é aplicado somente às aproximações do sinal, gerando novas aproximações e detalhes. O sinal original, bloco S, composto por 10.000 amostras, depois de

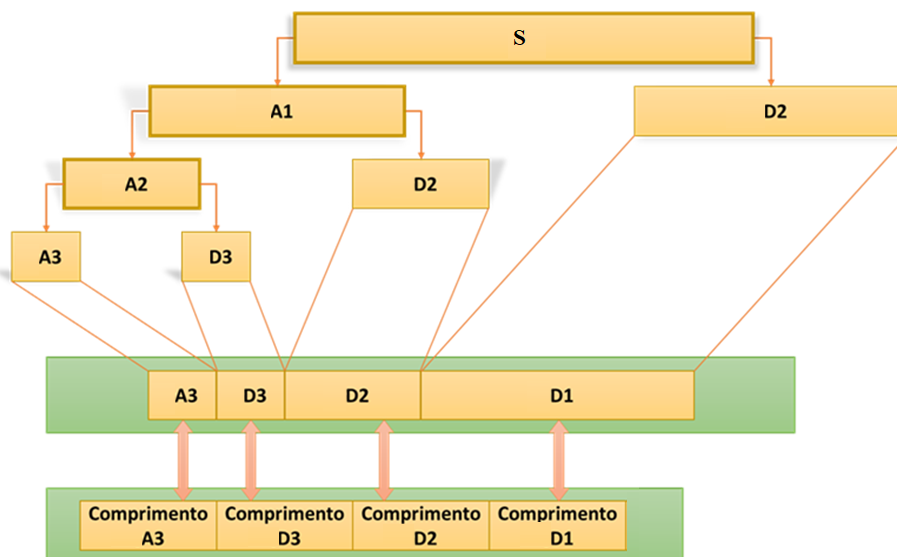
passar pelos filtros passa-baixa e passa-alta, sofrem a decimação de 2 para gerar os coeficientes wavelets de detalhes, bloco D, e de aproximação, bloco A. Após sucessivas decomposições será configurado uma estrutura chamada de banco de filtros, que é conhecida como decomposição por sub-banda, originando uma árvore de decomposição wavelet, conforme é ilustrado na Figura 17, em que um sinal de comprimento X é decomposto em três níveis de resolução, sendo os blocos A os coeficientes de aproximação e D os coeficientes de detalhes.

Figura 16 – Diagrama de bloco básico para decomposição de um sinal



Fonte: (MATHWORKS, 2020)

Figura 17 - Estrutura típica de decomposição em três níveis



Fonte: (MATHWORKS, 2020)

Os coeficientes wavelet designam o sinal no domínio transformado, assim como as versões aproximadas e detalhadas do sinal original, em diversos níveis de resolução no domínio tempo. Determinar esses coeficientes é o processo que envolve o cálculo da TWD de um sinal. Matematicamente, para um dado sinal  $s(n)$ , os coeficientes do primeiro nível de decomposição são definidos a partir da equação 10 (ARAÚJO, 2011):

$$A_1 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(n) \cdot h_d(-n + 2k) \text{ e } D_1 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(n) \cdot g_d(-n + 2k) \quad (10)$$

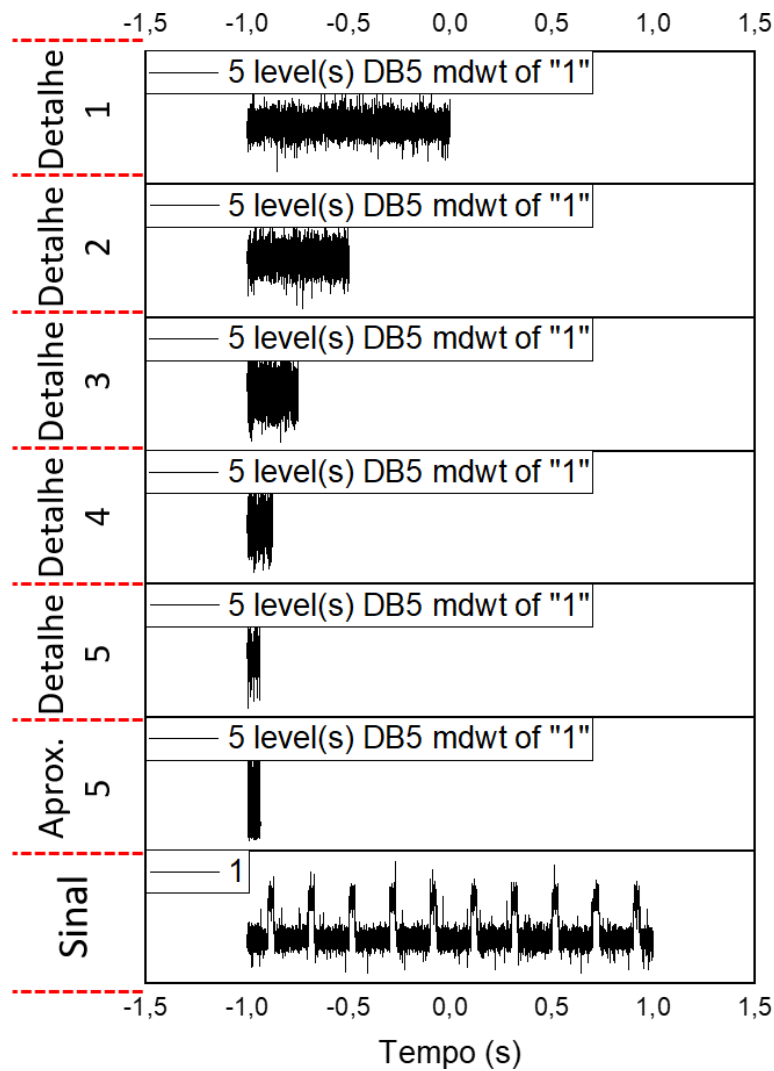
em que  $h_d(n)$  e  $g_d(n)$  correspondem aos filtros digitais passa-baixa e passa-alta, respectivamente.

Os coeficientes wavelet, relacionados à aproximação e ao detalhe do segundo nível da decomposição, são obtidos por meio dos coeficientes wavelet de aproximação de nível 1,  $A_1(n)$ . Já os novos coeficientes, representados por  $A_2(n)$  e  $D_2(n)$ , serão determinados pela decimação da convolução entre os coeficientes wavelet da aproximação de nível 1 e as demais respostas a impulso dos mesmos filtros passa-baixa e passa-alta, utilizados no início do processo. Matematicamente serão expressos através da seguinte equação:

$$A_2 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_1(n) \cdot h_d(-n + 2k) \text{ e } D_2(n) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_1(n) \cdot g_d(-n + 2k) \quad (11)$$

Para dar prosseguimento à análise multirresolucional, os coeficientes wavelet da aproximação de nível 2 determinarão os coeficientes wavelet correspondentes à aproximação e ao detalhe de nível 3, que passam a ser, respectivamente,  $A_3(n)$  e  $D_3(n)$ . Para estabelecer os coeficientes da aproximação e do detalhe do próximo nível, serão sempre utilizados os coeficientes wavelet da aproximação anterior. A Figura 18 mostra a decomposição em cinco níveis, empregando a família Db5, de um sinal com ruído magnético de Barkhausen, criado por uma amostra de aço inoxidável duplex SAF 2205, tratada à temperatura de 475 °C durante 100 horas.

**Figura 18 - Exemplo de um sinal com ruído de Barkhausen decomposto em níveis de detalhe de D1 a D5.**



**Fonte: (BARROS NETO, 2021)**

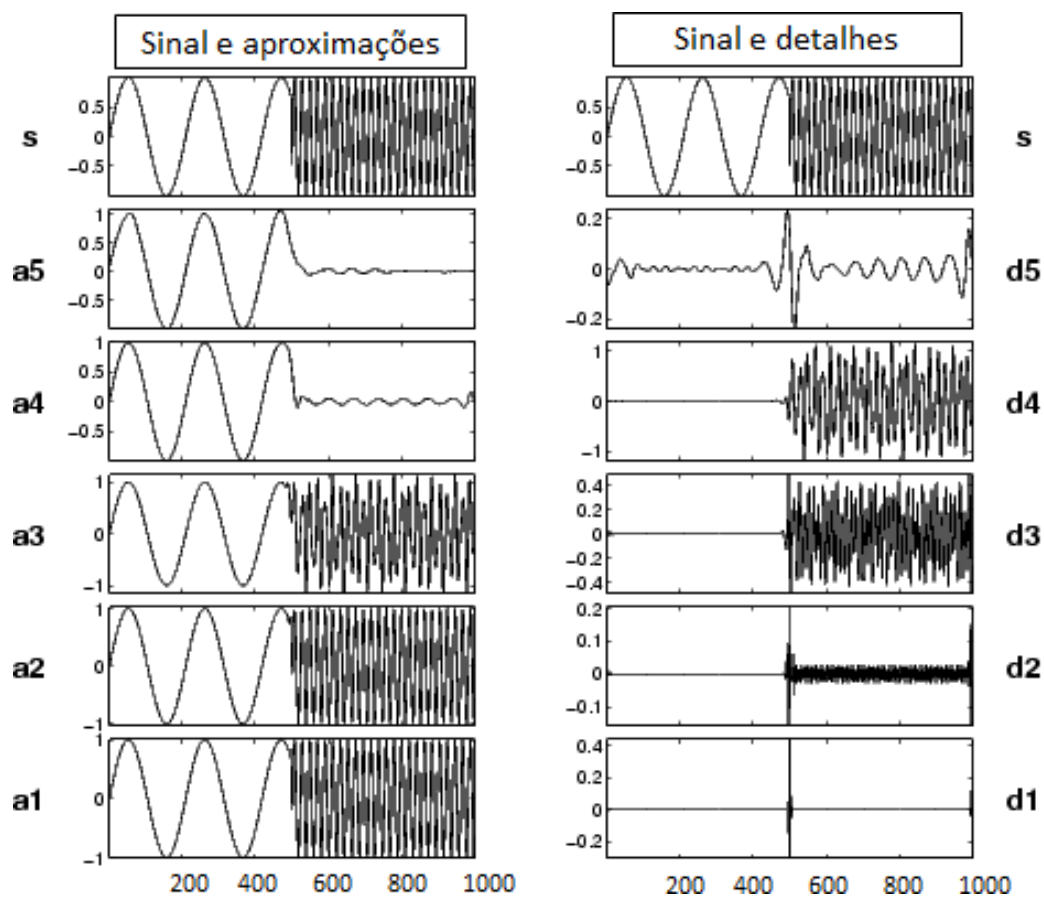
Para reconstruir o sinal a partir dos coeficientes wavelets é preciso caminhar em sentido contrário no diagrama da decomposição multiresolução. Nesse processo, os filtros de decomposição passa-alta  $g_d(n)$  e passa-baixa  $h_d(n)$  são substituídos por outros de reconstrução, definidos, por  $g_r(n)$  e  $h_r(n)$ . Ademais, as operações de sub-amostragem de dois são trocadas por outras de sobre-amostragem de dois (PENNA, C., 2002). A Figura 19 ilustra o comportamento da TWD no tratamento de um sinal conhecido, no caso dois senos defreqüências distintas.

O sinal é formado por um seno de baixa freqüência e um seno de média freqüência, em ambos os lados da faixa de 500 Hz. Estes dois senos não estão conectados de forma contínua. Sob

essa ótica, D1 e D2 podem ser utilizados para detectar essa descontinuidade, já que é localizado com precisão apenas um pequeno domínio em torno dos 500 Hz. Isso ocorre porque a ruptura contém a parte de alta frequência, e as demais frequências no resto do sinal não são tão altas. Deve-se notar que se o interesse for apenas identificar a descontinuidade, o D1 é mais útil que o D5. O primeiro seno pode ser observado de maneira isolada nos detalhes de níveis três e quatro, enquanto o seno de baixa frequência aparece sozinho em A5.

Se o mesmo sinal tivesse sido analisado pela transformada de Fourier, não seria possível detectar o instante correspondente à mudança de frequência do sinal, enquanto este fenômeno é claramente observável com a transformada wavelet discreta. Convém ressaltar ainda que, quando comparada a transformada de Fourier, a transformada wavelet apresenta um tempo de processamento mais rápido, segundo (SHENG, 2020).

**Figura 19 - Aplicação da TWD em um sinal com dois senos de frequências distintas**



Fonte: (MATHWORKS, 2020)



## 2.5 TRABALHOS RELACIONADOS À TRANSFORMADA WAVELET

Wang et al. (2013) analisaram a aplicação da TWD da família Daubechies 5 (Db5), com níveis de decomposição variando de um a seis, para detectar o efeito de tensões mecânicas compressivas em um aço estrutural do tipo A3, através da análise do RMB. Logo após a aplicação da wavelet, o valor de RMS foi determinado em cada sinal. Constatou-se que a aplicação da wavelet Db5 em seis níveis de decomposição foi capaz de detectar o efeito dessas tensões no material, oscilando os resultados de acordo com cada nível de detalhe.

Queiroz (2008) aplicou a TWD com as famílias Daubechies nas ordens de 4, 12 e 20, escolhendo, ao final, a Db4 para estudar um modelo de interface conhecido por fornecer boas características das propriedades de materiais ferromagnéticos macios através do RMB. Utilizando a análise individual e as médias posicionais dos coeficientes wavelets, contrapondo a análises do espectro de potência de Fourier empregados em trabalhos anteriores aos seus, concluiu uma análise positiva com relação ao RMB em amostras da liga amorfa  $Fe_{21}Co_{64}B_{15}$ .

Madan et al. (2019) utilizaram a wavelet Daubechies para filtrar o ruído de um sinal amostrado discretamente, utilizando a implementação de um filtro passa-baixa. A transformada wavelet foi aplicada no vetor de entrada com o objetivo de obter um sinal com ruído muito baixo. Nesse contexto, para encontrar o sinal original, houve uma filtragem para remoção dos ruídos, já que esses não atendiam ao objetivo do procedimento e dificultavam a extração da informação do sinal. O estudo mostrou que wavelets podem ser usadas para separar diferentes componentes de frequência do sinal de forma eficiente.

Silva et al (2020) estudaram a aplicação do uso da TWD para analisar o RMB, o qual se caracteriza por ser de alta frequência e baixa amplitude, resultante da interação entre ondas emisoras e a microestrutura de um AID. Nesse viés, ondas triangulares com frequência de 5 Hz e amplitudes que variaram de 1 V a 9 V foram aplicadas às amostras por meio de uma bobina emissora, posicionada em uma das superfícies do material. Na outra superfície foi colocada uma bobina receptora, responsável pela captação da onda resultante da interação entre a onda triangular e a amostra. Observou-se que a presença de precipitados nanométricos diminui os valores de RMS do sinal. Constatou-se que a aplicação da TWD com duas famílias e um nível de decomposição mostraram comportamentos semelhantes. Além disso, o uso da família Db6 levou a uma maior redução dos valores de RMS. Todavia, ambas as famílias foram capazes de identificar a presença da nova microestrutura.

O presente trabalho usa o método de decomposição wavelet para analisar o RMB, direcionando sua aplicação para a formação de microestruturas grosseiras indesejáveis, que é o constituinte sigma, formado em um AID.

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho traz um estudo para acompanhamento de microestruturas em AID. Para tanto, empregou-se a análise do ruído de Barkhausen, através da TWD, na obtenção de parâmetros para detecção da fase sigma. Nesta seção será apresentado o material a ser utilizado, tal como a bancada de teste usada para aquisição dos dados. As características dos sinais que serão utilizados são definidas em seguida e um fluxograma das etapas é apresentado.

#### 3.1 MATERIAL DE ESTUDO

Foram utilizadas amostras circulares de um AID SAF 2205, com 24 mm de diâmetro e 8 mm de espessura. A composição química do material em estudo está disposta na Tabela 1. Duas amostras foram analisadas: uma sem tratamento térmico e outra tratada a temperatura de 850 °C, por 15 minutos. A exposição da amostra durante 15 minutos a esta temperatura é suficiente para a formação de aproximadamente 4% de fase sigma (NORMANDO et al., 2010). A temperatura de 850 °C foi escolhida por ter a maior cinética de formação dessa fase deletéria, logo, pode precipitar a fase sigma com menores tempos de tratamento. O forno utilizado para realização do tratamento térmico das amostras foi o Jung, modelo 912, de resistência elétrica, cujas dimensões são 160 x 160 x 350 mm e do tipo mufla (Figura 18). O resfriamento das amostras foi feito ao ar livre.

As amostras foram submetidas à microscopia óptica, sendo preparadas no laboratório de Metalografia do IFPB, onde foram submetidas a etapa de lixamento, polimento e submetidas a ataque químico com solução eletrolítica de 10% de KOH (Hidróxido de potássio), utilizando uma tensão de 3V durante 15 segundos, oxidando a fase sigma e facilitando a sua visualização. Em seguida, foram realizadas análises em microscopia óptica, utilizando um microscópio NIKON FX 35XD com câmera acoplada e aumento máximo de 400x.

Tabela 1 – Composição química do AID SAF 2205

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Co
0,018	1,480	0,019	0,001	0,450	22,220	5,590	0,130
Cu	Mo	N	Nb	Al	Sn	Ce	Fe
0,280	3,080	0,180	0,021	0,003	0,012	0,020	66,496

Fonte: (FRANÇA NETO, 2011)

Figura 20 – Forno usado para o aquecimento das amostras



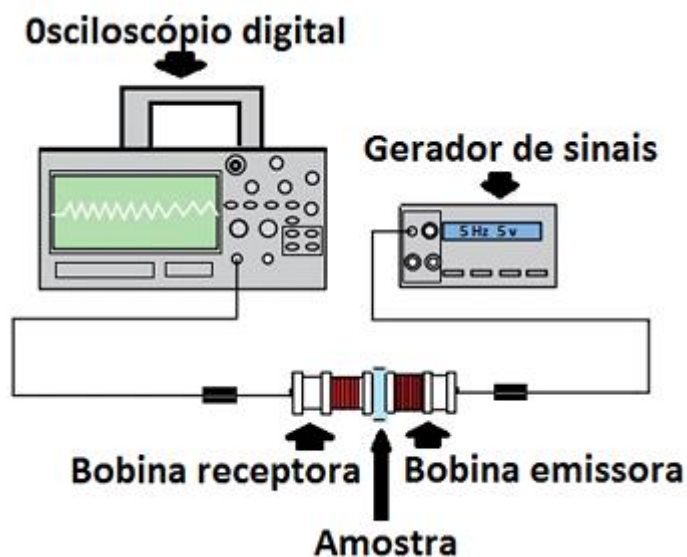
Fonte: (CARVALHO FILHO, 2018)

### 3.2 BANCADA EXPERIMENTAL PARA MEDIDA DO RÚIDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN

A bancada experimental utilizada foi a mesma bancada de Lima (2019), sendo constituída por duas bobinas: uma denominada emissora, responsável pela magnetização do material, e a outra chamada receptora, útil no acompanhamento do comportamento magnético do material da amostra. Ambas idênticas com comprimento medindo 19,5 mm. Essas bobinas foram construídas com 6000 espiras de fios de cobre esmaltado nº 38 enroladas sobre um núcleo do aço AISI 4140. Para a magnetização da bobina emissora foi utilizado um gerador de sinais

modelo VC 2002, marca Victor. Já a bobina receptora foi posicionada no lado oposto da peça com a finalidade de detectar o campo induzido, gerado pela interação do material com a onda emissora, e transmitir o sinal a um osciloscópio digital Agilent Technologies modelo DSO-X 2012A, o qual fez a captura do sinal da tensão induzida na bobina receptora. O esquema da bancada experimental pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 21 - Desenho esquemático dos equipamentos utilizados



Fonte: (CARVALHO FILHO, 2018)

### 3.3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

#### 3.3.1 CARACTERÍSTICAS DOS SINAIS A SEREM UTILIZADOS

A Tabela 2 apresenta os dados coletados por Lima (2019) para determinação da melhor onda emissora para detecção da fase sigma. Nela tem-se a temperatura de tratamento, as condições das amostras a serem analisadas e as características das ondas emisoras utilizadas na pesquisa. Dez sinais foram capturados de cada condição, com tempo de 2 segundos e 20.000 pontos.

Tabela 2 – Características das ondas emisoras a serem utilizadas

Temperatura de tratamento	850 °C
Amostras	Sem tratamento e tratadas com 15 min
Frequências	5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz
Amplitudes	1 V, 3 V, 5 V, 7 V e 9 V
Tempo de aquisição	2 segundos e 20.000 pontos
Tipo de onda	Senoidal

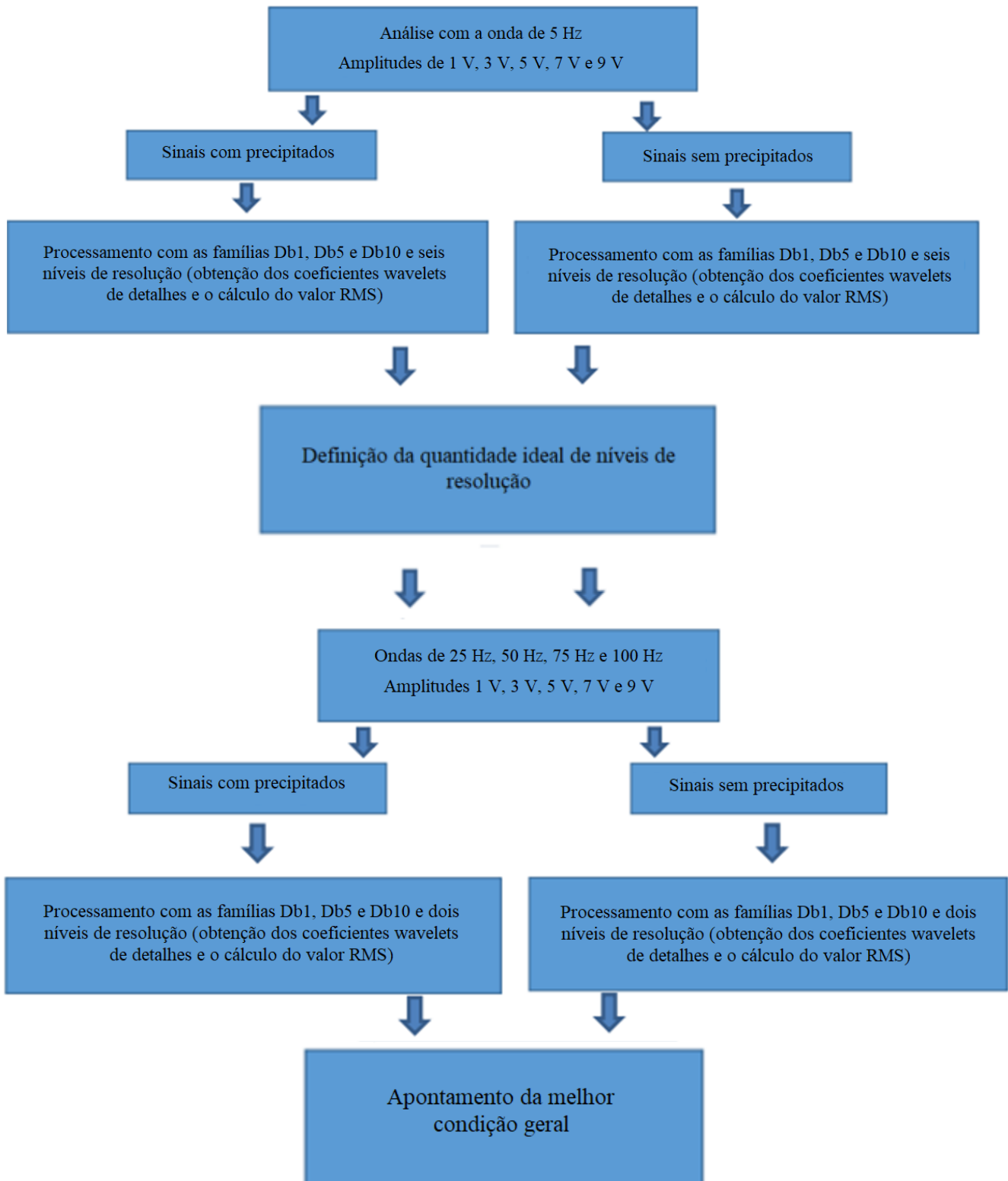
Fonte: (LIMA, 2019)

### 3.3.2 PROCEDIMENTOS

Este trabalho está dividido em duas etapas. Inicialmente, será analisada a onda emissora de 5 Hz, nas condições com precipitados e sem precipitados. Na literatura, não é adotada especificamente uma única família wavelet para estudo do RMB. A partir dos resultados preliminares com a família Db5, cuja qual foi utilizada no trabalho de (WANG et al, 2013), serão aplicadas outras duas famílias a fim de comparar os resultados obtidos em cada uma delas. Para tanto, serão utilizados até seis níveis de resolução e processamento com as famílias Daubechies 1 ou *Haar*, e ainda a família Daubechies 10, para obtenção dos coeficientes wavelets de detalhes e o cálculo do valor RMS.

A partir disso, será determinada a quantidade ideal de níveis para a frequência estudada, a qual será aplicada às frequências de 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz, que serão submetidas às mesmas famílias inicialmente descritas. No fluxograma da Figura 20 é apresentada a sequência de experimentos a serem realizados nos sinais, a fim de analisar a aplicação da TWD, a qual foi obtida por meio do Software OriginLab.

Figura 22 - Fluxograma dos procedimentos a serem realizados

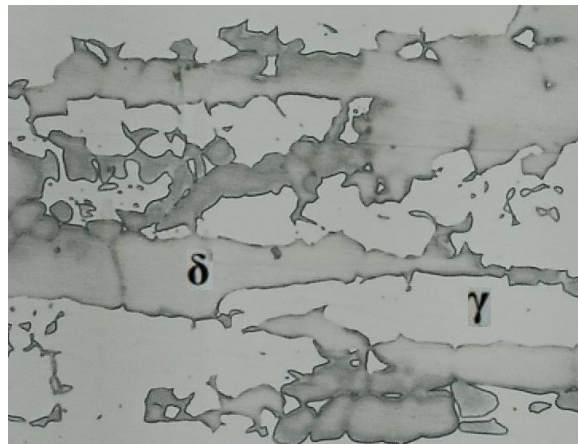


Fonte: própria

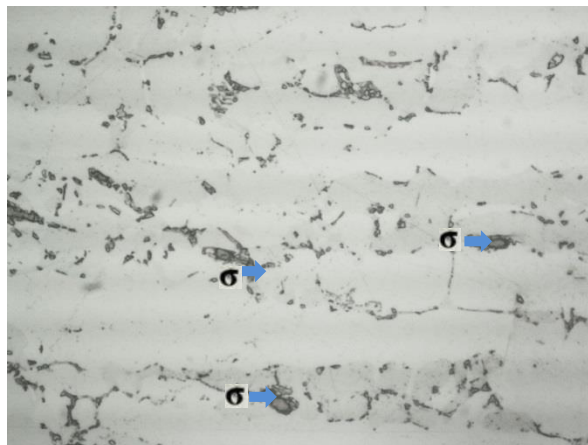
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios realizados nesta seção são empregados em duas amostras, uma na condição como recebida e outra na tratada para formação de 4 % do constituinte denominado de sigma. O material como recebido é formado por ilhas de austenita (paramagnética) numa matriz de ferrita, conforme a Figura 21 a. Todavia, as transformações da ferrita em sigma ocorrem no interior do constituinte ferromagnético e nos seus contornos. A Figura 21 b mostra a fase sigma estudada, que aparece como partículas escuras.

**Figura 23 – Microestrutura típica de um aço inoxidável duplex SAF 2205. a) Como recebida. b) Tratada 850 °C. Aumento 400X**



a)



b)

Fonte: Própria

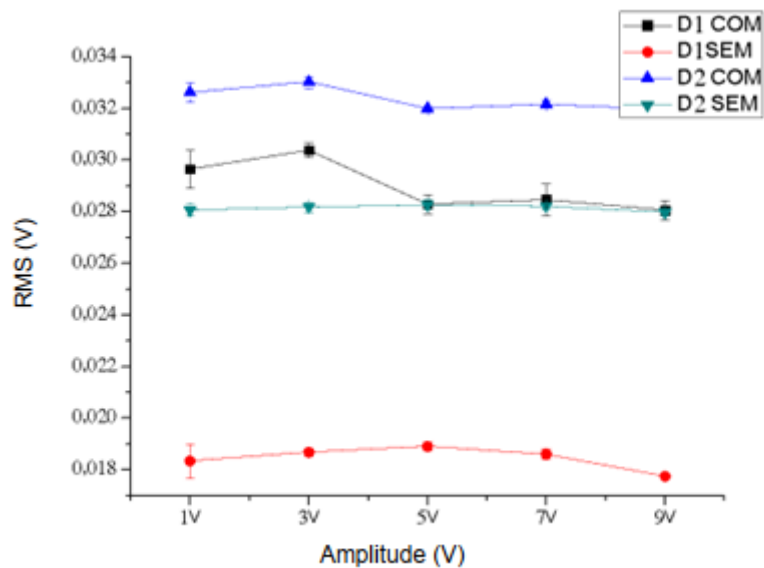


A seguir será feita uma análise, até seis níveis de decomposição, dos valores de RMS após a aplicação da TWD com a família Db1, para ondas emissoras de 5 Hz, com e sem a presença da fase sigma. A Figura 22 mostra os resultados decorrentes do primeiro e segundo nível, enquanto as Figuras 23, 24, 25 e 26 comparam o primeiro nível com o terceiro, quarto, quinto e sexto, respectivamente.

As Figuras 22, 23 e 24 mostram a variação do valor RMS, com um intervalo de confiança de 95%, da onda resultante da interação entre a aplicação da onda emissora de 5 Hz para condições com e sem a presença da fase sigma, após a aplicação da TWD com a família Db1 e dois, três e quatro níveis de resolução, respectivamente. As curvas resultantes para os níveis um, dois e três apresentam comportamento semelhante, isto é, os valores RMS para as condições com e sem a presença de precipitados apresentam valores similares dentro do intervalo de confiança utilizado, independente da amplitude aplicada.

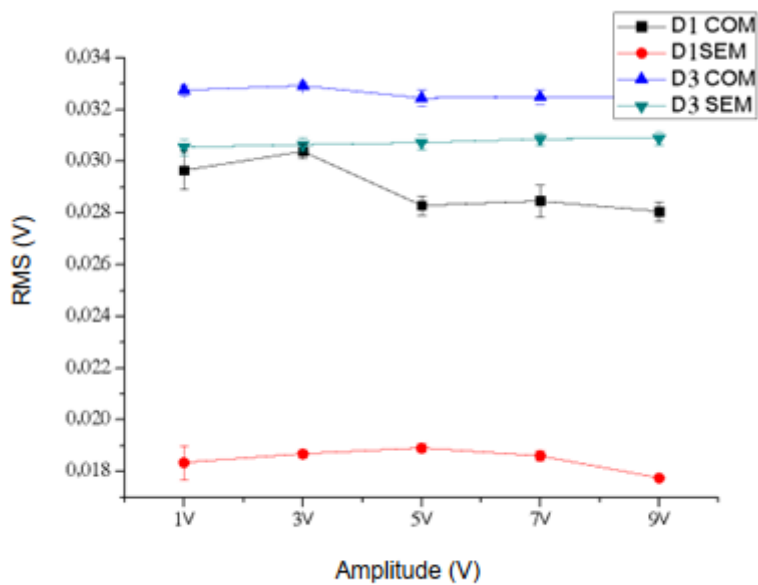
Nota-se também, das Figuras 22, 23 e 24, que os valores de RMS para a condição com a presença da fase sigma apresentam valores maiores, com relação à onda sem precipitados. Esse comportamento se deve ao fato da fase sigma funcionar como ponto de ancoragem para o movimento das paredes dos domínios magnéticos e a geração do ruído de Barkhausen. Acrescente-se que a diferença entre as duas condições dispostas nas Figuras decorre do RMB, o qual é gerado da interação entre a onda e os precipitados da fase sigma. O fluxo magnético tende a percorrer a região da ferrita que é ferromagnética. Contudo, a formação do constituinte sigma funciona como barreira dificultando a passagem do fluxo e gerando o RMB (GRIJALBA, 2010; PRAXEDES, 2012).

Figura 24 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e dois níveis de resolução



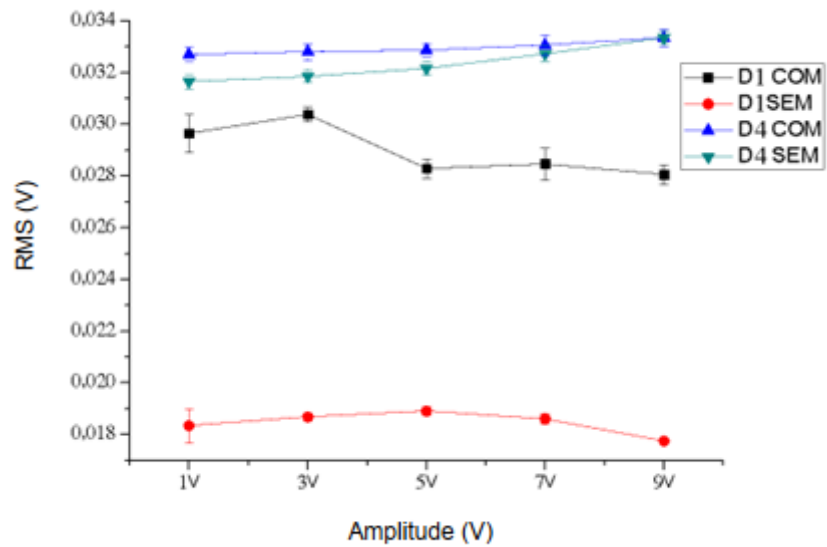
Fonte: própria

Figura 25 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e três níveis de resolução



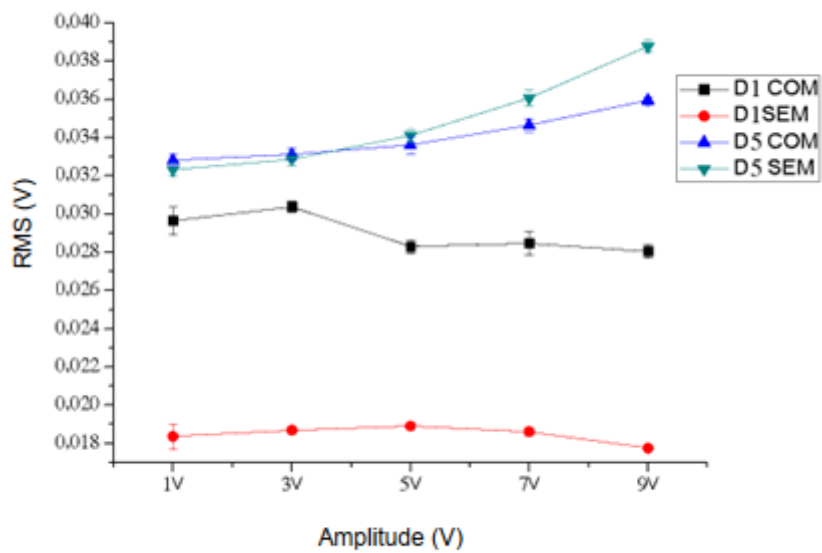
Fonte: própria

Figura 26 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e quatro níveis de resolução



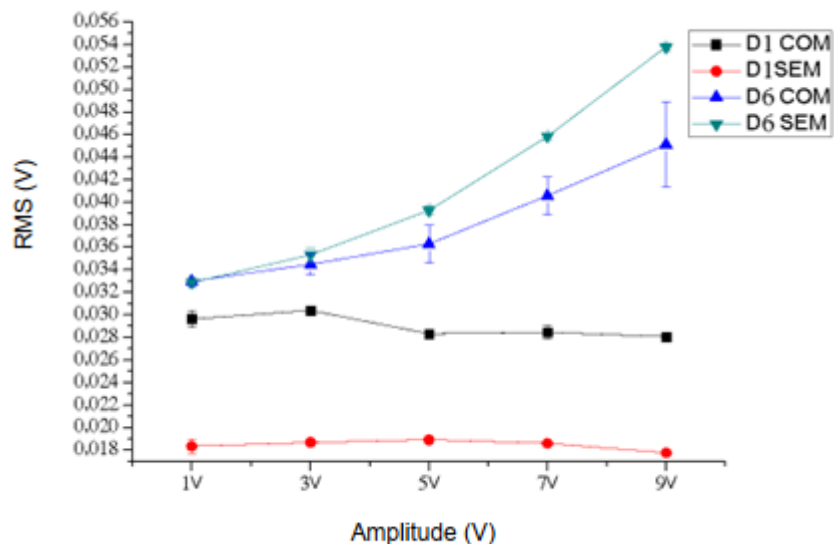
Fonte: própria

Figura 27 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e cinco níveis de resolução



Fonte: própria

**Figura 28 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e seis níveis de resolução**



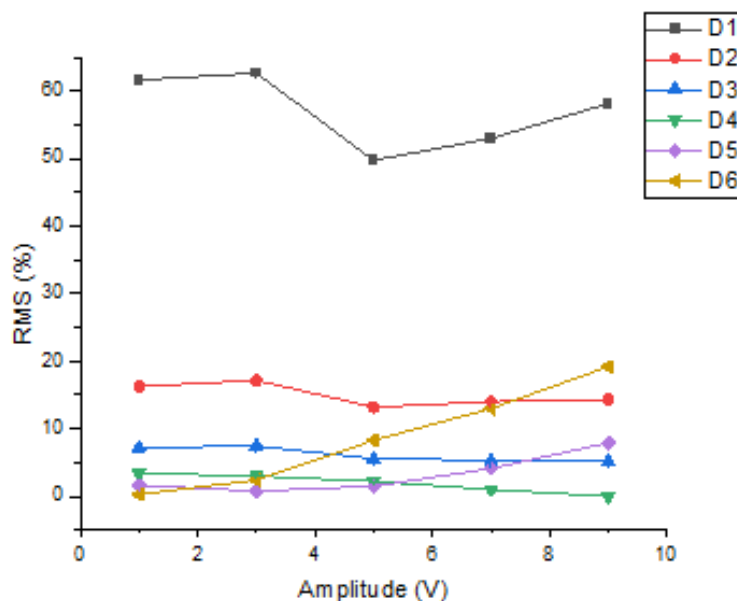
**Fonte: própria**

A análise das Figuras 22 a 26 mostra que, à medida que foram observados os valores de RMS até o nível de resolução 4, Figuras 22 a 24, esses aumentam com os níveis de decomposição e os resultados da condição sem precipitado sigma se aproximam da com a presença desse. Com a aplicação do nível 5, Figura 25, os valores de RMS passam a ser superiores para condição sem precipitado ao aplicarmos ondas com amplitudes a partir de 5V. Este mesmo comportamento é observado para utilização do nível 6, Figura 26, sendo que neste começando em 3 V. Isso indica que o efeito do paramagnetismo do constituinte sigma passa a superar o RMB. Isso possivelmente está associado à aproximação da região dos harmônicos da onda principal com o aumento da decomposição por transformada wavelet, que passam a interferir na região de ruído.

Desse modo, foram verificados quais níveis de decomposição resultam em maior sensibilidade de medida entre as duas condições estudadas, as variações, em módulo, dos valores de RMS entre os sinais com e sem a presença de sigma foram determinadas. A Figura 27 mostra estes valores para os seis níveis de resolução estudados. Nota-se que os melhores resultados foram obtidos com um nível, que apresentou valores acima de 50%, sendo que o segundo nível ficou em torno de 15% e os demais abaixo de 8%. O efeito da superação do

paramagnetismo sobre o do ruído de Barkhausen é percebido para o nível 5. Todavia, para a frequência de 5 Hz os valores ficaram abaixo de 10%.

**Figura 29 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db1 e seis níveis de resolução**



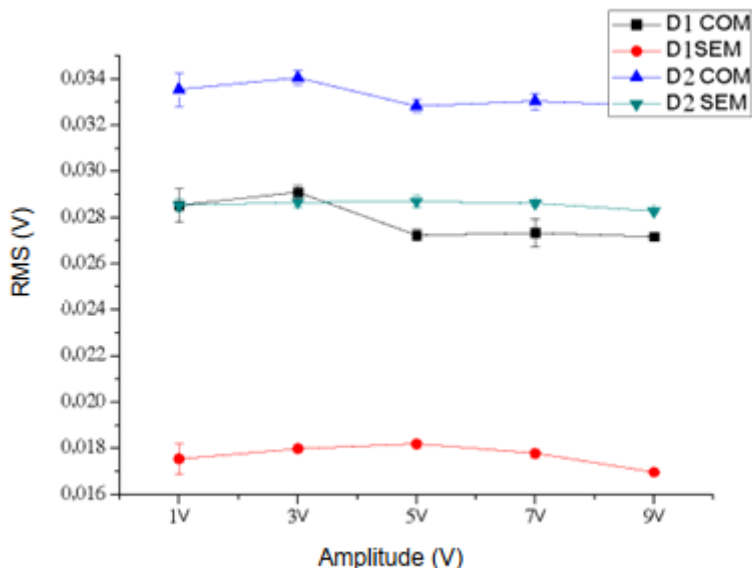
Fonte: própria

Em seguida, foi realizada uma análise dos valores RMS depois da aplicação da TWD com a família Db5, até seis níveis de decomposição, para ondas emissoras de 5 Hz, com e sem a presença do precipitado sigma. A Figura 28 ilustra os resultados decorrentes do primeiro e o segundo nível, já as Figuras 29, 30, 31 e 32 mostram um comparativo do primeiro nível com o terceiro, quarto, quinto e sexto, respectivamente.

As Figuras 28, 29, 30, 31 e 32 mostram a variação do valor RMS, com um intervalo de confiança de 95%, dos sinais captados na bobina receptora após a aplicação da TWD, com a família Db5 e dois, três, quatro, cinco e seis níveis de resolução, em função da amplitude da onda emissora de 5 Hz para condições com e sem a presença da fase sigma. Nesse contexto, quando comparada à família Db1, percebe-se, aqui, que as curvas que correspondem aos níveis um, dois, três, quatro, cinco e seis se apresentam constantes dentro do intervalo de confiança utilizado, independentemente da amplitude aplicada, para as duas condições estudadas.

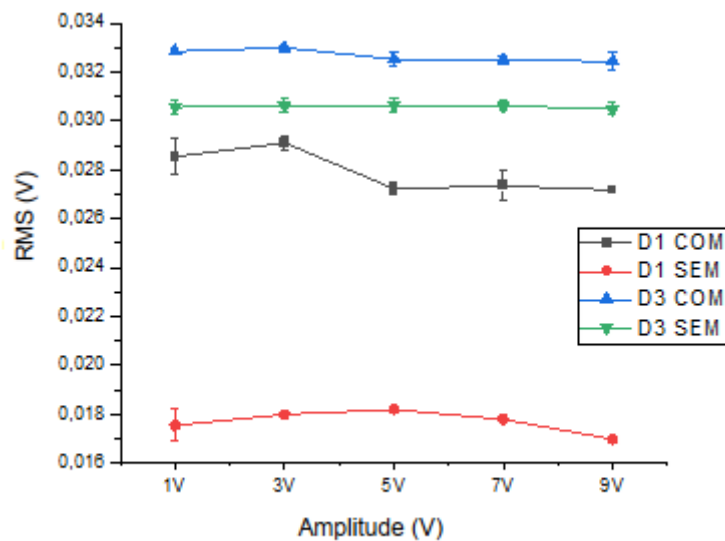
Observa-se ainda que a Figura 32 mostra um leve aumento dos valores RMS no sexto nível de decomposição na condição com precipitado de 7V para 9V.

**Figura 30 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e dois níveis de resolução**



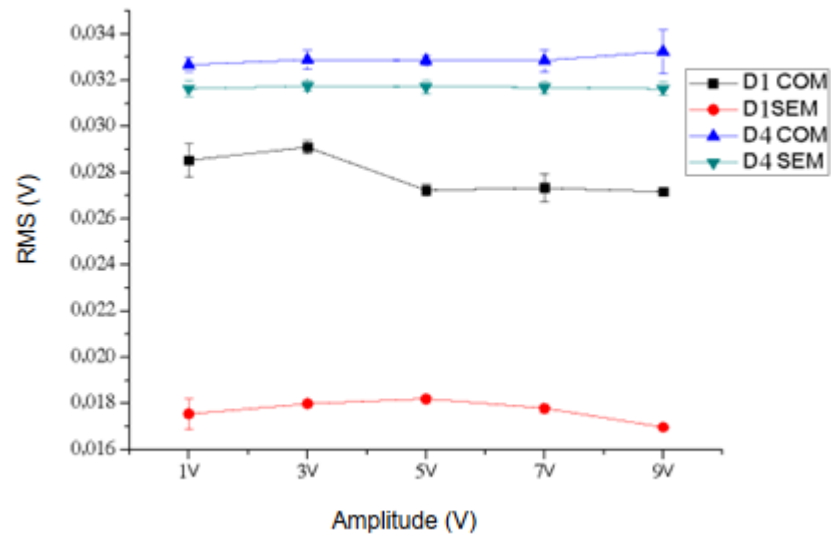
Fonte: própria

**Figura 31 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e três níveis de resolução**



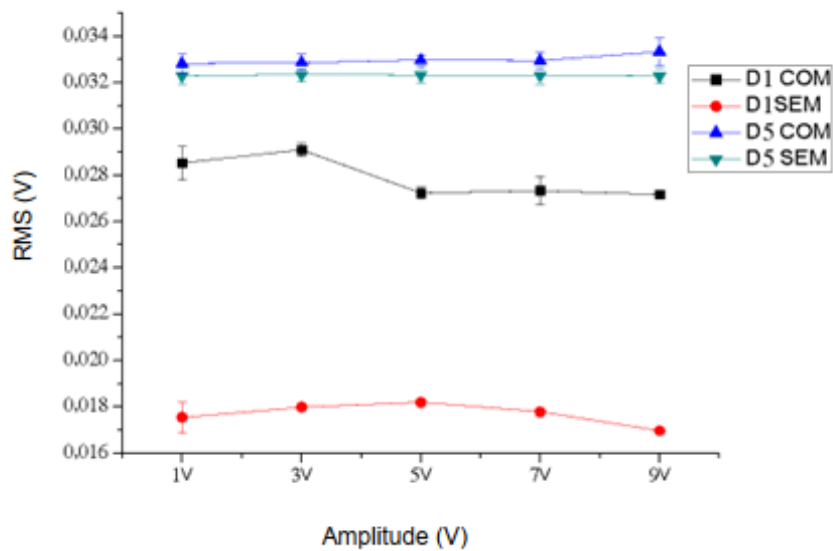
Fonte: própria

Figura 32 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e quatro níveis de resolução



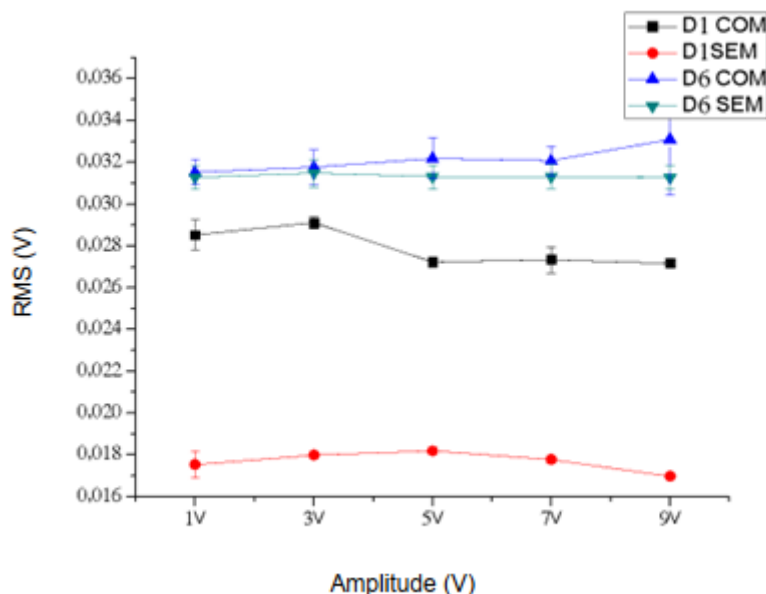
Fonte: própria

Figura 33 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e cinco níveis de resolução



Fonte: própria

**Figura 34 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e seis níveis de resolução**



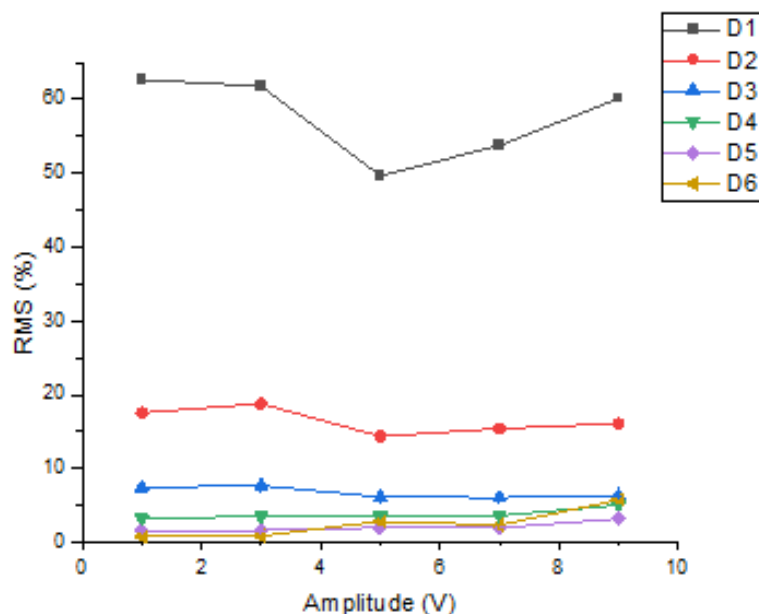
**Fonte: própria**

A análise das Figuras 28 a 32 denota que, à proporção que os valores RMS até o nível de resolução 6 aumentam, os resultados da condição sem precipitado sigma se aproximam da curva com a presença desse. Sendo que, com a aplicação do nível 6, Figura 32, os valores RMS na condição com o precipitado apresentam um aumento em relação à onda sem fase sigma, ao aplicar ondas com amplitudes a partir de 7V.

Sob essa ótica, a fim de constatar quais níveis de decomposição culminam numa maior sensibilidade de medição das condições analisadas, foi confeccionado um gráfico que mostra as variações, em módulo, dos valores RMS dos sinais com e sem a presença da fase sigma. A Figura 33 mostra esses valores para os seis níveis de resolução. Observa-se que os melhores resultados foram obtidos com um nível, pois apresentou valores superiores a 50%, enquanto o segundo nível ficou em torno de 15% e os demais abaixo de 10%.



**Figura 35 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db5 e seis níveis de resolução**



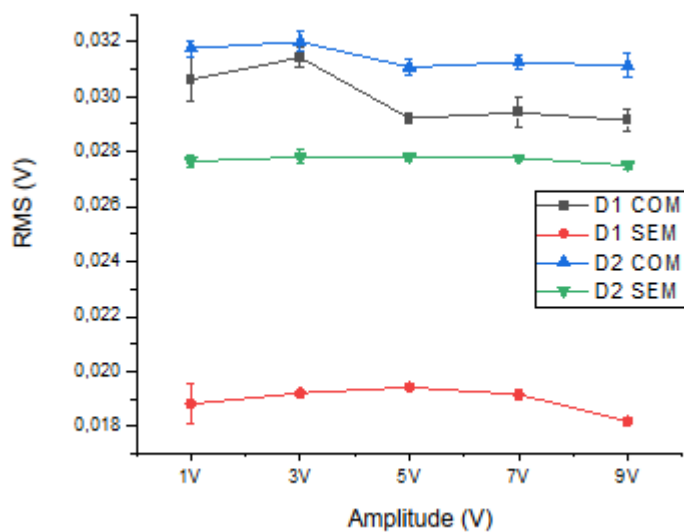
**Fonte: própria**

Por fim, foi feita a análise, até seis níveis de decomposição, dos valores RMS, após a aplicação TWD com a família Db10, para ondas emissoras de 5 Hz, com e sem a presença da fase deletéria. A Figura 34 mostra os resultados provenientes do primeiro e segundo nível, enquanto as Figuras 35, 36, 37 e 38 comparam o primeiro nível com o terceiro, quarto, quinto e sexto, respectivamente.

As Figuras 34, 35, 36, 37 e 38 ilustram a variação do valor RMS dos sinais captados na bobina receptora depois da aplicação da TWD com a família Db10 e dois, três, quatro, cinco e seis níveis de decomposição, em função da amplitude da onda emissora de 5 Hz e amostras com e sem a presença da fase sigma, com um intervalo de confiança de 95%. As curvas resultantes para os níveis dois, três, quatro, cinco e seis apresentam comportamento similar, ou seja, os valores RMS para as condições com e sem a presença da fase sigma independe da amplitude aplicada, dentro do intervalo de confiança utilizado. Percebe-se também que os valores RMS para a condição com a presença da fase sigma apresentam valores maiores, quando comparada à onda sem precipitados.

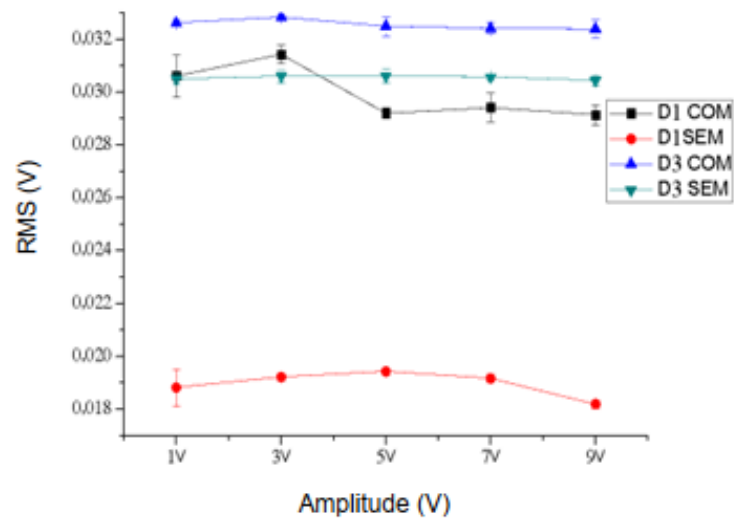
Ademais, a análise das Figuras 34 a 38 mostram que, à medida que percebemos os valores de RMS até o nível de resolução 6, esses aumentam com os níveis de decomposição, assim como os resultados da condição sem precipitado sigma se aproximam da curva com a presença desse. Além disso, de forma análoga à família Db5, percebe-se um leve aumento dos valores RMS a partir do sexto nível de decomposição na onda com precipitado de 7 V para 9V.

**Figura 36 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e dois níveis de resolução**



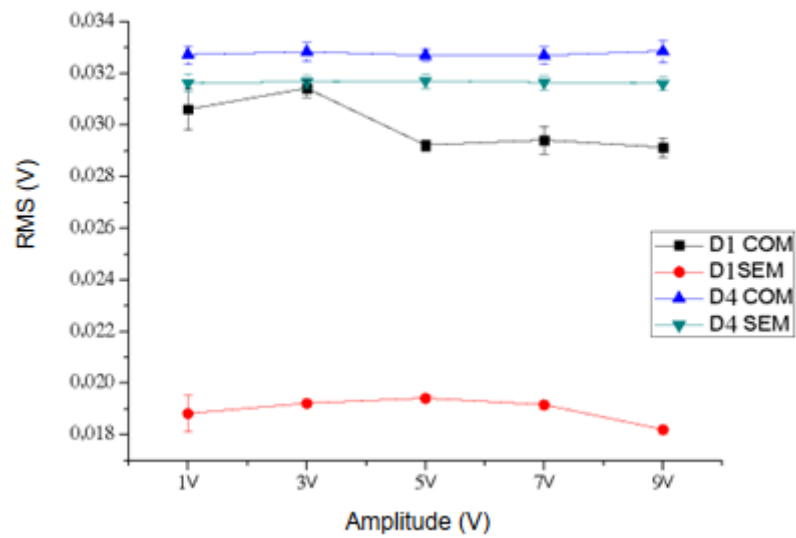
**Fonte: própria**

Figura 37 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e três níveis de resolução



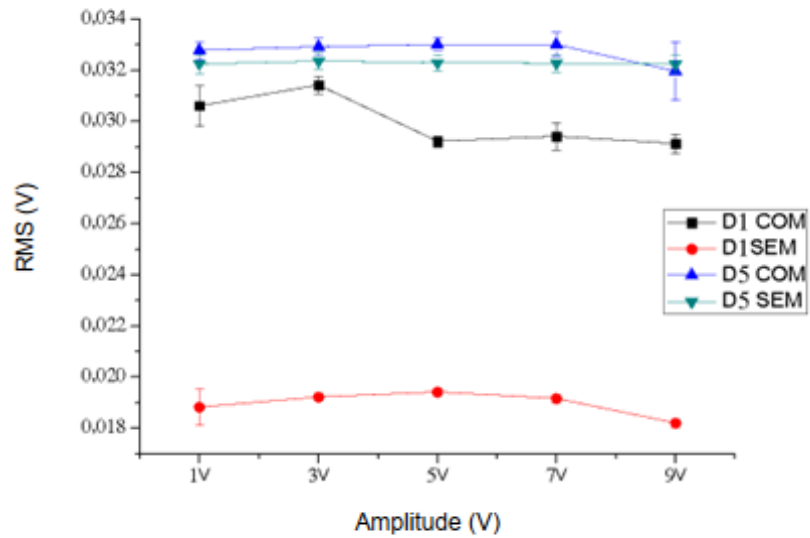
Fonte: própria

Figura 38 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e quatro níveis de resolução



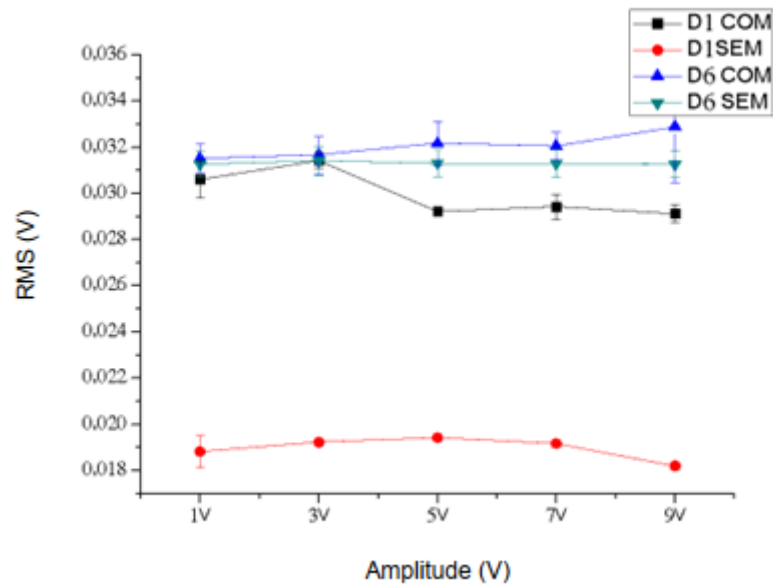
Fonte: própria

**Figura 39 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e cinco níveis de resolução**



Fonte: própria

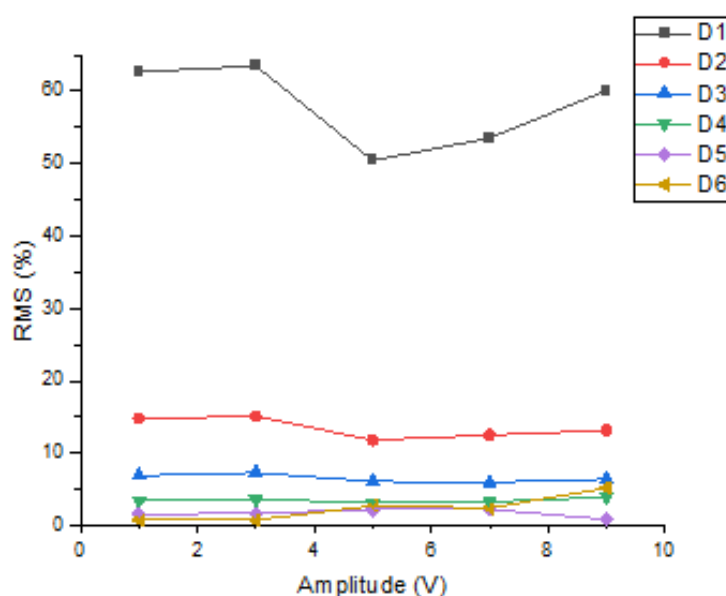
**Figura 40 - Variação do valor RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e seis níveis de resolução**



Fonte: própria

Finalmente, a Figura 39 mostra os níveis de decomposição que resultam em maior sensibilidade de medida entre as condições com e sem precipitados para os seis níveis analisados. Observa-se que os resultados que obtiveram mais êxito foram com um nível, os quais apresentam valores acima de 50 %, no tocante ao segundo nível, nota-se valores em torno de 15%. Os demais níveis ficaram abaixo de 8 %.

**Figura 41 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db10 e seis níveis de resolução**



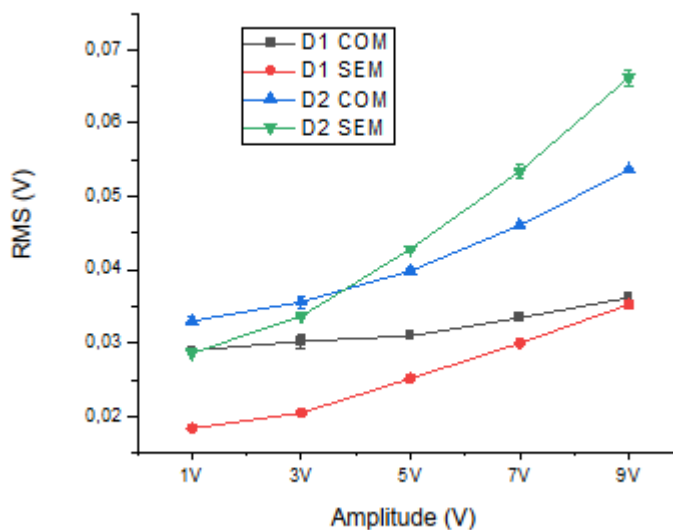
Fonte: própria

Diante do estudo das ondas emissoras de 5 Hz, conclui-se, inicialmente, que a análise do RMB por meio da TWD com a família Db1 teve resultado satisfatório para a aplicação de dois níveis de resolução, com maior êxito para o nível de decomposição 1. Com relação às famílias Db5 e Db10, estas também são capazes de atingir até dois níveis de decomposição para avaliação do RMB. Nesse contexto, serão utilizadas, a partir de então, ondas emissoras na frequência de 25Hz, tratadas apenas com dois níveis de resolução e as famílias Db1, Db5 e Db10, em função da amplitude da onda emissora de 25 Hz e amostras com e sem a presença de precipitados finos.

A Figura 40 apresenta a variação do valor RMS dos sinais captados na bobina receptora para ondas com frequência de 25 Hz. Nesse caso, ao aplicar a família Db1, nota-se

que, para o nível 2, os valores RMS passam a ser superiores para a condição sem precipitado ao aplicar ondas com amplitudes a partir de 4V. Esse comportamento indica que o efeito paramagnético da fase sigma passa a superar o do RMB. Além disso, para o primeiro nível há uma tendência de interseção das curvas com e sem a presença de precipitados para a amplitude de 9 V.

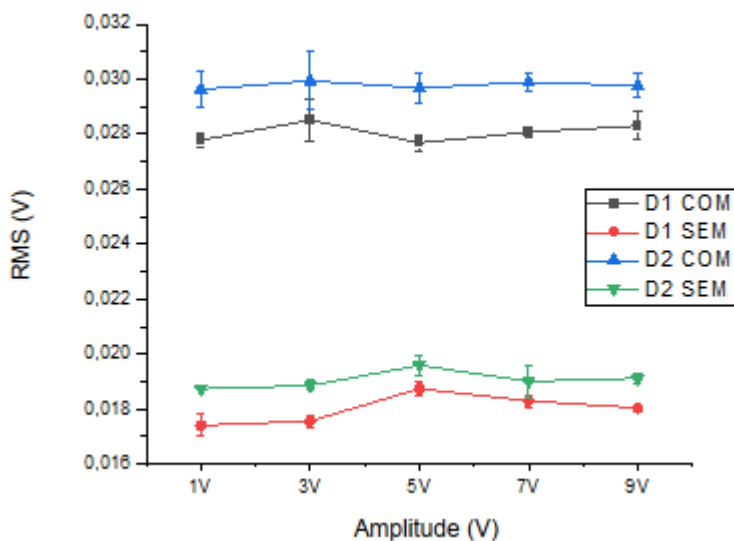
**Figura 42 - Variação do valor RMS do sinal de 25 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e dois níveis de resolução**



**Fonte: própria**

Ao analisar a Figura 41, com a aplicação da família Db5, nota-se que, para os dois níveis, as curvas apresentam o mesmo comportamento, independentemente da amplitude aplicada, para as condições com e sem precipitado.

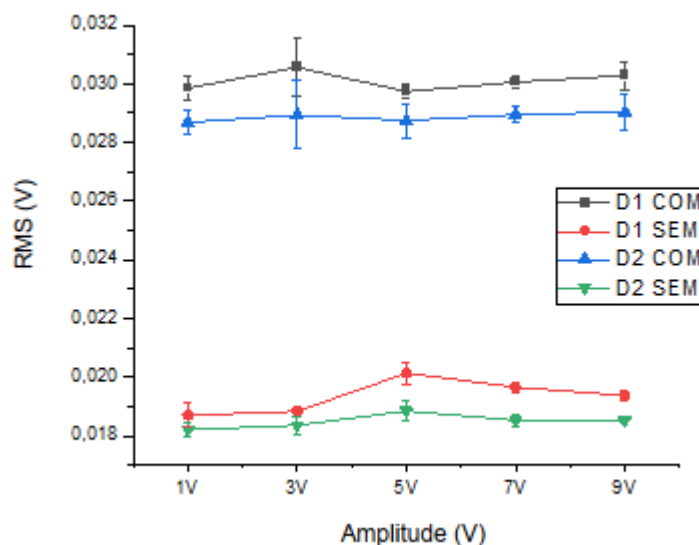
**Figura 43 - Variação do valor RMS do sinal de 25 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e dois níveis de resolução**



**Fonte: própria**

A mesma lógica se aplica na Figura 42 para a família Db10, já que as curvas D1 e D2 apresentam o mesmo comportamento, ou seja, pouca variação com o aumento das amplitudes estudadas.

**Figura 44 - Variação do valor RMS do sinal de 25 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e dois níveis de resolução**



**Fonte: própria**

As Figuras 43, 44 e 45 mostram as variações, em módulo, dos valores RMS entre os sinais com e sem a presença de fase sigma, a fim de averiguar os níveis 1 e 2, com a aplicação das famílias Db1, Db5 e Db10 para a onda de 25 Hz. Nesse sentido, observa-se da Figura 43, família Db1, que os resultados obtidos com um nível de decomposição apresentaram valores acima de 55 % para a amplitude de 1V, depois esse valor foi reduzindo, ficando em torno de 10 %, para amplitudes a partir de 8V. O nível de detalhe dois apresentou valores superiores a 75 % para amplitude de 1V, e em torno de 50 % para amplitudes acima de 7V.

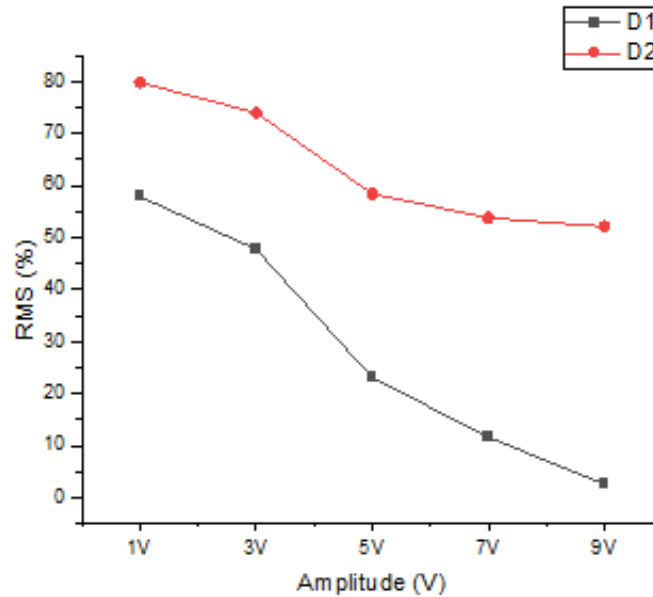
Já para o estudo da família Db5, Figura 44, os valores se concentram entre 63% e 48%. Com relação ao nível de resolução dois, observa-se que os resultados tiveram variações entre 47% e 58%. Por fim, a Figura 45, para o nível de decomposição um, apresenta resultados semelhantes ao da Db5, tanto para o primeiro, quanto para o segundo nível.

Nesse contexto, é válido apontar que, ao aplicar a família Db1, com a frequência de 25 Hz, é observada uma maior energia da onda interagindo com os precipitados, esse aumento se deve a interferência da amplitude das wavelets nos valores de RMS, que é mais sensível para amostras sem precipitados, as quais vão crescendo. É notado também, que existe uma tendência, para amplitude de 9 V, de interseção entre as duas condições, esse efeito se deve ao efeito paramagnético da fase sigma ser mais bem captado com o aumento da frequência e amplitude, que passa a se sobrepor para frequências maiores.

Em seu estudo, (LIMA, 2019) observou que a aplicação da onda emissora com a frequência de 25Hz apresentou crescimento dos valores de RMS, em função do aumento das amplitudes e frequências, tendendo ao cruzamento das duas condições. Esse comportamento decorre da influência dos harmônicos da onda emissora. Tendências similares são notadas com as frequências de 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz. Esse fenômeno denota que para frequências maiores o paramagnetismo da fase sigma passa a superar o RMB e ser mais sensível nos valores dos resultados, levando a uma taxa de redução dos valores de RMS, o que culmina no cruzamento das curvas.

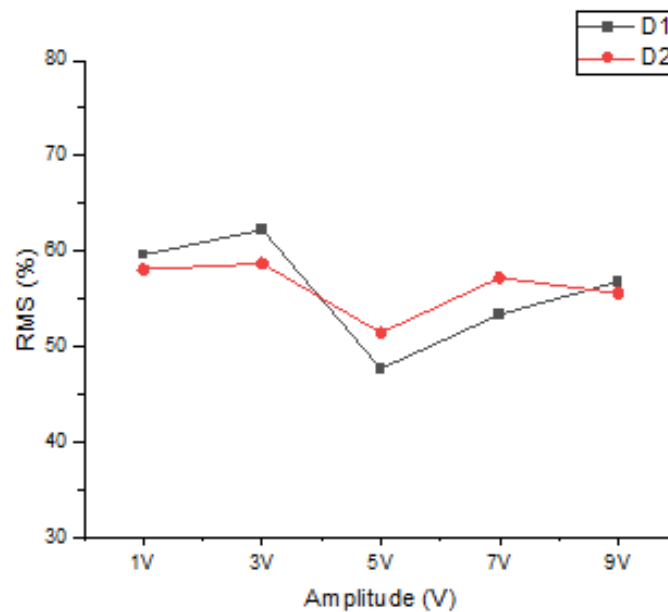


**Figura 45 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 25 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db1 e dois níveis de resolução**



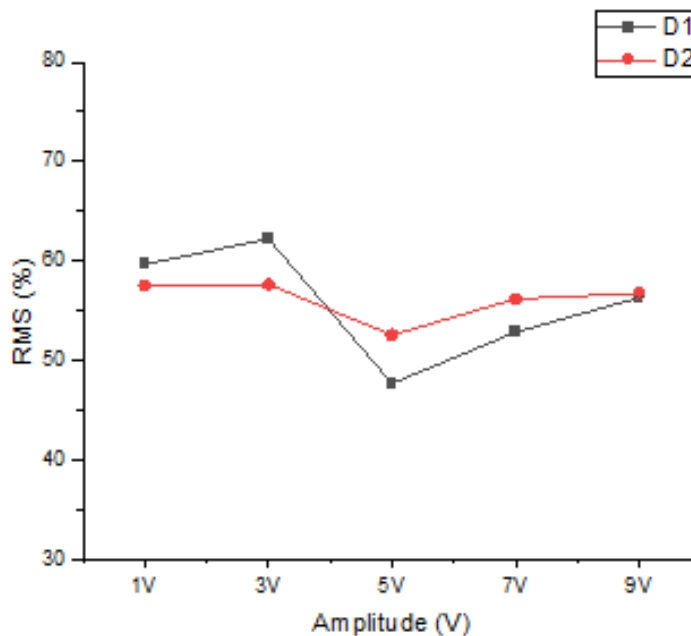
Fonte: própria

**Figura 46 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 25 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db5 e dois níveis de resolução**



Fonte: própria

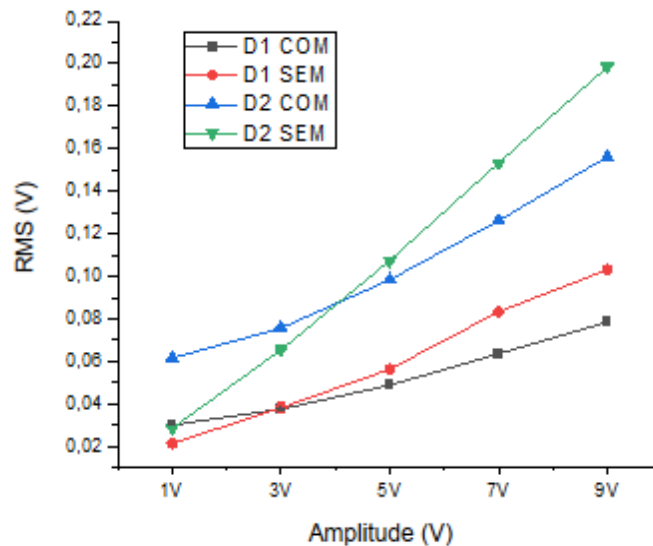
**Figura 47 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 25 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db10 e dois níveis de resolução**



**Fonte: própria**

As Figura 46, 47 e 48 mostram ondas emisoras na frequência de 50 Hz, tratadas com as famílias wavelets Db1, Db5 e Db10 e dois níveis de resolução, respectivamente, em função da amplitude da onda emissora de 50 Hz e amostras com e sem a presença de precipitados. Nota-se da Figura 46 que a curva D2 sem precipitados sobe abruptamente, já a curva D2 com precipitados também não se mantém estável, ainda que de maneira menos acentuada. Para o nível de detalhe um, a curva sem precipitado passa a superar os valores da onda D1 com precipitados para amplitudes a partir de 3V.

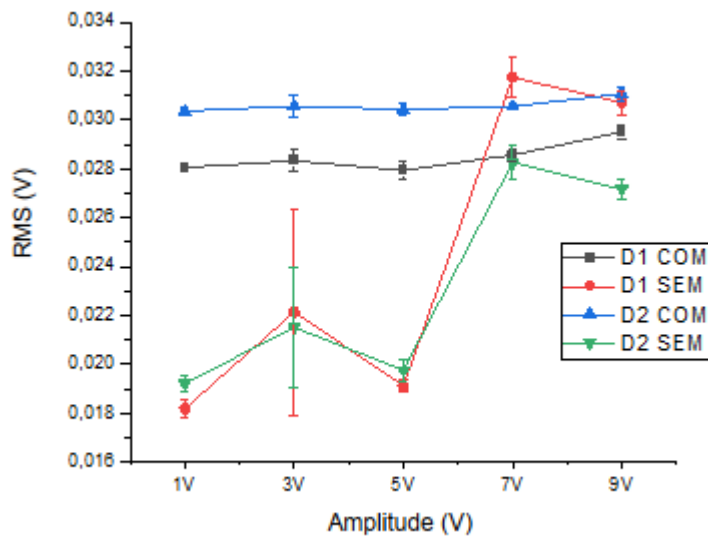
**Figura 48 - Variação do valor RMS do sinal de 50 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e dois níveis de resolução**



**Fonte: própria**

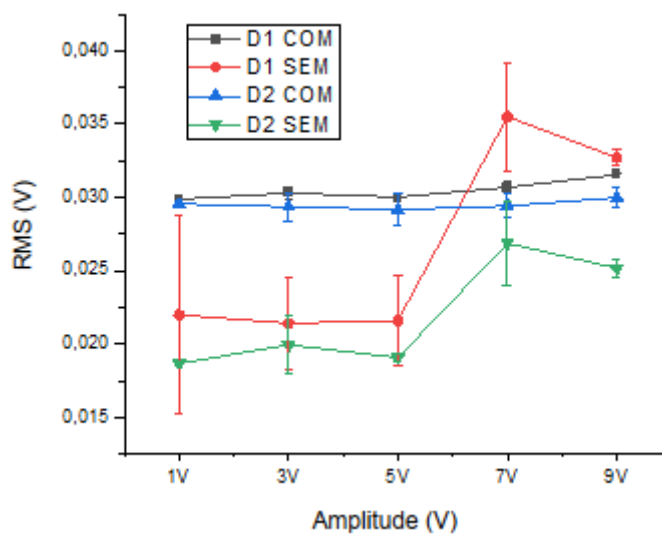
Na Figura 47 percebe-se que as curvas com precipitado apresentam valores superiores às curvas sem a presença desse, exceto para a curva D1 sem precipitado, para amplitude de 7V, que supera os valores referentes à curva D1 com a presença da fase deletéria. Observa-se, ainda, para amplitudes de 5V para 7V, que as curvas D1 e D2 sem precipitados sofre grandes influências devido a frequência elevada e os valores RMS sobem. O mesmo comportamento é notado na Figura 48, com a aplicação da família Db10, com a aproximação das curvas, para ambas as condições.

**Figura 49 - Variação do valor RMS do sinal de 50 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e dois níveis de resolução**



Fonte: própria

**Figura 50 - Variação do valor RMS do sinal de 50 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e dois níveis de resolução**



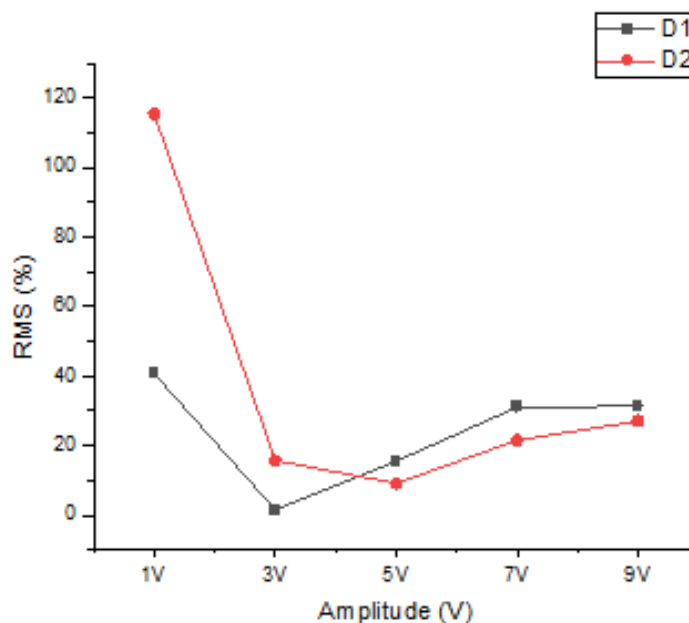
Fonte: própria

As Figuras 49, 50 e 51 ilustram as variações, em módulo, dos valores RMS entre os sinais com e sem a presença de fase sigma, os quais resultam em maior sensibilidade de medida entre as condições estudadas, para os níveis 1 e 2, com a aplicação das famílias Db1, Db5 e Db10 para a onda de 50 Hz. Nesse contexto, observa-se da Figura 49, família Db1, que os resultados obtidos com o um nível de decomposição apresentaram valores acima de 40% para

a amplitude de 1V, depois esse valor foi reduzindo e volta a subir, ficando em torno de 31%, para amplitudes a partir de 7V. O nível de resolução dois apresentou valores superiores a 115% para amplitude de 1V, ficando acima de 20% para amplitudes acima de 7V.

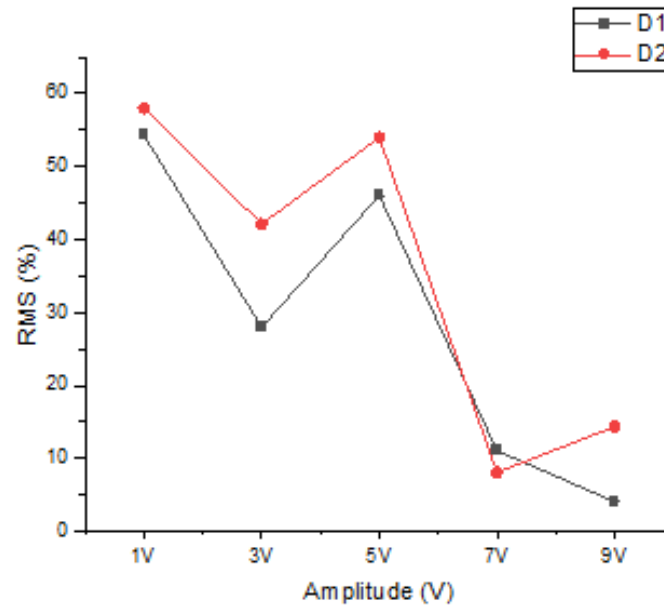
Já para o estudo da família Db5, Figura 50, o nível de decomposição um apresenta valores na faixa de 28% a 54% para amplitudes até 5 V e abaixo de 15%, a partir de 7 V. Com relação ao nível de resolução dois, observa-se que os resultados na faixa de 42% a 58%, para amplitudes até 5 V e abaixo de 15% a partir de 7 V. Na Figura 51, para o nível de resolução um apresenta resultados com valores entre 35%, a 40% até 5 V e valores menores que 18% para amplitudes a partir de 7V. No tocante ao nível de decomposição dois, os valores variam de 48% a 58% para as amplitudes de 1V a 5V, ficando abaixo dos 20% para as demais.

**Figura 51 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 50 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db1 e dois níveis de resolução**



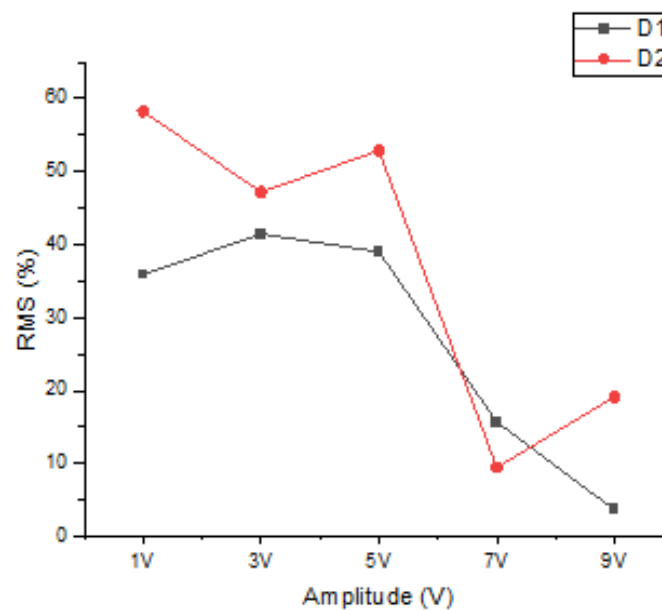
Fonte: própria

**Figura 52 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 50 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db5 e dois níveis de resolução**



Fonte: própria

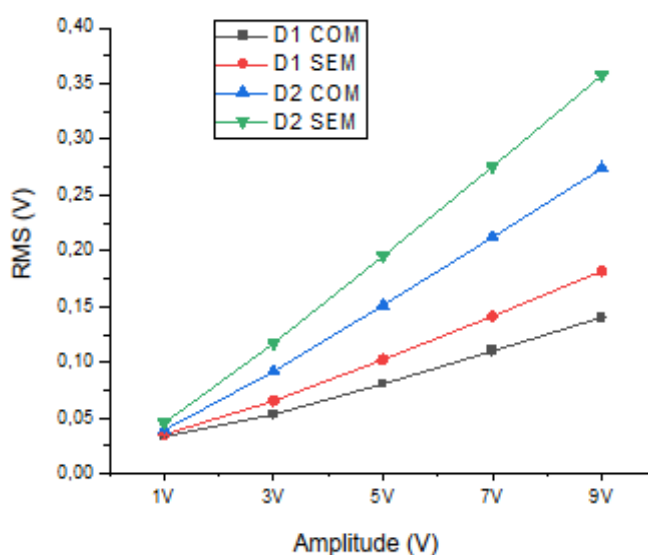
**Figura 53 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 50 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db10 e dois níveis de resolução**



Fonte: própria

As Figura 52, 53 e 54 mostram ondas emisoras na frequência de 75 Hz, tratadas com as famílias wavelets Db1, Db5 e Db10 e dois níveis de resolução, respectivamente, com e sem a presença de precipitados. Percebe-se da Figura 52 que a curva D2 sem precipitados cresce subitamente, já a curva D2 com precipitados também não se mantém estável, ainda que de maneira menos evidenciada. Para o nível de resolução um, as curvas também apresentam um aumento nos valores, sendo que de forma menos acentuada.

**Figura 54 - Variação do valor RMS do sinal de 75 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e dois níveis de resolução**



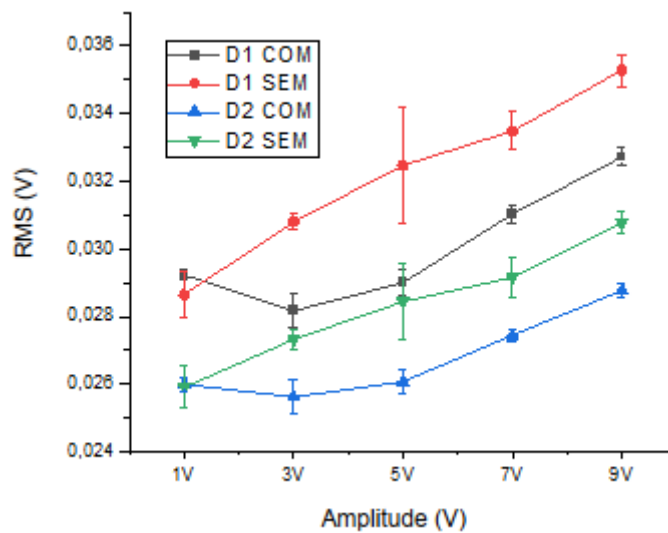
Fonte: própria

Na Figura 53, com a aplicação da família Db5, nota-se que as curvas D1 apresentam valores superiores às curvas D2. O mesmo comportamento é notado na Figura 54, com a aplicação da família Db10, com a aproximação das curvas, para ambas as condições. A aplicação de ondas com 75 Hz evidencia o efeito do paramagnetismo do constituinte sigma que reduz os valores de RMS. Como essa é formada a partir da ferrita, que é ferromagnética, tem-se a redução da permeabilidade do material em estudo (SILVA 2016, TAVARES 2018).

À medida que vamos da aplicação da família Db1 para Db10, Figuras 52 a 54, os valores de RMS do primeiro nível passam a superar os do segundo. Isto indica que o aumento dos níveis de decomposição tendem a ser mais sensíveis ao efeito do paramagnetismo da fase

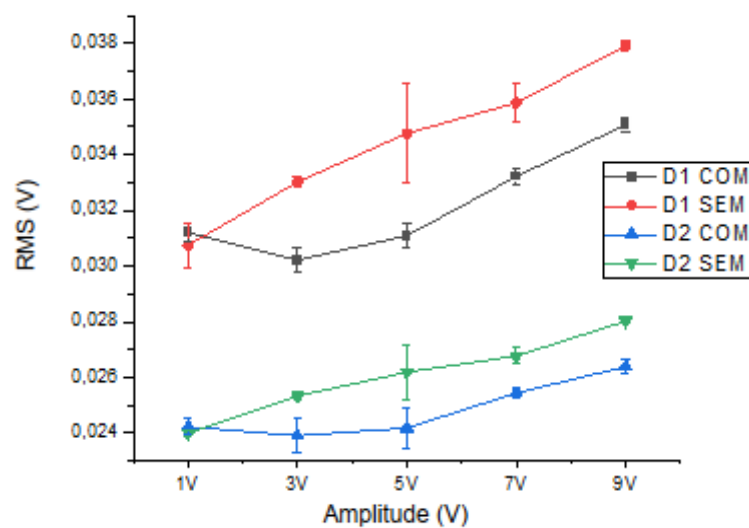
sigma, possivelmente pela aproximação dos harmônicos da onda principal, que passam a ser amplificados.

**Figura 55 - Variação do valor RMS do sinal de 75 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e dois níveis de resolução**



Fonte: própria

**Figura 56 - Variação do valor RMS do sinal de 75 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e dois níveis de resolução**



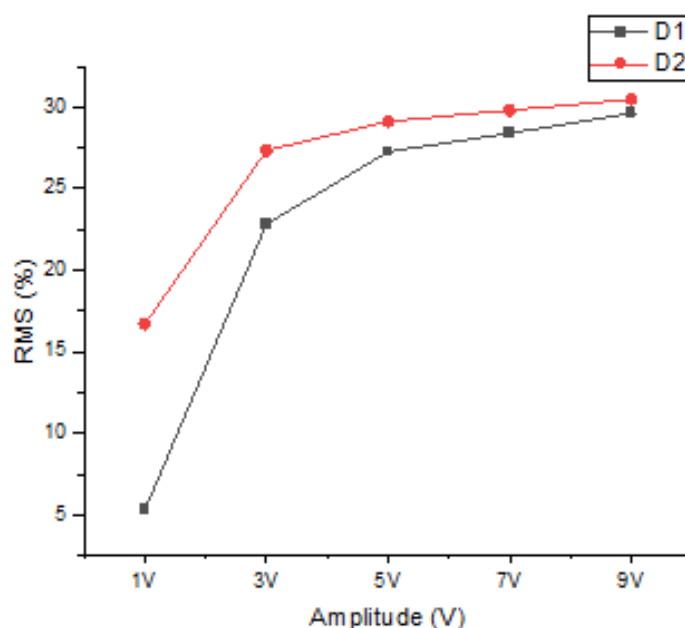
Fonte: própria



As Figuras 55, 56 e 57 ilustram as variações, em módulo, dos valores RMS entre os sinais com e sem a presença de fase sigma, os quais resultam em maior sensibilidade de medida entre as condições estudadas, para os níveis de decomposição 1 e 2, com a aplicação das famílias Db1, Db5 e Db10 para a onda de 75 Hz. Nesse contexto, observa-se da Figura 55, família Db1, que os resultados obtidos com o um nível de decomposição foram crescendo, chegando a 29% para amplitude de 9 V. O nível de decomposição dois apresentou valores em torno de 29% para amplitude entre 5V e 7V, superando 30% a partir de 9V.

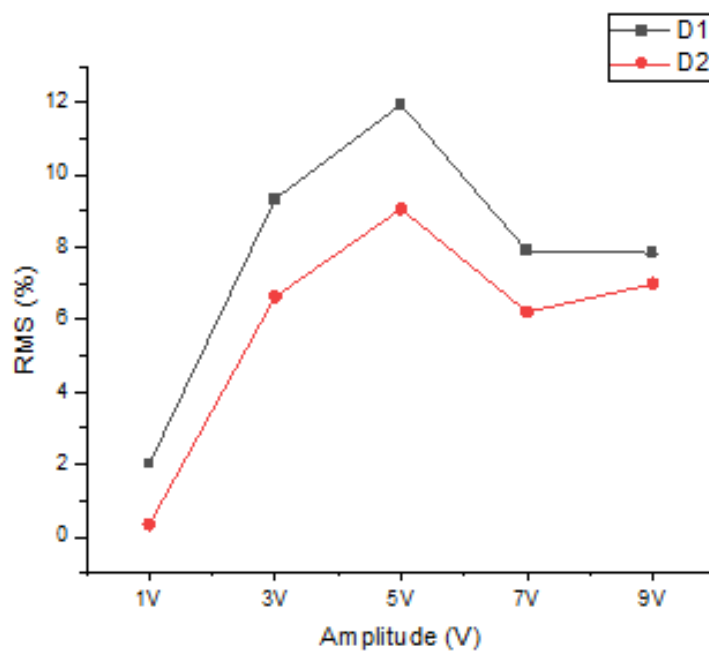
Já para o estudo da família Db5, Figura 56, o nível de resolução um apresenta valores que vão crescendo até 5 V, seguida de uma queda para amplitude de 5 V para 7 V e, posteriormente, uma estabilização de 7 V para 9 V. Esse comportamento é verificado também no nível de resolução dois e na Figura 57, para ambos os níveis.

**Figura 57 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 75 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db1 e dois níveis de resolução**



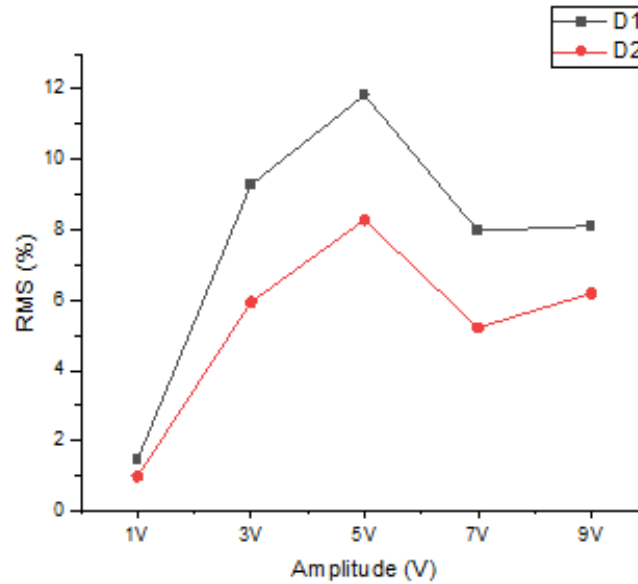
Fonte: própria

**Figura 58 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 75 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db5 e dois níveis de resolução**



**Fonte: própria**

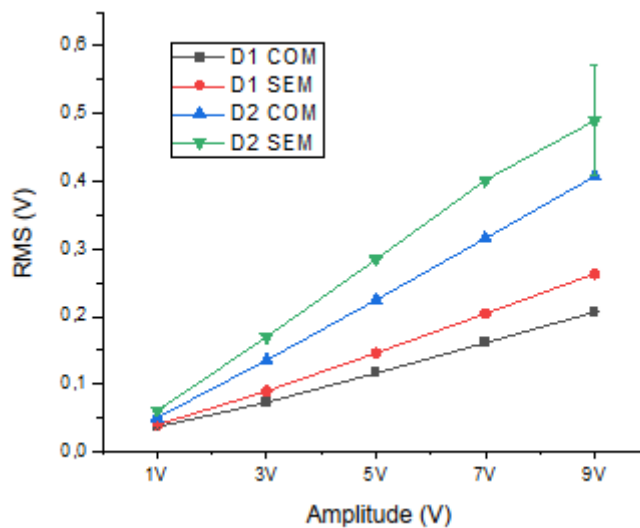
**Figura 59 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 75 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db10 e dois níveis de resolução**



**Fonte: própria**

As Figuras 58, 59 e 60 mostram ondas emissoras na frequência de 100 Hz, tratadas com as famílias wavelets Db1, Db5 e Db10 e dois níveis de resolução, respectivamente, com e sem a presença da fase deletéria. Percebe-se da Figura 58 que a curva D2 sem precipitados cresce a partir da amplitude de 1V, o mesmo comportamento é observado para as demais curvas, porém, de maneira menos acentuada.

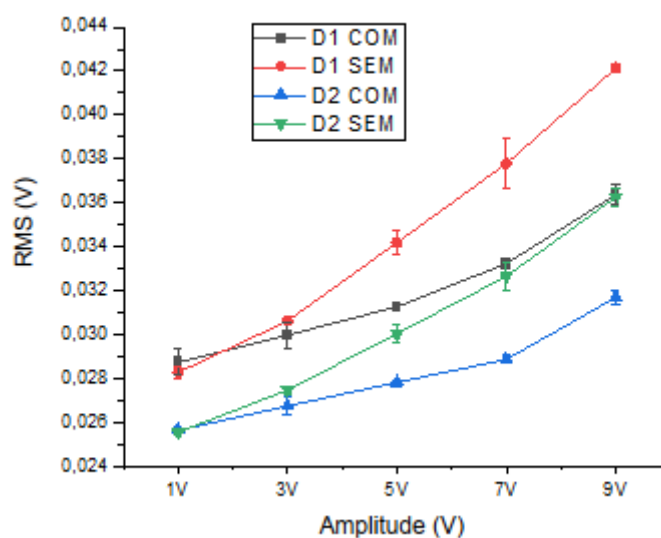
**Figura 60 - Variação do valor RMS do sinal de 100 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e dois níveis de resolução**



**Fonte: própria**

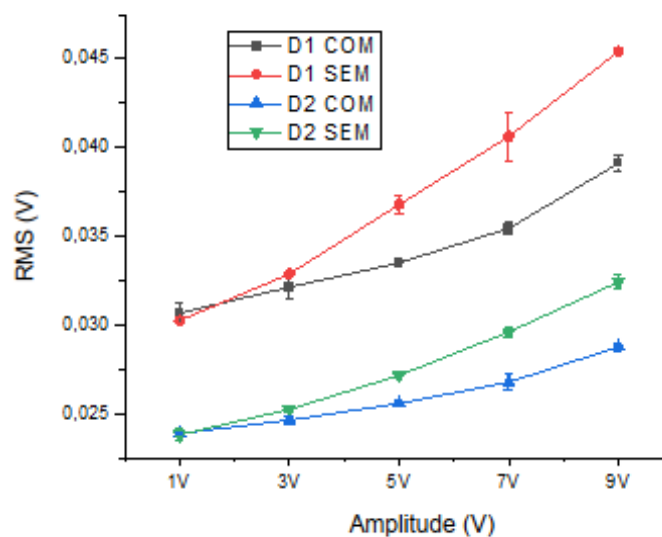
Na Figura 59, com a aplicação da família Db5, nota-se que as curvas D1 apresentam valores superiores às curvas D2. O mesmo comportamento é notado na Figura 60, com a aplicação da família Db10, com a aproximação das curvas, para ambas as condições. Este comportamento foi o mesmo observado para as ondas com frequências 75 Hz, onde foi levantado a possibilidade do aumento de frequência fazer com que o efeito dos harmônicos da onda principal passasse a ser amplificado com a as famílias Db5 e Db10.

**Figura 61 - Variação do valor RMS do sinal de 100 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e dois níveis de resolução**



Fonte: própria

**Figura 62 - Variação do valor RMS do sinal de 100 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e dois níveis de resolução**



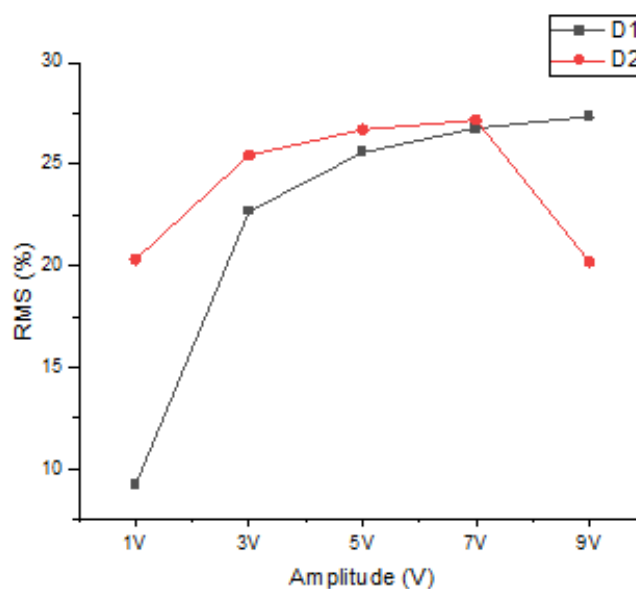
Fonte: própria

As Figuras 61, 62 e 63 ilustram as variações, em módulo, dos valores RMS entre os sinais com e sem a presença de precipitado, os quais resultam em maior sensibilidade de medida entre as condições estudadas, para os níveis de resolução 1 e 2, com a aplicação das famílias

Db1, Db5 e Db10 para a onda de 100 Hz. Nesse contexto, observa-se da Figura 61, família Db1, que os resultados obtidos com o um nível de decomposição foram crescendo, chegando a 27% para amplitude de 9 V. O nível de resolução dois apresentou valores em torno de 25% para amplitude entre 3 V e 7 V, ficando em torno de 20%, para 9 V.

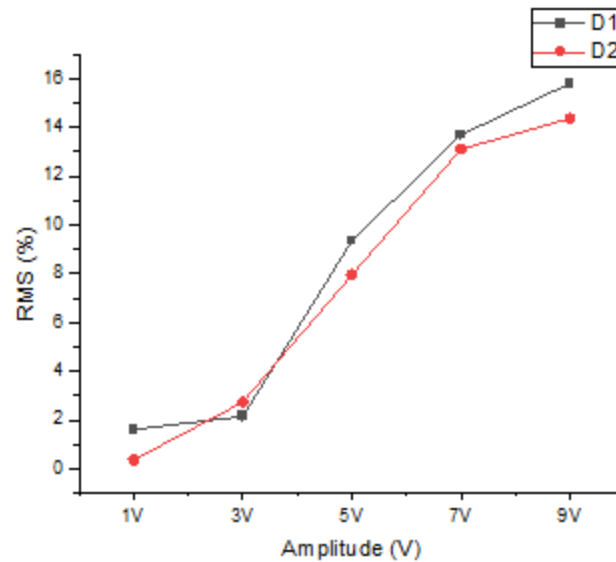
Já para o estudo da família Db5, Figura 62, o nível de resolução um apresenta valores que vão crescendo, chegando em torno de 15% para amplitude de 9V. Esse comportamento é verificado também no nível de decomposição dois e na Figura 63, para ambos os níveis.

**Figura 63 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db1 e dois níveis de resolução**



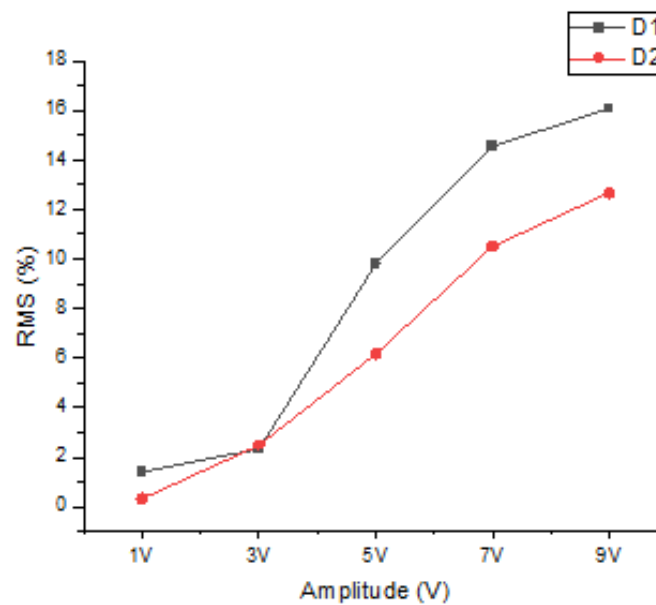
Fonte: própria

**Figura 64 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db5 e dois níveis de resolução**



Fonte: própria

**Figura 65 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db10 e dois níveis de resolução**

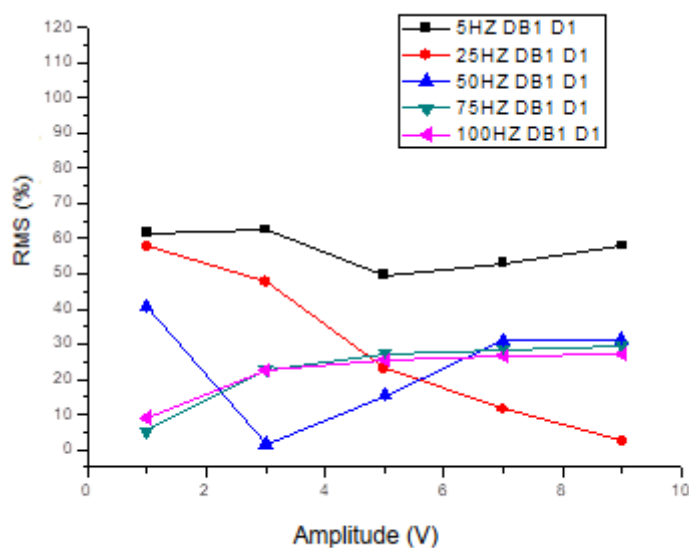


Fonte: própria

As Figuras 64 e 65 mostram as variações, em módulo, dos valores RMS em porcentagem entre os sinais com e sem a presença de precipitado para os níveis de resolução 1 e 2, com a aplicação da família Db1 para as ondas de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz. Analisando primeiramente a curva D1, é possível observar que, para a frequência de 5 Hz, todas as amplitudes apresentam um resultado satisfatório, com valores superiores a 50%. Com relação a onda de 25 Hz, percebe-se que é possível detectar a presença da fase sigma para amplitudes de 1V e 3V. Já a onda de 50 Hz ilustra valores superiores a 40% para amplitude de 1V.

A observação da curva D2, Figura 65, denota que a melhor região de trabalho corresponde a frequência de 25 Hz, para todas as amplitudes estudadas, com valores superiores a 50%, tal como a onda emissora de 50 Hz, para a amplitude de 1V.

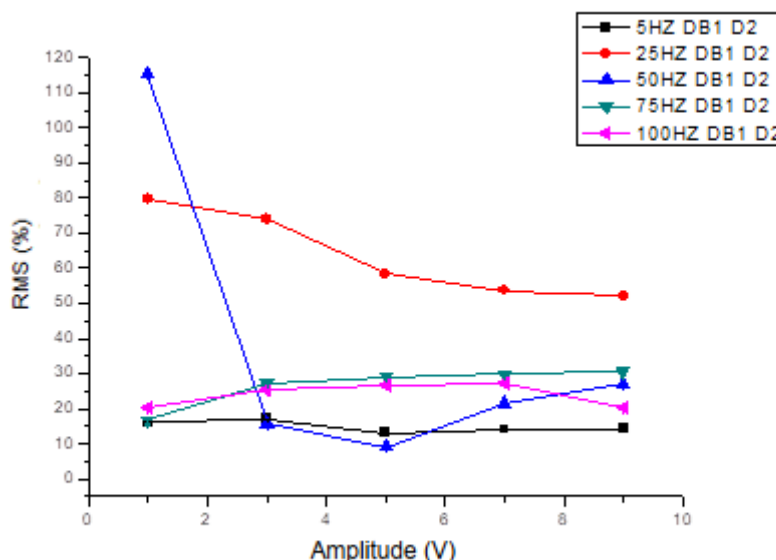
**Figura 66 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75Hz e 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db1 e um nível de resolução**



Fonte: própria



**Figura 67 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75Hz e 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db1 e dois níveis de resolução**

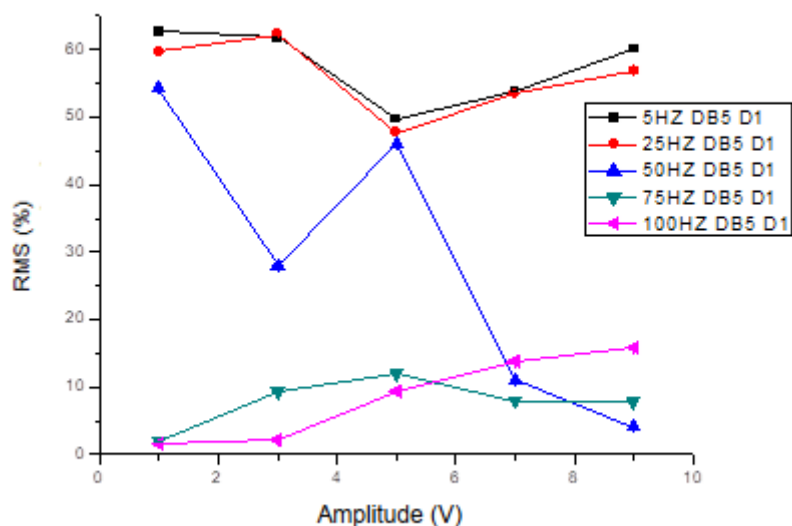


**Fonte: própria**

Na mesma perspectiva, as Figuras 66 e 67 ilustram as variações, em módulo, dos valores RMS em porcentagem entre os sinais com e sem a presença de precipitado para os níveis de resolução 1 e 2, com a aplicação da família Db5 para as ondas de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz. Analisando inicialmente a curva D1, é possível observar que, para as frequências de 5 Hz e 25 Hz, todas as amplitudes apresentam um resultado satisfatório, com valores superiores a 50%. No tocante à onda de 50 Hz, nota-se êxito para amplitudes de 1V, 3V e 5V, com valores se alcançando 55%.

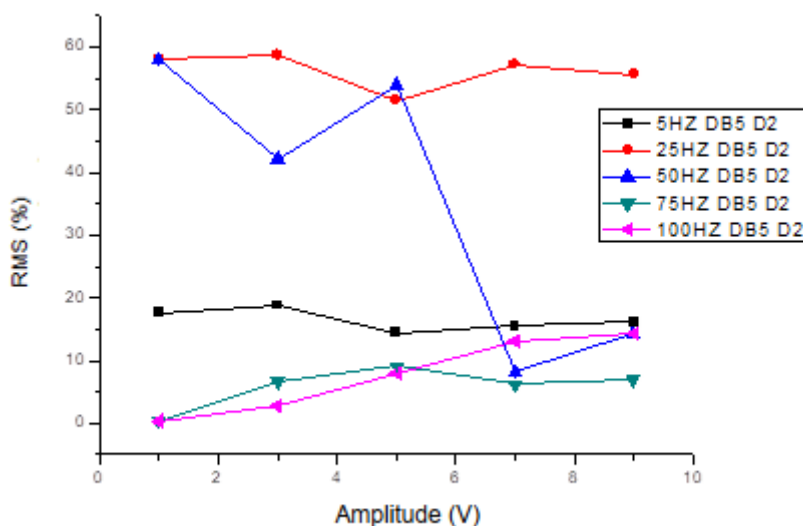
A observação da curva D2, Figura 67, mostra que a melhor região de trabalho corresponde a frequência de 25 Hz, para todas as amplitudes analisadas, com valores superiores a 52%, tal como a onda emissora de 50 Hz, para as amplitudes de 1V, 3V e 5V.

Figura 68 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75Hz e 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db5 e um nível de resolução



Fonte: própria

Figura 69 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75Hz e 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db5 e dois níveis de resolução

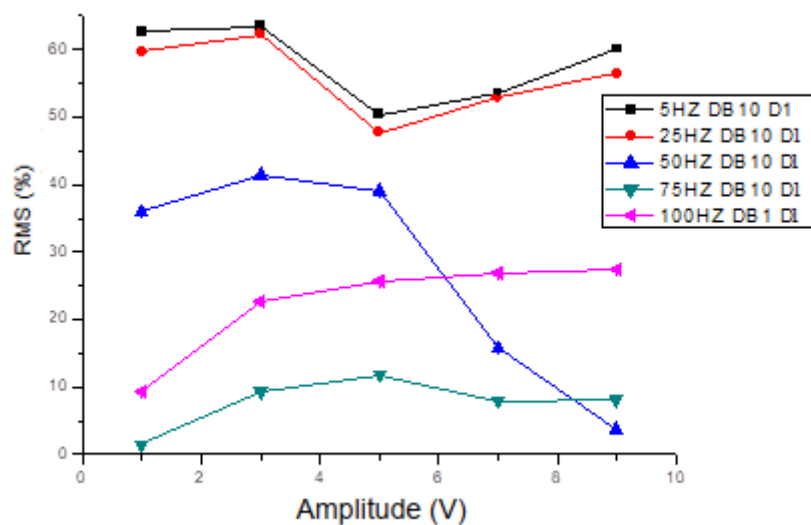


Fonte: própria

Finalmente, as Figuras 68 e 69 mostram as variações, em módulo, dos valores RMS em porcentagem entre os sinais com e sem a presença de precipitado para os níveis de resolução 1 e 2, agora com a aplicação da família Db10 para as ondas de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz. Da curva D1, é possível observar que as frequências de 5 Hz e 25 Hz apresentam êxito em todas as amplitudes estudadas, com valores superiores a 50%. Já onda de 50 Hz ilustra resultados satisfatórios para amplitudes de 1V, 3V e 5V, com valores se alcançando 40%.

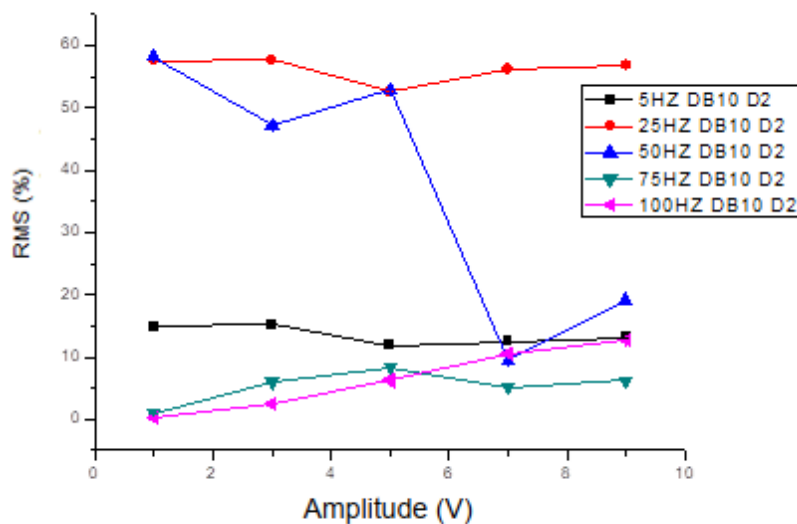
Com relação à curva D2, Figura 69, a melhor região de trabalho corresponde a frequência de 25 Hz, para todas as amplitudes analisadas, com valores superiores a 55%, tal como a onda emissora de 50 Hz, para as amplitudes de 1V, 3V e 5V.

**Figura 70 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75Hz e 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db10 e um nível de resolução**



Fonte: própria

**Figura 71 - Variação do módulo do valor RMS em porcentagem, entre as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação de ondas de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75Hz e 100 Hz na bobina emissora e uso de transformada wavelet com a família Db10 e dois níveis de resolução**



**Fonte: própria**

Este trabalho avaliou a aplicabilidade da TWD no RMB para detecção da fase sigma no AID SAF 2205. Foi observado que ondas com frequências de 5 Hz e um nível de resolução apresentaram bom resultados independentes da amplitude e das famílias estudadas. Contudo, ondas de 25 Hz mostram resultados semelhantes à de 5 Hz para as famílias Db5 e Db10, para todas as amplitudes e um nível de decomposição. Todavia, para a família Db1, os resultados se limitaram até 3 V. No tocante da frequência de 50 Hz, os resultados foram satisfatórios para amplitude de 1 V para família Db1, e até 5 V para Db5 e Db10. As frequências de 75 Hz e 100 Hz obtiveram resultados abaixo de 30%, não sendo útil para a análise do RMB.

Os estudos realizados para o segundo nível de decomposição mostram que ondas de frequência de 25 Hz apresentam os melhores resultados independentes das amplitudes e famílias estudadas, enquanto a de 50 Hz tem resultados melhores para amplitudes até 5 V para as famílias Db5 e Db10, e até 1 V para a Db1. As frequências de 75 Hz e 100 Hz apresentaram resultados abaixo de 30%, não sendo útil para a análise do RMB.

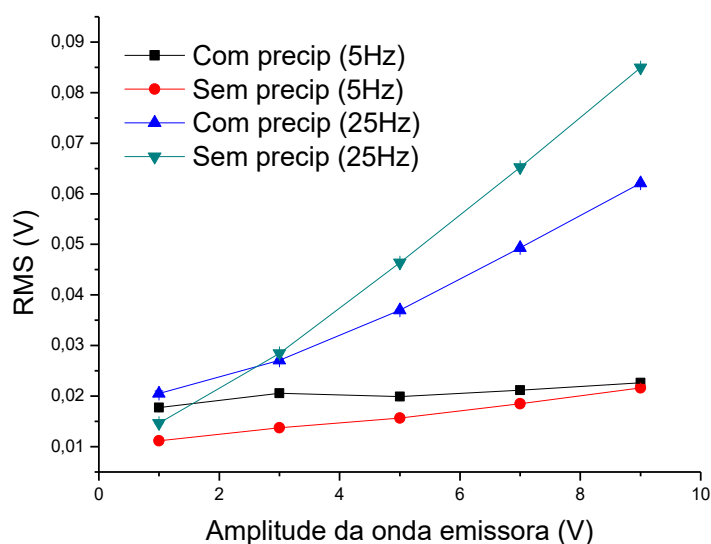
As Figuras 70 e 72 mostram os gráficos produzidos com os resultados de Lima (2019), que utilizou o filtro passa-alta, e Viegas (2019), que usou somente o corte de frequência para

dissociar o ruído de Barkhausen do sinal como um todo. Enquanto isso, as Figuras 71 e 73 mostram os gráficos obtidos através da TWD, aplicando as famílias Db1 e Db10 com dois e um níveis de resolução, respectivamente, para as ondas emissoras de 5 Hz e 25 Hz.

Analisando, inicialmente, a Figura 71, nota-se o mesmo aspecto e curvas com comportamentos semelhantes à Figura 70. Convém destacar, ainda, que a tendência de cruzamento das curvas ocorre na onda de 25 Hz para amplitudes acima de 3 V, sendo que de forma menos acentuada. Ademais, não foi verificada a interseção das curvas na frequência de 5 Hz para a amplitude de 9 V. Isso reflete, possivelmente, a redução na influência dos harmônicos da onda principal com a aplicação da wavelet.

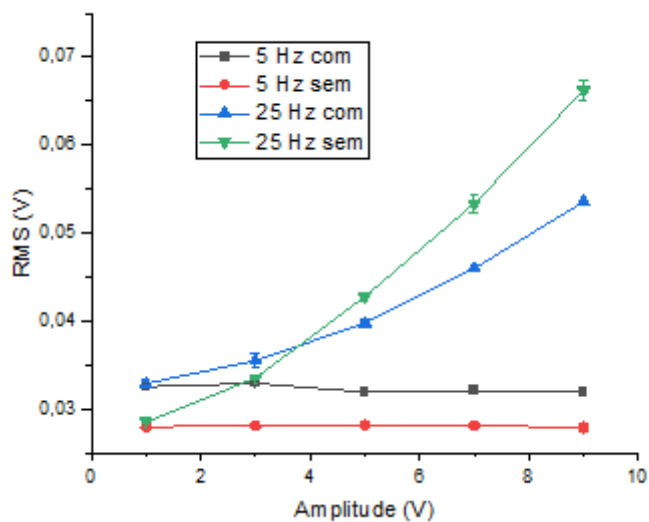
A mesma análise se aplica às Figuras 72 e 73, evidenciando um aumento na ordem de grandeza dos resultados em 100 vezes em relação aos resultados de Viegas (2019). Nessa linha, ao invés de realizar medições na escala de tensão em  $10^{-4}$ , de agora em diante poderá ser feita em  $10^{-2}$ . Além disso, observa-se uma redução da faixa de erro em cada ponto, tornando, pois, mais precisa a informação. Resultados semelhantes foram observados por Ibernion (2022) na aplicação da TWD para detecção de nanoprecipitados formados no mesmo aço em estudo.

**Figura 72 - Variação RMS do sinal de 5 Hz e 25 Hz para amostras com e sem precipitados, obtidos por Lima (2019)**



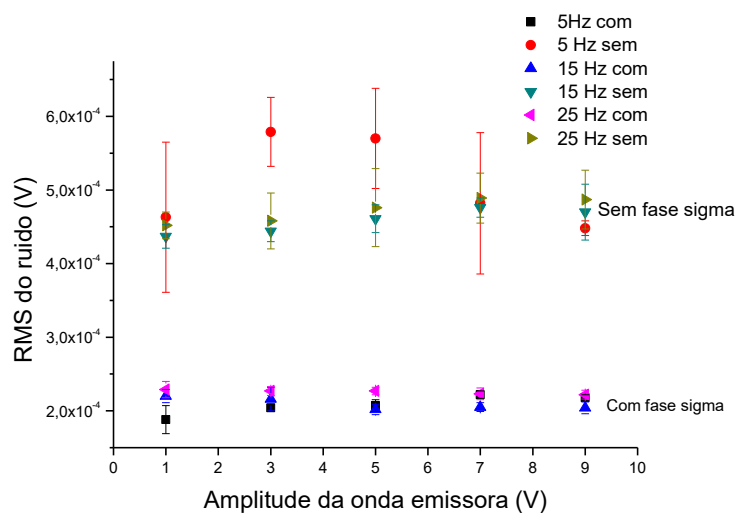
Fonte: (LIMA, 2019)

**Figura 73 - Variação RMS do sinal de 5 Hz e 25 Hz para amostras com e sem precipitados, através da TWD com a família Db1 e dois níveis de resolução**



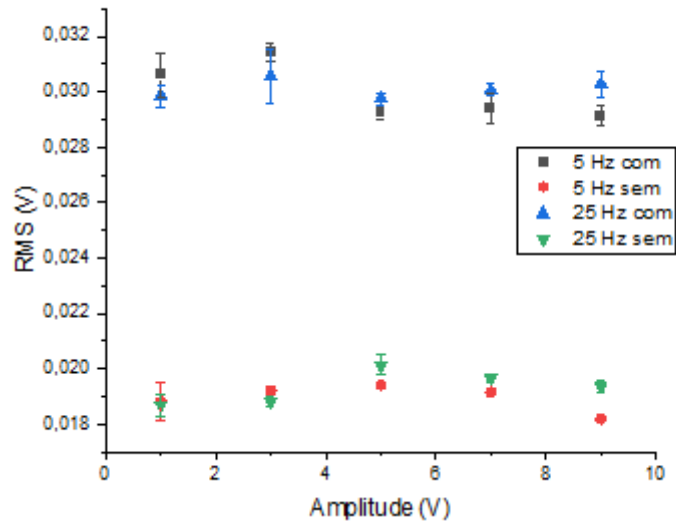
Fonte: Própria

**Figura 74 - Variação dos valores RMS do ruído na bobina receptora em função da frequência e amplitude da onda aplicada na bobina emissora, obtidos por Viegas (2019)**



Fonte: VIEGAS, 2019

**Figura 75 - Variação RMS do sinal de 5 Hz e 25 Hz para amostras com e sem precipitados, através da TWD com a família Db10 e um nível de resolução**



**Fonte: Própria**

## 5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi apresentada uma análise do RMB para detecção da microestrutura deletéria sigma através da aplicação de TWD. As seguintes considerações foram observadas:

- A análise do RMB para ondas com frequências de 5 Hz e 25 Hz, com aplicação da TWD, foi capaz de detectar a presença da fase sigma no aço estudado. Amostras com a presença da fase sigma apresentaram maiores valores de RMS devido ao RMB;
- As medidas de RMS para frequência de 5 Hz mostram ser independentes da amplitude e das famílias estudadas, enquanto para aplicação de frequências de 25 Hz apresentam aumento dos RMS em função da amplitude, sendo mais sensível para aplicação da família Db1;
- O crescimento dos valores de RMS para ondas de 25 Hz e famílias Db1 mostram uma tendência de inversão de posicionamento das curvas, possivelmente devido ao efeito do paramagnetismo da fase sigma tende a superar ao do RMB;
- O RMB também pode ser gerado através de ondas emissoras de 50 Hz, entretanto, com o aumento da frequência, os resultados tendem a se tornarem menos precisos;
- A TWD com as famílias Daubechies de ordem 1 (Db1), 5 (Db5) e 10 (Db10) podem ser utilizadas para avaliação do RMB gerado a partir de ondas emissoras de 5 Hz, 25 Hz e 50 Hz;
- Para ondas emissoras de 5 Hz é possível utilizar um nível de detalhe com a família Db1, Db5 e Db10, independente das amplitudes aplicadas;
- Para ondas emissoras de 25 Hz é possível utilizar um nível de detalhe com as famílias Db5 e Db10 para todas as amplitudes. No tocante à família Db1, os resultados são satisfatórios até 3 V. Já para o nível de detalhes dois, é possível utilizar as três famílias, independente das amplitudes estudadas;



- Para ondas emisoras de 50 Hz é possível utilizar dois níveis de detalhes com as famílias Db5 e Db10 até 5 V. No tocante à família Db1, os resultados são satisfatórios para 1 V;
- Para ondas emisoras de 75 Hz e 100 Hz não foi possível utilizar a TWD, uma vez que nessa faixa de frequência o ruído sofre distorções significativas, de modo que inviabiliza a diferenciação entre amostras com e em precipitados.
- A aplicação da TWD aumenta em 100 vezes a ordem de grandeza das medições, quando comparada ao corte de frequência, já com a aplicação de filtros passa-altas, observa-se a mesma ordem de grandeza, porém nota-se uma menor interferência dos harmônicos.

## **5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS**

A partir da pesquisa realizada, a seguir, são feitas algumas sugestões para trabalhos futuros envolvendo as temáticas abordadas:

- a. Partindo dos resultados obtidos, realizar um estudo comparativo com outros métodos de análise do Ruído Magnético de Barkhausen, a fim de analisar novos parâmetros de análise, como, por exemplo, o tempo de processamento;
- b. Aplicar no ruído de Barkhausen a transformada wavelet discreta com as famílias Daubechies de ordens ainda mais superiores.

## 5.2 TRABALHOS PUBLICADOS

No decorrer deste curso, foram publicados os seguintes trabalhos acadêmicos:

- E. de M. Silva, A. Francis, I. P. de B. Neto, A. M. Rodrigues, “Detecção de Tratamentos Térmicos e Anisotropia Magnética em um Aço SAE 4340 através de um Ensaio Eletromagnético”, *19º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO) e 14º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (CBMag)*, virtual, 2020.
- E. de M. Silva, A. M. Rodrigues, A. Francis, W. Macedo, I. Luiz, I. P. de B. Neto, J. Pereira, “Detection of the Sigma Phase in a Duplex Stainless Steel Through Measurements of Magnetic Permeability”, *19º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO) e 14º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (CBMag)*, virtual, 2020.
- M. Rodrigues, E. de M. Silva, C. E. B. Lopes, F. E. M. da Silva, I. P. de B. Neto, L. G. de Lima, J. Leite, “Non-destructive electromagnetic test for detecting discontinuities in steels”, *26º Congresso Internacional de Engenharia Mecânica – COBEM*, virtual, 2021.
- M. Rodrigues, E. de M. Silva, S. L. N. C. Costa, B. R. Araujo, S. E. N. Correia, C. R. M. Lima, “Análise do ruído magnético de Barkhausen por meio de Transformada Wavelet Discreta para detecção da fase deletéria sigma”, *XIV SEMETRO (Congresso Internacional de Metrologia Elétrica)*, virtual, 2021.
- M. Rodrigues, A. S. O. Sampaio, L. G. Lima, S. L. Carvalho, J. P. Leite, J. P. Silva, “Harmonic analysis of electromagnetic waves for detecting embrittlement microstructures in a duplex stainless steel”, *26º Congresso Internacional de Engenharia Mecânica – COBEM*, virtual, 2021.

## BIBLIOGRAFIA

ARAÚJO, M. S. **Influência de famílias wavelets e suas ordens no desempenho de um localizador de faltas em linhas aéreas de transmissão de energia elétrica.** 2011. 206 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2011.

BACK, J. A.; TEDESCO, L.; MOLZ, R. F. Aplicação Das Transformadas Wavelets Na Análise Da Qualidade Da Energia Elétrica Em Processos Industriais. **Revista do depto. de Química e Física, do depto. de Engenharia, Arquitetura e Ciências Agrárias e do Mestrado em Tecnologia Ambiental**, Santa Cruz do Sul, v. 20, n. 1, p. 39, 2015.

BARRETO, J. H. B. **Ensaio eletromagnético para acompanhamento da fragilização a 475 °C em aços inoxidáveis duplex**, 79 f. Dissertação de mestrado. Instituto Federal da Paraíba - IFPB, 2016.

BARROS NETO, I. P. **Análise do ruído magnético de Barkhausen por meio da transformaa wavelet discreta para detecção de microestrutura fragilizante em aço.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba (IFPB) – João Pessoa, Paraíba, 2021.

BLAŽEK, D. et al. Extraction of Barkhausen noise from the measured raw signal in high-frequency regimes. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 94, p. 456–463, 2016.

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

CORREIA, S. E. N. *et al.* Detecção automática de patologias laríngeas usando a transformada wavelet discreta. **Sociedade Brasileira de Inteligência Computacional**, Pernambuco, 2013.

CULLITY, B.D. **Introduction to Magnetic Materials**. Wiley-IEEE Press. USA. 2009.

DE QUEIROZ, S.L.A. **Wavelet transforms in a critical interface model for Barkhausen noise**. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, v. 77, n. 2, p. 1–9, 2008.

FARIAS, A. R. **Caracterização do ruído magnético Barkhausen em materiais estruturais utilizando Transformada Wavelet**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, minerais e materiais) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – Belo Horizonte, Minas Gerais, 2005.

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

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

GRIJALBA, F. A. F. **Desenvolvimento de ensaio não destrutivo baseado no ruído magnético de Barkhausen para caracterização de tensões elásticas e deformações plásticas em aços**. 163 f. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, 2010.

JUNKERSFELD, Klaus. **Análisis del ruido magnético de Barkhausen**. Disponível em: <<https://test-systems.es/noticias/analisis-del-ruido-magnetico-de-barkhausen/>>. Acesso em: 25 jan. 2021.

KTENA, A. et al. Barkhausen noise as a microstructure characterization tool. **Physica B: Condensed Matter**, v. 435, p. 109–112, 2014.

LIMA, C. R. M. **Estudo do uso da taxa de cruzamento por zero, RMS e energia segmental para detecção da presença da fase sigma em um aço inoxidável duplex.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba (IFPB) – João Pessoa, Paraíba, 2019.

LINDGREN, M.; LEPISTÖ, T. On the stress vs. Barkhausen noise relation in a duplex stainless steel. **NDT and E International**, v. 37, n. 5, p. 403–410, 2004.

LIPPOLD, J.C.; KOTECKI, D.J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel.** John Willey & Sons, Inc., 2005. 376 p.

MAASS, P. et al. Detection and classification of material attributes – a practical application of wavelet analysis, **IEEE Transactions on Signal Processing**, vol. 48, n. 8, p. 2432–2438, August 2000.

MADAN, R. *et al.* Signal Filtering Using Discrete Wavelet Transform. **International Journal of Recent Trends in Engineering**, v. 2, p. 96-98, nov. 2009.

MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: the Wavelet representation, Pattern Analysis and Machine Intelligence, **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 11, n. 7, p. 674–693, 1989.

MATHWORKS. **Documentation for MathWorks Products, Release 14 with service pack 2**, Disponível em: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/helpdesk.html>. Acesso em: 25 fev. 2021.

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

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

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

P. Wang, L. Zhu, Q. Zhu, X. Ji, H. Wang, G. Tian, and E. Yao, “An application of back propagation neural network for the steel stress detection based on Barkhausen noise theory,” **NDT E Int.**, vol. 55, pp. 9–14, 2013.

PARDAL, J.M., **Efeitos dos Tratamentos Térmicos nas Propriedades Mecânicas, Magnéticas e na Resistência à Corrosão de Aços Inoxidáveis Superduplex**, Tese de D.Sc., p. 440, Depto. Eng. Mecânica/UFF, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

PENHA, R. M. L. Análise de Sinais em regime Transiente Aplicando a técnica de Wavelet. 1999. 95 p. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1999.

PRAXEDES, T.O. **Sistema experimental para realização de ensaios não destrutivos magnéticos e sua aplicação na avaliação da degradação microestrutural do aço A516 grau 60**. 162 p. Tese de mestrado. Universidade Federal do Ceará - UFC, 2012.

QIU, F. *et al.* Correlation of magnetic field and stress-induced magnetic domain reorientation with Barkhausen Noise. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, V. 523, p. 3-10, abr. 2021.

ROCÍO, N. A. M. et al. Magnetic Barkhausen noise and magneto acoustic emission in stainless steel plates. **Procedia Materials Science**, v. 8, p. 674–682, 2015.

SANTIAGO, D. F. A. **Diagnóstico de falhas em máquinas rotativas utilizando Transformada de Wavelet e redes neurais artificiais**. 2004. 138p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

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

SHENG, Y. The Transforms and Applications **Handbook**: Second Edition. Ed. Alexander D. Poularikas, 2000.

SILVA, E.M.S. et al. Evaluation of the magnetic permeability for the microstructural characterization of a duplex stainless steel. **Journal of Testing Evaluation**. n. 44, p 1106-1111, 2016.

SILVA, F. E. M. **Desenvolvimento de um ensaio eletromagnético através de medidas de permeabilidades e simulações pelo Método dos Elementos Finitos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB, João Pessoa, 2019.

SILVA, E. M. *et al.* Análise do ruído magnético de Barkhausen por meio da transformada wavelet discreta para detecção de microestrutura fragilizante em um aço. **SbrT 2020**, Florianópolis, novembro. 2020.

TAVARES, S. S. ; DA SILVA, M. ; NETO, J. Magnetic property changes during embrittlement of a duplex stainless steel. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 313, n. 1–2, p. 168–173, 2000.

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

VARELA, A.C.G. **Estudo da fragilização do aço inoxidável duplex – UNS S31803 – em temperaturas variando de 425 a 525°C, através de medidas da velocidade do som.** 2007. 91 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, PB, Brasil. 2007.

VIEGAS, I. L. **Estudo do uso de onda emissora senoidal para geração do ruído de Barkhausen com amostras circulares de diferentes espessuras.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba (IFPB) – João Pessoa, Paraíba, 2019.

WANG, P. et al. Stratified analysis of the magnetic Barkhausen noise signal based on wavelet decomposition and back propagation neural network. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 201, p. 421–427, 2013.

YAMAZAKI, T.; FURUYA, Y.; NAKAO, W. Experimental evaluation of domain wall dynamics by Barkhausen noise analysis in Fe<sub>30</sub>Co<sub>70</sub> magnetostrictive alloy wire. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 475, n. April 2018, p. 240–248, 2019.