



Suelen Lima de Carvalho Alencar

**Estudo da Aplicação da Transformada Wavelet Discreta
para Análise do Ruído Magnético de Barkhausen
Utilizando Sensor de Efeito Hall**

João Pessoa - PB

Setembro de 2023



Suelen Lima de Carvalho Alencar

Estudo da Aplicação da Transformada Wavelet Discreta para Análise do Ruído Magnético de Barkhausen Utilizando Sensor de Efeito Hall

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, Doutor

Orientador

Suzete Élide Nóbrega Correia, Doutora

Coorientadora

João Pessoa – PB, Setembro de 2023

©Suelen Lima de Carvalho Alencar – suelen.alencar@outlook.com.br

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

A368e

Alencar, Suelen Lima de Carvalho.

Estudo da aplicação da transformada Wavelet discreta para análise do ruído magnético de Barkhausen utilizando sensor de efeito hall / Suelen Lima de Carvalho Alencar. – 2023.

66 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba – IFPB / Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Edgard de Macedo Silva, Doutor,

1. Ensaio eletromagnético. 2. Ruído magnético de Barkhausen.
3. Transformada Wavelet discreta. I. Título.

CDU 537.8:621.391

Estudo da Aplicação da Transformada Wavelet Discreta para Análise do Ruído Magnético de Barkhausen Utilizando Sensor de Efeito Hall

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 15/09/2023.

BANCA EXAMINADORA



Edgard de Macedo Silva, Prof. Dr., IFPB

Orientador

gov.br

Documento assinado digitalmente

Suzete Elida Nobrega Correia

Data: 28/11/2023 18:22:21-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Suzete Elida Nóbrega Correia, Prof.^a Dr.^a, IFPB

Coorientadora

gov.br

Documento assinado digitalmente

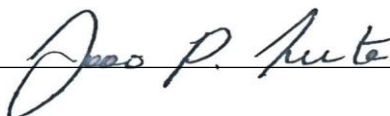
ALFREDO GOMES NETO

Data: 27/11/2023 19:56:40-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Alfredo Gomes Neto, Prof. Dr., IFPB

Examinador Interno



Examinador Externo

João Pessoa – PB

Setembro de 2023

Dedico este trabalho à Jesus Cristo, o meu melhor amigo.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus, Autor da minha história, que proveu a mim vida, saúde, força, disposição e capacidade cognitiva para realizar os projetos que Ele sonhou para mim. Reconheço que nada disso teria sido possível se Ele não estivesse comigo, em todas as minhas expedições.

Agradeço ao meu esposo, Hirlem, pelo apoio em toda jornada, incentivo todos os dias e compreensão quando precisei ser ausente. Sua alegria, bom humor e companheirismo trouxeram a paz e a leveza, que foram essenciais para concretização deste sonho.

Agradeço aos meus pais, Silvano e Maria José, pelos ensinamentos, amor e dedicação que têm a mim. Ao meu pai, que sempre abraçou os meus sonhos e nunca permitiu que eu duvidasse da minha própria capacidade. À minha mãe, que é o meu maior exemplo de força, superação e disciplina, uma mulher e uma profissional em quem me inspiro todos os dias.

Agradeço à minha irmã, Cíntia Maria, pela amizade e cumplicidade de toda uma vida. Sua companhia nesta caminhada fez total diferença.

Agradeço aos meus orientadores, os professores Edgard e Suzete, pelas contribuições, aprendizados, paciência e dedicação que tiveram neste trabalho. Aprendi muito durante todo o percurso, não só por seus conhecimentos técnicos, mas com suas experiências de vida.

Agradeço também aos professores Alfredo e João Leite, participantes da banca examinadora desta pesquisa, pelas considerações enriquecedoras.

Por fim, agradeço ao IFPB e todos os meus professores, colegas de curso, servidores e funcionários desta instituição que me acolheram desde a graduação até aqui.

RESUMO

Os materiais em que ocorrem a formação de novos constituintes prejudiciais às suas propriedades, sejam mecânicas ou de resistência à corrosão, têm sido estudados através de ensaios eletromagnéticos não destrutivos. O Ruído Magnético de Barkhausen é muito utilizado na literatura para essas aplicações e é comumente obtido através de um dispositivo de magnetização, composto por uma bobina emissora e uma receptora. Nesta pesquisa, a captação dos sinais do Ruído Magnético de Barkhausen foi realizada em uma configuração distinta, em que se substitui a bobina receptora por um sensor de efeito Hall, além de estudar a aplicação da Transformada Wavelet Discreta para análise desses sinais, a fim de acompanhar a formação do constituinte sigma em um aço inoxidável duplex SAF 2205, com espessura de 8 mm. As ondas emisoras estudadas foram senoidais, com frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz e amplitudes de 1 V; 1,25 V; 1,5 V; 1,75 V e 2 V, para amostras com e sem a presença de fase sigma. As famílias Daubechies, Symlets, Coiflets, Biorthogonal, foram analisadas e, como critério de escolha, foi fixado a maior diferença em porcentagem entre as condições com e sem acima de 10 %. Após o experimento, observou-se que as wavelets db5 e bio 3.9 apresentaram maior diferença em porcentagem entre as condições com e sem o constituinte sigma e um nível de decomposição já são suficientes para diferenciar a presença de fase sigma.

ABSTRACT

Materials in which new constituents are formed that are harmful to their properties, whether mechanical or corrosion resistance, have been studied through non-destructive electromagnetic tests. The Barkhausen Magnetic Noise is widely used in the literature for these applications and is commonly obtained through a magnetization device, composed of an emitter and a receiver coil. In this research, the capture of Barkhausen Magnetic Noise signals was carried out in a different configuration, in which the receiving coil is replaced by a Hall effect sensor, in addition to studying the application of the Discrete Wavelet Transform for the analysis of these signals, in order to follow the formation of the sigma constituent in a duplex stainless steel SAF 2205, with a thickness of 8 mm. The emitting waves studied were sinusoidal, with frequencies of 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20, 25 Hz and 50 Hz and amplitudes of 1 V; 1.25V; 1.5V; 1.75 V and 2 V, for samples with and without the presence of sigma phase. The Daubechies, Symlets, Coiflets, Biorthogonal families were analyzed and, as a selection criterion, the greatest difference in percentage between the conditions with and without above 10% was fixed. After the experiment, it was observed that the db5 and bio 3.9 wavelets showed a greater difference in percentage between the conditions with and without the sigma constituent and two levels of decomposition are already enough to differentiate the presence of sigma phase.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Representação esquemática da região da curva de histerese onde o ruído magnético de Barkhausen é medido	15
Figura 2	Diagrama esquemático de um sistema de medição do Ruído Magnético de Barkhausen através da técnica de superfície	17
Figura 3	Curvas de temperatura x tempo x transformação de fases precipitadas em aço inoxidável	19
Figura 4	Variação de tenacidade e dureza com % σ	19
Figura 5	Microscopia óptica da fase sigma com ataque KOH 10%. Aço inoxidável duplex tratado na temperatura de 800 °C por 30 min	21
Figura 6	Exemplos de famílias wavelets: (a) Haar; (b) Daubechies; (c) Coiflet; (d) Symmlet	23
Figura 7	Processo de decomposição de um sinal em análise de multiresolução	25
Figura 8	Wavelets da família Daubechies	26
Figura 9	Cossenos com frequências de 5 Hz e 200 Hz.	27
Figura 10	Cossenos com frequências de 5 Hz, 20 Hz e 50 Hz	28
Figura 11	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)	32
Figura 12	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	33
Figura 13	Módulo da diferença do RMS em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras, para todas as frequências	34
Figura 14	Configuração experimental: (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (3) bobina emissora, (4) amostra, (5) sensor de efeito Hall, (6) bancada de testes com gaiola de Faraday, (7) placa de aquisição e (8) computador.	39

Figura 15	Equipamento de ensaio: (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (3) bobina emissora, (4) amostra, (5) sensor de efeito Hall, (6) bancada de testes com gaiola de Faraday, (7) placa de aquisição e (8) computador	40
Figura 16	Família db5	43
Figura 17	Família bio3.9	
Figura 18	Esquema dos ensaios eletromagnéticos a ser aplicado para acompanhamento da fase prejudicial sigma	43
Figura 19	Aplicação da família db10 em uma faixa de amplitude entre 1 V à 2 V para frequência de 10 Hz, entre as condições com e sem precipitado, para ensaio utilizando sensor Hall	47
Figura 20	Aplicação da família db10 em uma faixa de amplitude entre 1 V à 2 V para frequência de 15 Hz, entre as condições com e sem precipitado, para ensaio utilizando sensor Hall	48
Figura 21	Aplicação da família db10 em uma faixa de amplitude entre 1 V à 2 V para frequência de 20 Hz, entre as condições com e sem precipitado, para ensaio utilizando sensor Hall	49
Figura 22	Aplicação da família db10 em uma faixa de amplitude entre 1 V à 2 V para frequência de 25 Hz, entre as condições com e sem precipitado, para ensaio utilizando sensor Hall	49
Figura 23	Aplicação da família db10 em uma faixa de amplitude entre 1 V à 2 V para frequência de 50 Hz, entre as condições com e sem precipitado, para ensaio utilizando sensor Hall	50
Figura 24	Variação em porcentagem entre as condições com e sem a fase sigma, em função dos tipos de wavelets Daubechies	52
Figura 25	Variação em porcentagem entre as condições com e sem a fase sigma, em função das wavelets do tipo Symlets	52

Figura 26	Varição em porcentagem entre as condições com e sem a fase sigma, em função das wavelets do tipo Coiflets	53
Figura 27	Varição em porcentagem em as condições com e sem a fase sigma, em função dos tipos de wavelets Biorthogonal	53
Figura 28	Aplicação da wavelet db5 no sinal de onda senoidal de 5 Hz e amplitude de 1,5 V para a condição com precipitado	54
Figura 29	Aplicação da wavelet bio 3.9 no sinal de onda senoidal de 5 Hz e amplitude de 1,5 V para a condição com precipitado	55
Figura 30	Aplicação da wavelet db5 no sinal de onda senoidal de 5 Hz e amplitude de 1,5 V para a condição sem precipitado	55
Figura 31	Aplicação da wavelet db5 no sinal de onda senoidal de 5 Hz e amplitude de 1,5 V para a condição com precipitado	56
Figura 32	Varição do RMS em função da frequência para aplicação da família Bio 3.9 para amostras com e sem a presença de precipitado	57
Figura 33	Varição do RMS em função da frequência para aplicação da família db5 para amostras com e sem a presença de precipitado	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição do AID SAF 2205, como recebido, em percentual de peso	38
Tabela 2	Resumo dos parâmetros e etapas da metodologia	44
Tabela 3	Diferença entre RMS para as condições com e sem a presença de fase sigma para aplicação da Transformada Wavelet em ensaio com sensor Hall	51
Tabela 4	Diferença entre RMS para as condições com e sem a presença de fase sigma para aplicação da Transformada Wavelet em ensaio com sensor Hall, aplicando as famílias db5 e bio 3.9	59

LISTA DE SIGLAS

AID	Aços Inoxidáveis Duplex
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
FFT	Fast Fourier Transform
GSCMat	Grupo de Simulação de Comportamento dos Materiais
RMB	Ruído Magnético de Barkhausen
TTP	Temperatura, Tempo e Precipitação
TWC	Transformada Wavelet Contínua
TWD	Transformada Wavelet Discreta
SAF	Sandvik Austenitic Ferritic
α'	Alfa linha
γ	Austenita
δ	Ferrita
σ	Sigma

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVO GERAL	13
1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN	15
2.2. SISTEMA DE MEDIÇÃO DO RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN	16
2.3. AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX (AID)	18
2.4. TRANSFORMADA WAVELET	21
2.4.1. TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA	22
2.4.2. TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA	24
2.5. ESTADO DA ARTE	28
2.5.1. ESTADO DA ARTE SOBRE A APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA WAVELET EM CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1. MATERIAIS	38
3.2. BANCADA EXPERIMENTAL DE TESTE	39

3.3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	41
3.3.1. DEFINIÇÃO DOS ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS PARA ACOMPANHAMENTO DA FASE SIGMA	41
3.3.2. ENSAIO ELETROMAGNÉTICO	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1. COMPARAÇÃO ENTRE A BANCADA COM BOBINA RECEPTORA COM A DO SENSOR DE EFEITO HALL	46
4.2. DETERMINAÇÃO DA MELHOR FAMÍLIA PARA SE TRABALHAR COM O SENSOR DE EFEITO HALL	51
4.3. COMPARAÇÃO ENTRE A APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA EM UM ENSAIO COM SENSOR HALL E APLICAÇÃO DE CORTE DE FREQUÊNCIA	56
5. CONCLUSÃO	60
5.1. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	61
5.2. TRABALHOS PUBLICADOS	61
REFERÊNCIAS	62

1. INTRODUÇÃO

Os ensaios eletromagnéticos vêm sendo aplicados em estudos de materiais onde ocorrem formação de novos constituintes que são prejudiciais às suas propriedades, seja de tenacidade ou resistência à corrosão, pois uma vez que a microestrutura do material é alterada, a permeabilidade magnética também é modificada. Essa mudança resulta em variações no fluxo magnético do material, o que permite assim, ser feito o acompanhamento da formação de novos constituintes. Esses ensaios têm sido empregados no setor de petróleo e gás, a fim de determinar o melhor momento de intervir em estruturas e evitar acidentes que possam causar dano à vida humana ou até mesmo perdas econômicas (SILVA, 2016a; SAMIMI, 2016; KAHROBAEE, 2017; MEHTA, 2019; DONG, 2021; NESLUSAN, 2021; FREITAS, 2022).

Dentre os ensaios eletromagnéticos, destaca-se os ensaios baseados na medição do Ruído Magnético de Barkhausen (RMB), ruído pelo qual extrai-se informações sobre a formação de novos constituintes prejudiciais. O RMB é coletado a partir de uma intensidade de fluxo magnético gerado por meio de uma bobina emissora, que causa um movimento das paredes do domínio magnético, as quais interagem com a microestrutura do material. O ruído gerado a partir dessa movimentação é captado através da bobina receptora. O RMB é utilizado para levantamento de parâmetros para acompanhamento da formação de novos constituintes prejudiciais. No entanto, esse tipo de ensaio eletromagnético não possui padronização, no tocante às diferentes configurações de bobinas emissora e receptora, como também intensidade de sinais harmônicos (SAMIMI, 2016; DONG, 2021; NESLUSAN, 2021).

Sensores de efeito Hall têm sido aplicados em ensaios eletromagnéticos, tanto na região de reversibilidade, quanto de irreversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos. Esses sensores possuem como vantagem a simplicidade de medição e de posicionamento da amostra, podendo ser posicionados na mesma superfície da bobina emissora e na oposta, o que facilita o estudo de um maior volume de material como, por exemplo, o caso de juntas soldadas (SILVA, 2016a; SILVA, 2016b; LINS, 2020).

O ruído magnético de Barkhausen pode ser extraído dos sinais das bobinas receptoras pela passagem para o domínio da frequência e aplicações de filtros passa-altas. Contudo, a Transformada Wavelet Discreta (TWD) vem sendo utilizada para análise do RMB, por permitir uma análise multiresolução de sinais. Waveletes da família Daubechies 5 e 10 mostram serem eficazes de analisar sinais captados por bobinas receptoras (WANG, 2013).

Barros Neto (2021) em sua pesquisa, utilizou a Transformada Wavelet Discreta como ferramenta para análise do Ruído Magnético de Barkhausen e observou que as famílias db5 e db10 apresentaram um melhor resultado. Rodrigues (2022) aplicou essas mesmas famílias em uma configuração de ensaio com a bobina receptora, que são tradicionalmente utilizadas.

No presente trabalho, a Transformada Wavelet Discreta será aplicada em uma configuração de ensaio, onde têm-se a substituição da bobina receptora pelo sensor de efeito Hall. Espera-se que essa nova abordagem traga melhorias nos resultados com relação a presença do sensor Hall. O ensaio eletromagnético será testado em um Aço Inoxidável Duplex (AID), com presença de apenas 4% de fase prejudicial, denominada fase sigma, a qual é suficiente para comprometer as propriedades de tenacidade e resistência à corrosão (SILVA, 2016b).

1.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a aplicação da Transformada Wavelet Discreta na análise do Ruído Magnético de Barkhausen, em um ensaio eletromagnético, empregando um sensor de efeito Hall para substituir a bobina receptora.

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a aplicação da Transformada Wavelet Discreta na análise do Ruído Magnético de Barkhausen, na melhor região de onda senoidal, para acompanhamento da formação do constituinte sigma, em um aço inoxidável duplex SAF 2205, com espessura de 8 mm.
- Comparar os resultados dos ensaios com o uso do sensor Hall e bobina receptora realizados no mesmo material.
- Determinar a melhor família a ser aplicada na configuração com o sensor de efeito Hall.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho de dissertação de mestrado traz no Capítulo 1 uma introdução geral sobre assunto tratado, onde aponta as motivações e justificativas desta pesquisa. Explana os

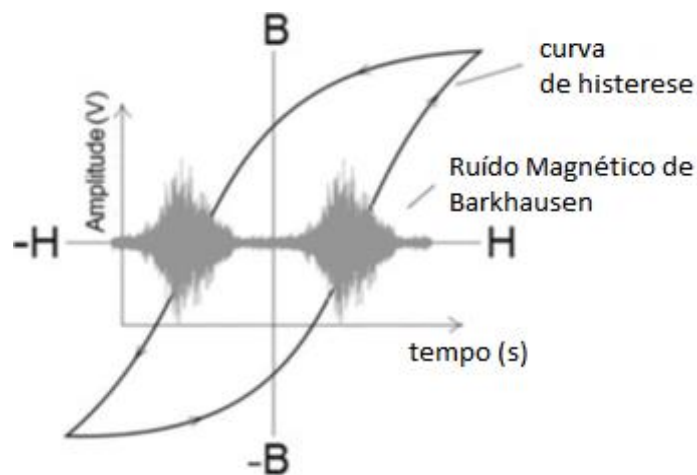
objetivos, geral e específicos. No Capítulo 2, é abordada uma breve referência teórica ao qual apoia-se a elaboração deste estudo, trazendo informações sobre o Ruído Magnético de Barkhausen, seu sistema de medição, o Aço Inoxidável Duplex e Transformada Wavelet Contínua e Discreta, onde esta última serve como ferramenta a ser empregada neste trabalho. No Capítulo 3, explica-se os métodos a serem adotados e, em seguida, no Capítulo 4, os resultados e discussões obtidas são apresentados. No Capítulo 5, encontram-se as conclusões assim como sugestões de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN

Em 1919, Heinrich Barkhausen observou que quando os materiais ferromagnéticos se submetiam a um campo magnético externo, ocorria o movimento das paredes dos domínios magnéticos. Esse fenômeno ocasionava saltos de indução discretos que produziam pulsos magnéticos, denominados Ruído Magnético de Barkhausen, RMB. A Figura 1 ilustra a região de uma curva de histerese, onde ocorre o RMB, ou seja, na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos (TAVARES et al., 2019). O ciclo de histerese é apresentado, bem como o ruído e sua amplitude, ao longo do tempo.

Figura 1 - Representação esquemática da região da curva de histerese onde o ruído magnético de Barkhausen é medido.



Fonte: Tavares (2019)

O Ruído Magnético de Barkhausen se dá pelo movimento descontínuo das paredes dos domínios magnéticos e através dele pode-se aferir informações relevantes a respeito das microestruturas de materiais ferromagnéticos, como os teores de carbono, suas fases, precipitados, contornos de grãos, entre outros parâmetros. A análise do RMB para

desenvolvimento do ensaio eletromagnético não-destrutivo, ainda é considerada uma técnica relativamente nova (He et al., 2018).

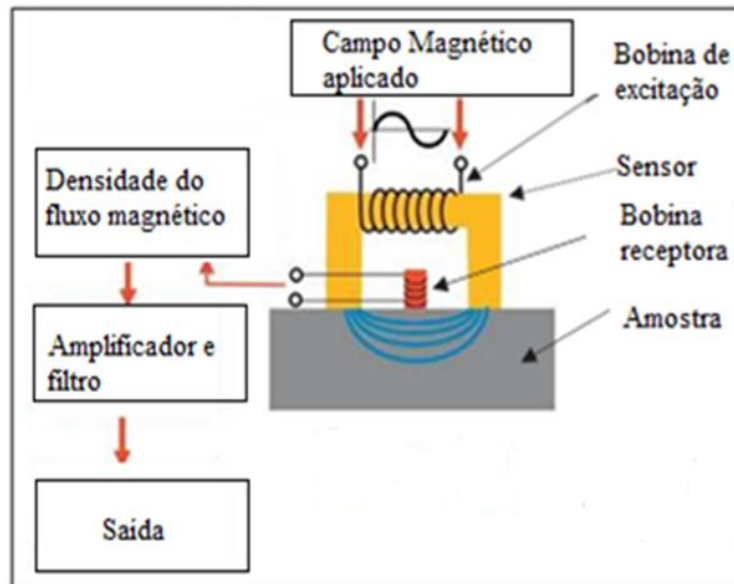
Segundo Ducharme et al. (2018) os materiais ferromagnéticos, cujo processo de magnetização dá origem ao Ruído Magnético de Barkhausen, são divididos em regiões denominadas domínios magnéticos. Cada região possui sua própria direção e orientação de magnetização. Contudo, ao ser exposto a uma intensidade de campo magnético (H) externo, as suas paredes se movimentam. A movimentação das paredes dos domínios magnéticos é descontínua e provoca saltos quando tentam vencer aos obstáculos microestruturais, como discordâncias, precipitados, contornos de grãos, entre outros. Este ruído é extraído na forma de tensão, uma vez que, enquanto as paredes são deslocadas, são gerados saltos magnéticos que são relacionados aos picos de tensão. A análise desse ruído é utilizada para gerar parâmetros que venham caracterizar, classificar e identificar amostras de materiais ferromagnéticos (CARVALHO FILHO, 2018).

2.2. SISTEMA DE MEDIÇÃO DO RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN

O ruído magnético de Barkhausen é obtido através de um dispositivo de magnetização, que é composto por uma bobina emissora e uma bobina receptora. A primeira emite a onda que irá interagir com o material a ser analisado, enquanto a segunda detecta a onda da interação que traz informação das transformações na forma de ruído. Dentre as técnicas mais utilizadas para obtenção do RMB, destaca-se a técnica de superfície, em que a bobina receptora é posicionada na mesma superfície da amostra (HIZLI e GÜR, 2018; SERNA-GIRALDO, 2015; SAMIMI, 2016). Essa técnica pode ser observada no estudo de Hizli et al. (2018), como apresenta a Figura 2.

Nota-se, no esquema da Figura 2, que a bobina emissora, ao ser alimentada por uma corrente alternada, produz um campo magnético que provoca ciclos repetidos de magnetização do material ferromagnético. Este campo magnético é captado pela bobina receptora, localizado na superfície da amostra. O sinal do Ruído Magnético de Barkhausen é obtido quando passa pelo amplificador e pelo processo de filtragem (HIZLI e GÜR, 2018).

Figura 2 – Diagrama esquemático de um sistema de medição do Ruído Magnético de Barkhausen através da técnica de superfície



Fonte: Hizli e Gür (2018)

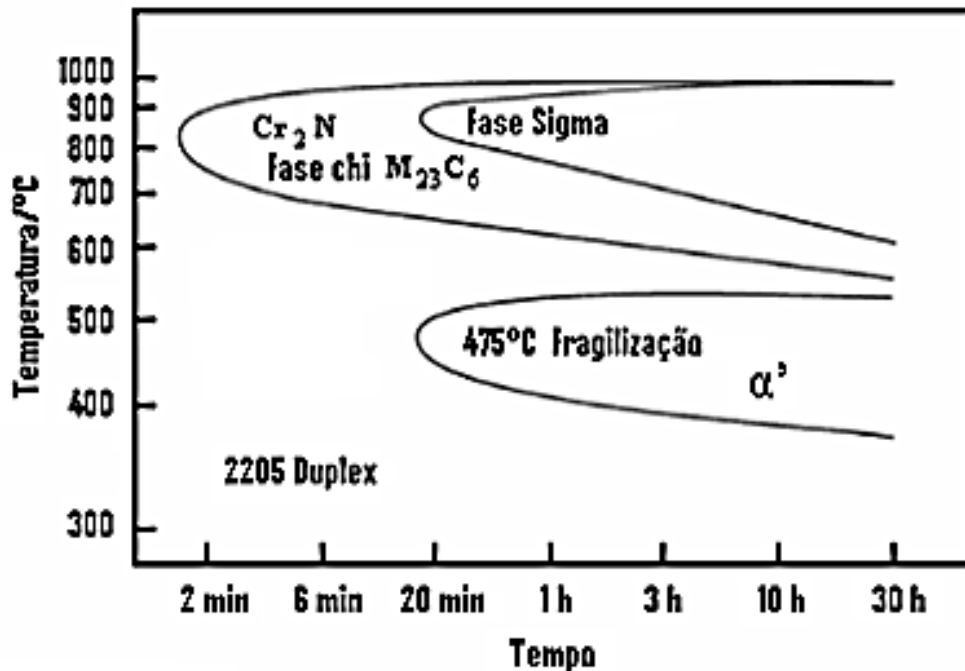
A posição da bobina receptora revela as diferentes formas para obtenção do sinal do Ruído Magnético de Barkhausen. No entanto, a técnica de superfície é ainda a mais usual dentre elas. Além da bobina receptora de superfície, tem-se a envolvente, em que a bobina receptora se apresenta envolta da amostra (KAHROBAEE et al., 2017; JARRAHI et al., 2015); a técnica envolvente dupla, experimento no qual utiliza-se duas bobinas receptoras envoltas da amostra (MOSES; PATEL; WILLIAMS, 2006); a configuração com bobina na superfície oposta, em que a bobina receptora se posiciona na superfície oposta da bobina (PAL'A; BYDŽOVSKÝ, 2014). Os sinais utilizados têm, como principais ondas, as ondas senoidais (OLIVEIRA, 2016, HE et al., 2022; TAVARES et al., 2019, DUCHARNE et al., 2021) e triangulares (HIZLI et al., 2018; LI et al., 2021), com frequências que variam de 1 Hz até 800 kHz e aplicação de filtros passa-altas e passa-banda (MOSES; PATEL; WILLIAMS, 2006, OLIVEIRA, 2016, HE et al., 2022; TAVARES et al., 2019, DUCHARNE et al., 2021).

2.3 AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX (AID)

O aço inoxidável duplex tem esse nome porque refere-se às duas fases que compõem sua microestrutura, sendo, 50% austenita (γ) e 50% ferrita (α). A fase austenita tem estrutura cúbica de face centrada (CFC) e forma como ilhas em uma matriz de ferrita com estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). As duas fases que estão presentes nos aços inoxidáveis duplex conferem tenacidade e resistência à corrosão. Por isso, esses materiais têm uma enorme aplicação na indústria química, petroquímica, nuclear e marinha. Entretanto, quando estes aços são expostos à altas temperaturas ficam sujeitos às precipitações de fases intermetálicas prejudiciais às suas propriedades (SEDRIKS, 1996 apud FIALHO, 2015).

Através das Curvas TTT (Temperatura, Tempo e Transformação) é possível identificar as fases presentes nos aços inoxidáveis duplex, que se formam ao longo do tempo e de distintas temperaturas, como mostra a Figura 3 (SEDRIKS, 1996 apud FIALHO, 2015). Pode-se verificar duas regiões distintas. Entre as temperaturas de 300° C a 600° C, está a fase α' , responsável pela fragilização denominada de 475 °C do aço. A partir dos 600° C, tem-se a formação do constituinte prejudicial sigma (SEDRIKS, 1996 apud FIALHO, 2015).

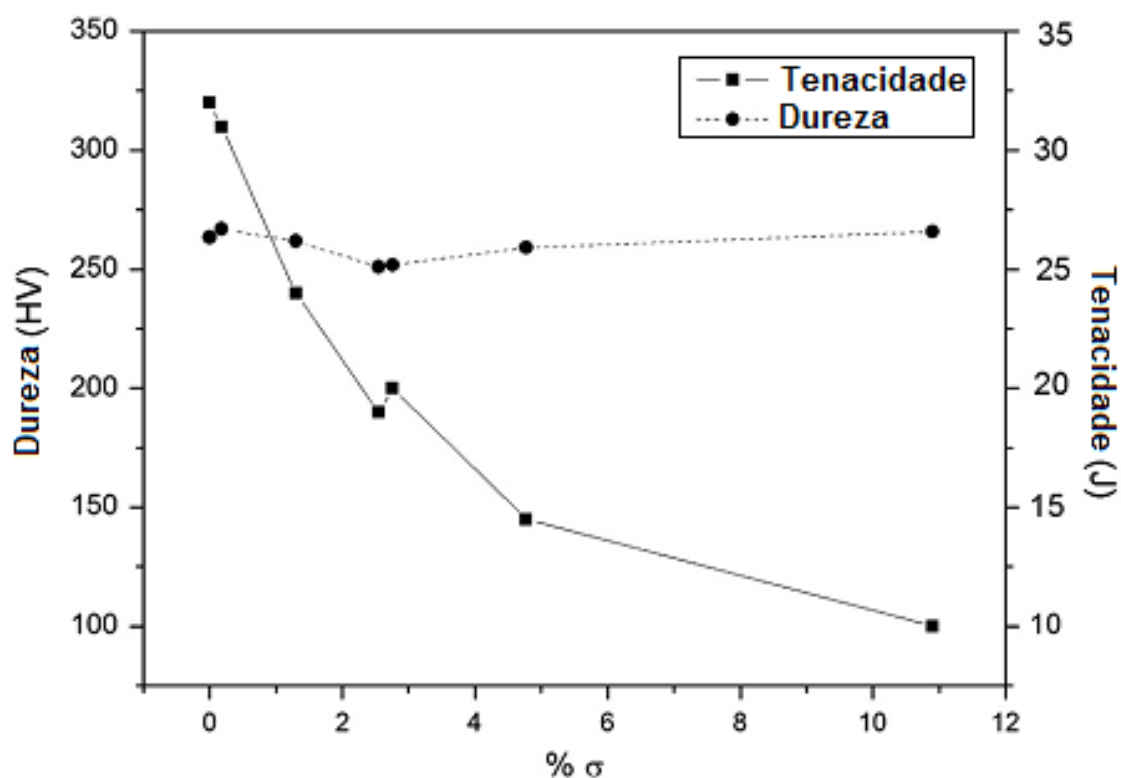
Figura 3- Curvas de temperatura x tempo x transformação de fases precipitadas em aço inoxidável



Fonte: SEDRIKS (1996), apud FIALHO (2015)

A Figura 4 apresenta a variação de dureza e energia absorvida em função da quantidade de fase sigma, para um aço inoxidável duplex. Pequenas quantidades de fase σ , como mostra a Figura 4, promovem uma diminuição considerável de capacidade de absorver energia, sem influência notável sobre a dureza, onde aproximadamente a precipitação de 4% em volume desta fase pode resultar em um decréscimo de aproximadamente 90% da tenacidade. A precipitação de 1,3 % de fase σ diminuiu a resistência ao impacto de 32 J para 24 J (TAVARES et al., 2010).

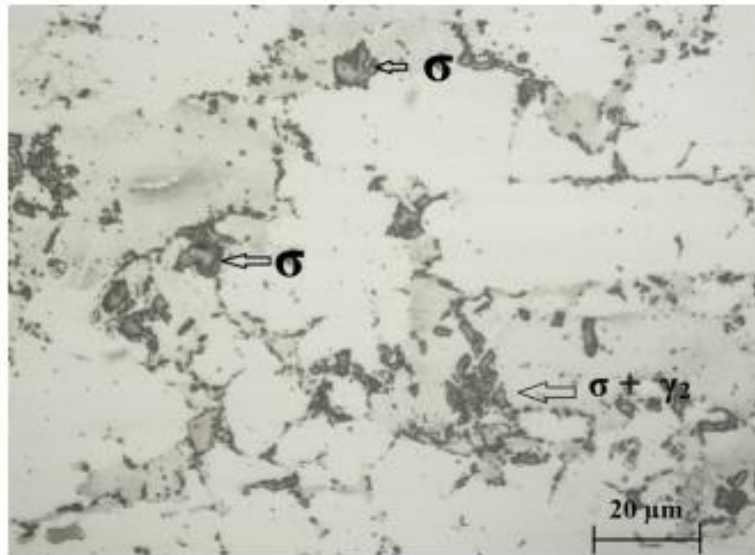
Figura 4 - Variação de tenacidade e dureza com % σ .



Fonte: TAVARES et al (2010)

A Figura 5 mostra a presença da fase sigma em um Aço Inoxidável Duplex. Esta microestrutura foi obtida com o reagente KOH, que revela preferencialmente o constituinte sigma, formada pela decomposição do constituinte ferrita, que é ferromagnética, e a formação de sigma e uma austenita secundária, que são paramagnéticas. Essa transformação reduz o ferromagnetismo do material e muda a permeabilidade magnética final (SILVA et al., 2016). Algumas partículas de sigmas estão indicadas com setas na Figura 5.

Figura 5 - Microscopia óptica da fase sigma com ataque KOH 10%. Aço inoxidável duplex tratado na temperatura de 800 °C por 30 min.



Fonte: Silva et al. (2016)

2.4 TRANSFORMADA WAVELET

Quando se trata de sinais de ondas eletromagnéticas, transformações matemáticas são necessárias para que as características relevantes ao estudo aplicado desses sinais, sejam extraídas e analisadas. Tais transformações possuem diversos modelos, sendo a Transformada de Fourier uma das mais populares. No entanto, a Transformada de Fourier torna-se limitada ao estudo de sinais, sob a perspectiva de que fornece apenas a representação em frequência do sinal analisado, sem a correspondência de onde ocorrem cada uma das frequências no tempo. Para contornar essa limitação a *Short Time Fourier Transform* (STFT) é utilizada aplicando-se uma janela de tamanho fixo ao longo do tempo, para análise do sinal no tempo e na frequência. Para cada aplicação da transformada, são obtidas as informações sobre aquela janela, de tamanho já pré-definido. Entretanto, com o tamanho fixo de janela, só é possível acessar a informação da energia média dentro daquela janela, isto é, as oscilações, o que impossibilita uma análise em resoluções distintas (SANTOS et al., 2013).

Uma ferramenta semelhante à STFT para análise de sinais é a Transformada Wavelet, instrumento em que se apoia esta pesquisa. A Transformada Wavelet se destaca da STFT, para determinadas aplicações, por decompor um sinal em diferentes escalas e níveis de resolução. A análise matemática através da Transformada Wavelet supre o que falta na STFT quando emprega funções de análise, denominadas Wavelets. Estas funções concentram-se em intervalos de tempo menores, quando se trata de componentes de alta frequência e intervalos maiores de tempo, para componentes de baixas frequências. Este comportamento melhora a análise dos sinais, uma vez que apresenta uma janela de forma automática que se ajusta proporcionalmente à resolução que se pretende trabalhar. A Transformada Wavelet pode apresentar-se de duas formas: a Transformada Wavelet Contínua (TWC) e a Transformada Wavelet Discreta (TWD) (SILVA et al., 2005).

2.4.1 TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA

A análise de sinais através das wavelets consiste no emprego de uma função protótipo chamada wavelet mãe que, quando deslocada, é multiplicada pelo sinal em análise. Esta função protótipo possui média zero e decai de maneira brusca e oscilatória. A Transformada Wavelet Contínua de uma função $f(t)$, cuja wavelet mãe é $\psi_{a,b}(t)$, é representada nas Equação 1. A Equação 2 mostra a obtenção das wavelets, a partir da wavelet mãe, em que a representa o fator escala e b representa o fator de translação (SILVA et al., 2005).

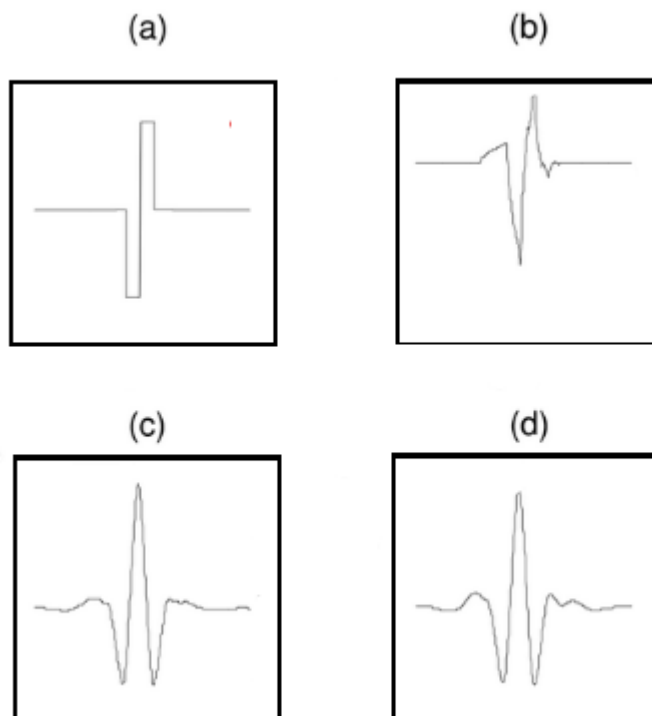
$$(TCW)(a, b) = \int f(t) \psi_{a,b}(t) dt \quad (1)$$

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

Na análise do sinal original pela transformada wavelet, o ideal é que a wavelet mãe assemelhe-se a ele o máximo possível, e os coeficientes que representam esse nível de semelhança são os $(TCW)(a, b)$. Deste modo, o somatório de todos os coeficientes

$(TCW)(a, b)$ representam a transformada wavelet do sinal original (REIS et al., 2004). Na transformada wavelet contínua, os parâmetros de escala e localização assumem valores contínuos. A Figura 6 mostra alguns exemplos de wavelets mãe, denominadas famílias (CASTILHO et al., 2012).

Figura 6 – Exemplos de famílias wavelets: (a) Haar; (b) Daubechies; (c) Coiflet; (d) Symmlet



Fonte: REIS et al. (2004)

Quando deseja-se reconstruir o sinal, realiza-se a inversa da transformada, que é definida pela Equação 3.

$$f(t) = \frac{1}{c_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} T(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{da db}{a^2} \quad (3)$$

em que C_ψ refere-se ao coeficiente de admissibilidade.

2.4.2 TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

A partir do momento em que se obtém a Transformada Wavelet Contínua pela dilatação e translação da wavelet mãe, é gerada informação que não é relevante. Visando superar essa limitação, a wavelet mãe é dilatada e transladada por escalas e posições específicas baseadas em potência de 2 (REIS et al., 2004). Esta é denominada de Transformada Wavelet Discreta (TWD) e será abordada nessa subsecção.

A técnica da Transformada Wavelet Discreta mostra-se bastante eficiente quanto a Transformada Wavelet Contínua. Formulada nos anos 80, a TWD amplia as aplicações de wavelets para várias áreas de estudo (ZANIOL, 2021) e é definida pela Equação 4:

$$TWD(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n f(x) \psi\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (4)$$

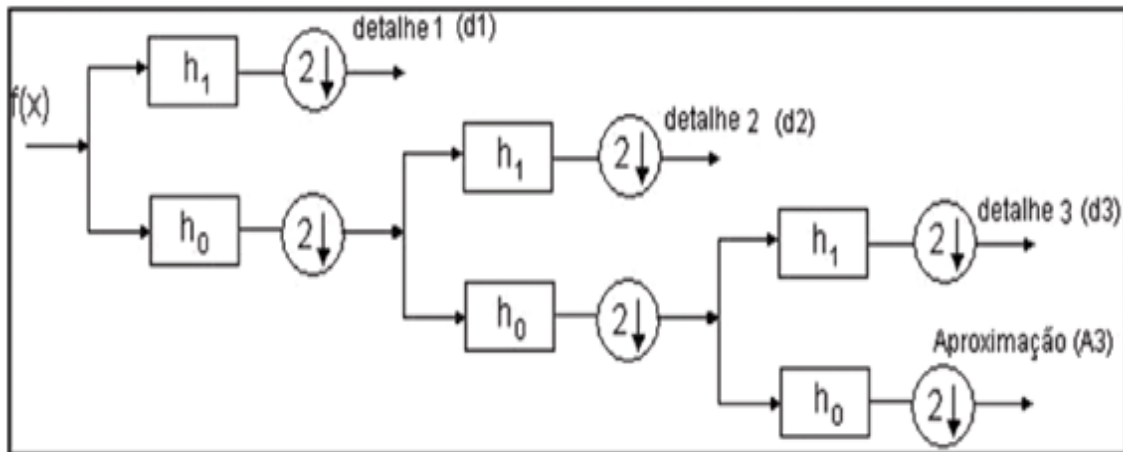
em que a e b são funções do parâmetro inteiro m , ou seja, $a = a_0^m$ e $b = nb_0 a_0^m$. O coeficiente k refere-se a uma variável inteira que diz respeito a uma amostra do sinal de entrada (REIS et al., 2004).

Em 1989, Mallat desenvolveu um método rápido e confiável de implementação da TWD chamado análise de multirresolução, que se baseia em um processo de obtenção de aproximações e detalhes de um determinado sinal. A aproximação possui baixa frequência e assemelha-se ao sinal original. Já os detalhes, representam a diferença entre duas aproximações sucessivas do mesmo sinal, fornecendo suas maiores frequências (REIS et al., 2004).

O processo de implementação da TWD se dá pela filtragem do sinal a ser estudado, através um banco de filtros passa-baixas e passa-altas, que gera versões de aproximação e detalhes do sinal original. Logo, o espectro do sinal é dividido em diferentes escalas de resolução e sub-bandas de frequência. Cada sub-banda é analisada a partir de perspectivas diferentes, uma vez que cada nível decomposto traz informações importantes de frequência e

tempo, a respeito do sinal original. Na Figura 7 tem-se uma ilustração de um processo de decomposição do sinal através da análise de multirresolução para três níveis de resolução (SILVA et al., 2005).

Figura 7 – Processo de decomposição de um sinal em análise de multirresolução



Fonte: SILVA et al. (2005)

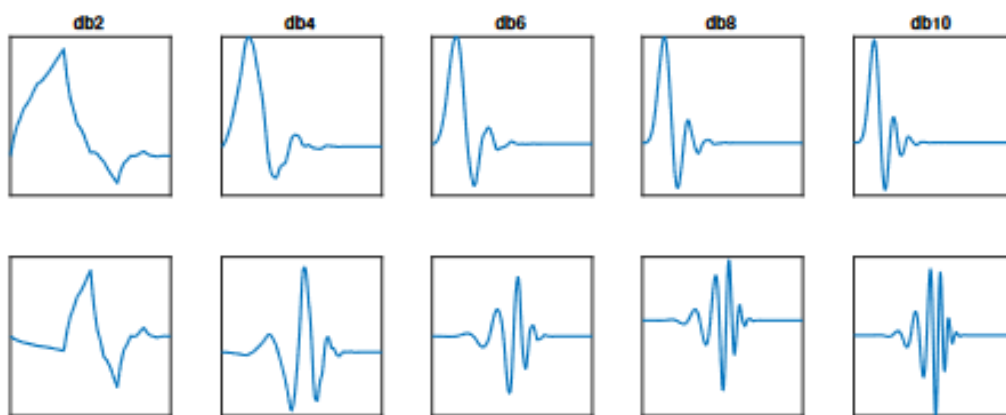
Na Figura 7, o $f(x)$ representa o sinal original em que foram obtidos os detalhes e aproximações através de um banco de filtros h_0 e h_1 , passa-baixas e passa-altas, respectivamente. Neste processo de decomposição, o filtro passa-baixas remove os componentes de alta frequência do sinal $f(x)$ e o filtro passa-altas separa as altas frequências (SILVA et al., 2005).

Para determinar a família wavelet em que a análise do sinal é realizada, se faz necessário observar a sua natureza e quais características deseja-se extrair. Sendo assim, não existe uma wavelet ideal para todos os sinais. É importante saber se a família escolhida é um instrumento eficaz para a aplicação da pesquisa, apoiando-se em experimentos e nas literaturas afins (ZANIOL, 2021).

A família wavelet denominada Daubechies foi desenvolvida por Ingrid Daubechies e possui suporte compacto, isto é, para o caso discreto, indica que possui um número finito de coeficientes de escala, N_k . As famílias Daubechies são representadas por db , seguido de um

numeral, que representa o número de coeficientes não nulos. Por exemplo, *db2* indica que existem quatro coeficientes não nulos que são responsáveis pela representação do sinal, uma vez que o número de coeficientes é determinado pela multiplicação de 2 pelo valor de N_k (ZANIOL et al., 2021). A Figura 8 ilustra as wavelets da família Daubechies, onde a primeira linha representa a função escala e a segunda representa a função wavelet para *db2*, *db4*, *db6*, *db8* e *db10* (ZANIOL, 2021).

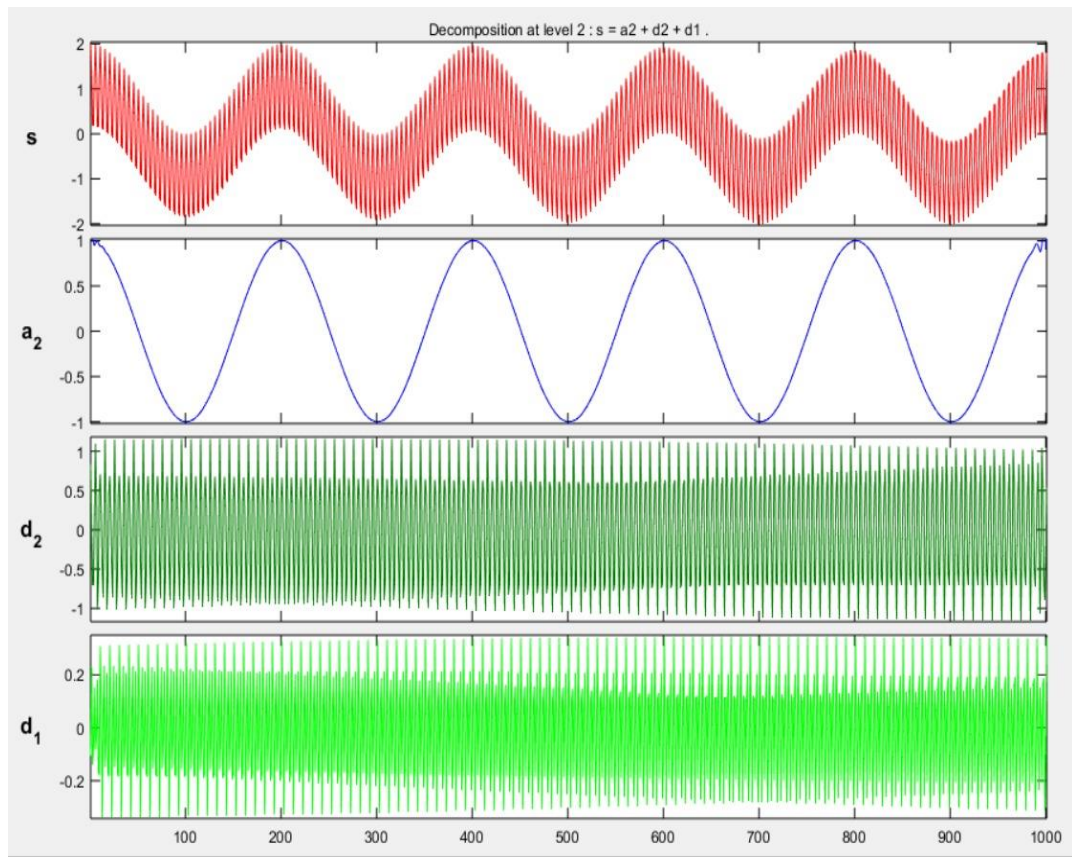
Figura 8 – Wavelets da família Daubechies



Fonte: Zaniol (2021)

As Figura 9 e 10 apresentam um exemplo da técnica de TWD aplicada a um sinal de cosseno em frequências distintas, onde na Figura 9 as frequências utilizadas foram de 5 Hz e 200 Hz e na Figura 10, as frequências foram de 5 Hz, 20 Hz e 50 Hz.

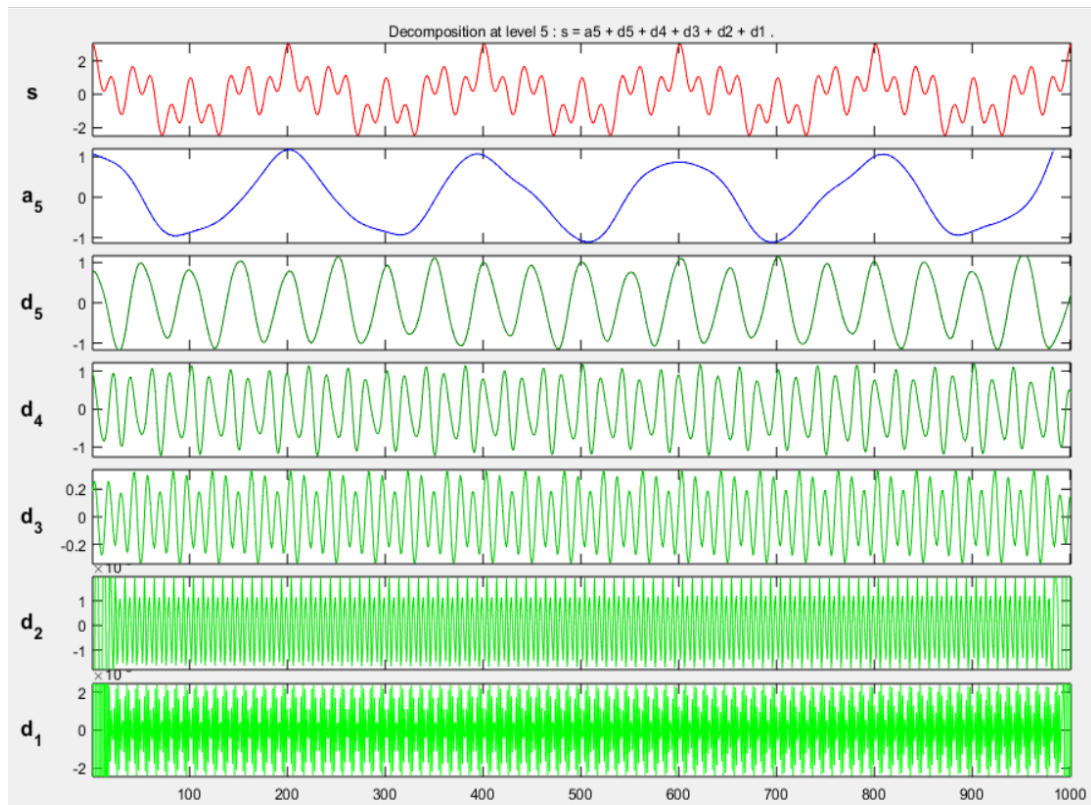
Figura 9 - Cossenos com frequências de 5 Hz e 200 Hz.



Fonte: própria (2023)

A Figura 9 apresenta um sinal de cossenos com 1000 pontos em 1 segundo, com as frequências de 5 Hz e 200 Hz. Foi aplicado a família db10 em 2 níveis de decomposição. No segundo nível de decomposição, tem-se o sinal filtrado, em que d_2 apresenta o detalhe onde encontra-se a frequência de 200 Hz filtrada e a_2 refere-se à aproximação em que se encontra a frequência de 5 Hz filtrada.

Figura 10 - Cossenos com frequências de 5 Hz, 20 Hz e 50 Hz



Fonte: própria (2022)

A Figura 10 apresenta outra aplicação em cossenos, desta vez com frequências de 5 Hz, 20 Hz e 50 Hz. O sinal foi decomposto em 5 níveis de decomposição, onde observa-se no último nível, d_5 e a_5 , o detalhe em que tem-se a frequência de 20 Hz filtrada e a aproximação com a frequência de 5 Hz filtrada, respectivamente.

2.5 ESTADO DA ARTE

Nesta subsecção estão reunidos alguns estudos recentes relacionado à análise do Ruído Magnético para acompanhamento de fases prejudiciais que fragilizam alguns materiais, cuja configuração, na maioria dos experimentos, se deu pelo uso da bobina receptora posicionada na mesma superfície da emissora. A análise do RMB mais comumente utilizada é realizada a partir da filtragem dos sinais em diferentes frequências. Também são apresentados aqui os

trabalhos que utilizam o sensor Hall no lugar da bobina receptora, na configuração do experimento do RMB, cuja análise se dá a partir da filtragem dos sinais no domínio da frequência. Outros estudos trazem a Transformada Wavelet Contínua para analisar o RMB coletados a partir do experimento clássico, no qual utiliza-se a bobina receptora.

Tavares et al. (2019) estudaram aços supermartensíticos, que é uma nova classe de aços inoxidáveis utilizados em tubos e peças forjadas no setor de petróleo e gás. As propriedades mecânicas finais do aço foram estudadas por tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. O efeito de fragilização de têmpera foi detectado pela inspeção magnética de Ruído Magnético Barkhausen (RMB). As amostras tratadas nas temperaturas de 620°C e 640°C foram resfriadas em água e em forno após o revenimento, e aqueles resfriados lentamente apresentaram menor tenacidade e maior fração volumétrica de austenita. Foi detectado, através do RMB, o efeito de fragilização. A análise foi realizada através de medidas de RMS e aplicação de ondas senoidais de frequência de 10 Hz e amplitude de 2,5 V.

Franco Grijalba et al. (2018) analisaram o perfil de tensão gerado em uma amostra de aço 1070 submetida a um teste de flexão de três pontos. A influência de diferentes parâmetros, como tipo de bobina de captação, velocidade de varredura, campo magnético aplicado e banda de frequência foram analisadas na eficácia da técnica investigada. Os resultados mostram que a técnica pode ser usada para detectar perfis de tensão aplicadas. As análises foram realizadas através de estudos dos espectrogramas dos sinais de frequências no domínio da frequência.

Serna-Giraldo et al. (2015) analisaram a variação da microestrutura em juntas soldadas de aço carbono foi monitorada pelo RMB. As amostras foram soldadas pelo processo de eletrodo revestido, no qual foram aplicadas tanto um passo quanto dois. A microdureza e a microestrutura também foram caracterizadas. O sinal RMB foi medido e analisado por meio de diversos parâmetros no domínio da frequência e do tempo. Além disso, mapas das superfícies de aço soldadas foram plotados. A variação dos parâmetros do RMB foi correlacionada com os de microdureza e microestrutura. Sendo assim, os resultados permitiram identificar uma zona afetada pelo calor (ZTA) da junta soldada usando os sinais RMB. A configuração com a bobina receptora do mesmo lado da receptora foi usada com ondas de frequência de 1 Hz e filtro passa banda de 1 a 100 kHz

Técnicas de Inspeção Não Destrutiva, baseadas no Ruído Magnético de Barkhausen (RMB), têm sido aplicadas para a detecção de regiões não homogêneas em chapas de aço

carbono. As regiões não homogêneas ou danificadas foram produzidas por deformações plásticas em chapas laminadas e recozidas dos aços SAE 1060 e 1070. A sensibilidade dos sinais RMB na detecção de deformações plásticas foi analisada variando parâmetros como a frequência do campo magnético de excitação e a velocidade de movimento da sonda. O comportamento da raiz quadrada média do parâmetro do sinal de Ruído Magnético de Barkhausen foi correlacionado com a posição das regiões não homogêneas detectadas nas amostras. Os resultados mostraram que em todos os casos estudados foi possível detectar a posição do dano, através da variação do campo magnético. Essas alterações são afetadas pela presença e distribuição de tensões elásticas (compressão e tração), deformação plástica e modificação da microestrutura. Nesta análise foi utilizada a configuração de bobina de superfície receptora do mesmo lado da emissora e ondas senoidais de 5 e 10 Hz e taxa de amostragem de 450 kHz (NORIS et al., 2019).

A viabilidade da técnica Ruído Magnético de Barkhausen é investigada por Li et al. (2021), na detecção de fadiga em estágio inicial, que está associada à deformação plástica em estruturas metálicas ferromagnéticas. Resultados experimentais demonstram que a técnica de RMB é uma candidata promissora para essa caracterização. Li usou a bobina receptora posicionada na mesma superfície da emissora e ondas senoidais. A frequência utilizada não foi citada, somente a aplicação de filtro passa banda de 1,5 kHz até 20 kHz.

2.5.1 ESTADO DA ARTE SOBRE A APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA WAVELET EM CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Wang et al. (2013) estudaram a aplicação da TWD da família Daubechies 5 (db5), variando em níveis de 1 a 6, a fim de identificar o efeito de tensões mecânicas compreensivas em um aço estrutural do tipo A3, por meio do Ruído Magnético de Barkhausen. O valor de RMS de cada sinal foi determinado após a aplicação da wavelet e observou-se que a db5 decomposta em seis níveis é capaz de detectar o efeito dessas tensões no material, sendo um resultado distinto para cada nível de detalhe.

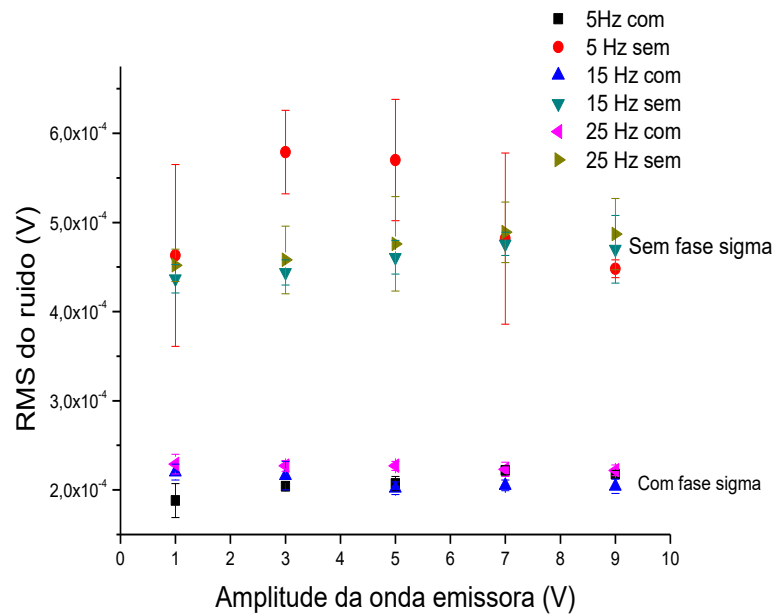
Queiroz (2008) aplicou a Transformada Wavelet Discreta utilizando as famílias Daubechies de ordem 4, 12 e 20, tendo como escolha para o estudo da pesquisa a db4, cujo objetivo foi avaliar através dela um modelo de interface conhecido por fornecer boas

características no que diz respeito às propriedades de materiais ferromagnéticos macios por meio do Ruído Magnético de Barkhausen. O estudo concluiu, a partir de uma análise individual e médias posicionais dos coeficientes wavelets, em contrapartida à análise dos espectros de potência de Fourier anteriormente estudados, que com relação ao RMB obteve-se uma análise positiva em amostras da liga amorfa $\text{Fe}_{21}\text{Co}_{64}\text{B}_{15}$.

Rodrigues (2022) avaliou a aplicabilidade da TWD no RMB para detecção da fase sigma no AID SAF 2205. Foram utilizadas as famílias db1, db5 e db10 e frequências de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz. Foi mostrado que as famílias db5 e db10, com um nível de decomposição, apresentaram bons resultados independentes das amplitudes estudadas de 1 V, 3 V, 5 V, 7 V e 9 V, para as frequências de 5 Hz e 25 Hz, sendo que a aplicação de 50 Hz foi até 5 V. Contudo, ao aplicar dois níveis de decomposição os melhores resultados foram para a frequência de 25 Hz, independente da amplitude estudada e até 5 V para a frequência de 50 Hz.

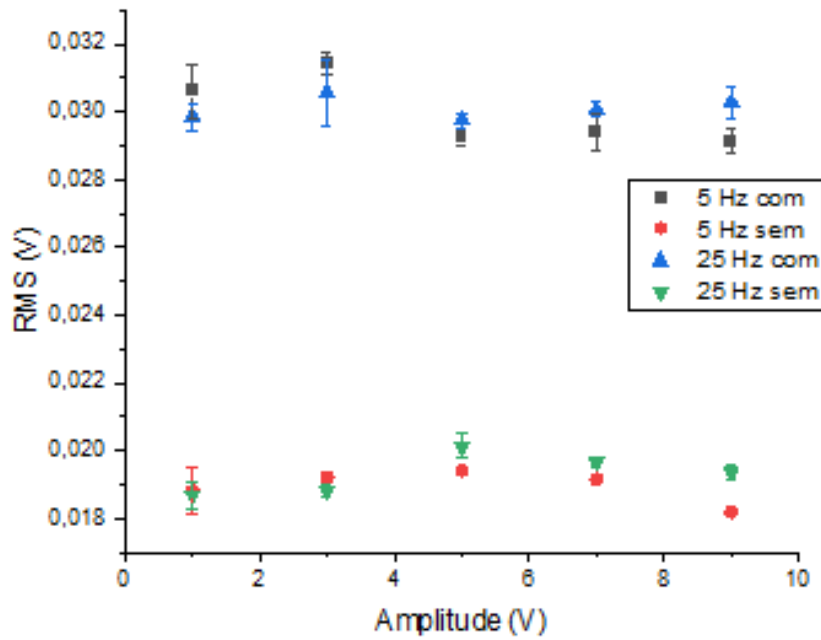
Rodrigues (2022) fez a comparação entre o seu trabalho e o de Viegas (2019), que usou somente o corte de frequência para dissociar o ruído de Barkhausen do sinal como um todo. Foi evidenciado um aumento na ordem de grandeza dos resultados em 100 vezes em relação aos resultados de Viegas (2019). Além disso, observa-se uma redução da faixa de erro em cada ponto, tornando, pois, mais precisa a informação. Estes resultados podem ser observados nas Figuras 11 e 12, onde temos os resultados de Viegas (2019) e Rodrigues (2022), respectivamente. Resultados semelhantes foram observados por Barros Neto (2021) a aplicação da TWD para detecção de nanoprecipitados formados no mesmo aço em estudo.

Figura 11 - 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)

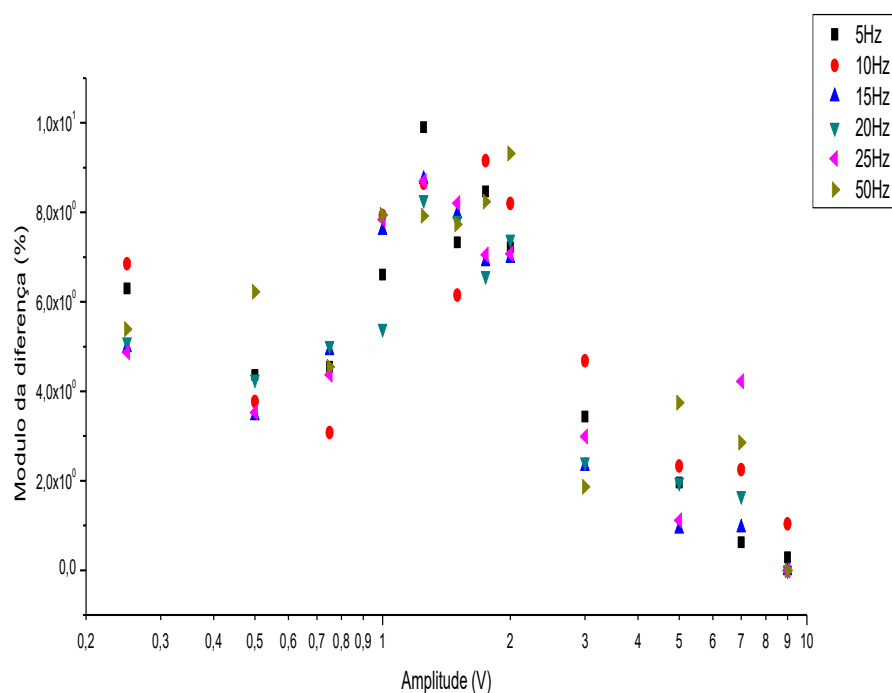
Figura 12 - Variação RMS do sinal de 5 Hz e 25 Hz para amostras com e sem precipitados, através da TWD com a família db10 e um nível de resolução.



Fonte: Rodrigues (2022)

Lins (2020) fez um estudo da substituição da bobina receptora por um sensor de efeito Hall em amostras com 8 mm de espessura de um aço inoxidável duplex SAF 2205, com sinais com frequências variando de 5 Hz a 50 Hz e amplitudes de 0,25 V a 9 V, conforme a Figura 13. Nesta é apresentada a diferença em módulo do RMS das duas condições, com e sem a presença da fase sigma, de modo a determinar a melhor região de trabalho. Pela análise da Figura 12, nota-se que a maior diferença de RMS se concentra na entre 1V e 2 V, onde o efeito do paramagnetismo da fase sigma supera o Ruído Magnético de Barkhausen, para as frequências de 5, 10, 15, 20, 25 e 50 Hz e amplitudes de 1; 1,25; 1,5; 1,75 e 2 V. Logo, essa região é a que apresenta as melhores condições para analisar as amostras de 8 mm e acompanhar a formação da fase sigma.

Figura 13 - Módulo da diferença do RMS em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras, para todas as frequências.



Fonte: Lins (2020)

O presente estudo utiliza a Transformada Wavelet Discreta para análise do Ruído Magnético de Barkhausen em uma configuração na qual utiliza o sensor de efeito Hall, para aplicação do acompanhamento da formação da fase prejudicial sigma em aços inoxidáveis duplex. A região de melhor condição de Lins (2020) será estudada através de transformada wavelet discreta.

Li (2022) realizou um estudo com placas de aço ortotrópicas, a fim de monitorar a saúde estrutural desses materiais e identificar, em tempo hábil, possíveis rachaduras. Para isso, foi utilizada como ferramenta de tratamento matemático a Transformada Wavelet empírica para eliminar de forma significativa a influência de dispersão, reflexão, múltiplos caminhos de propagação e ruído para obter, com maior precisão, a localização das fissuras. A taxa de amostragem foi 5 MHz e foi aplicado um filtro passa-banda analógico de 100-1000 KHz. Nos resultados apresentados, foi constatado uma menor quantidade de erros, em comparação à

métodos já existentes. Além disso, foi observada a viabilidade desta metodologia para aplicações de campo em estruturas complexas de grande escala.

Ahmed et al. (2020) direcionaram os seus estudos para monitoramento de aresta postiça através de sinais de emissão acústica adquirida e força de corte, que tem influência significativa nos resultados do processo de usinagem em aço inoxidável AISI 304. Para isso, utilizou-se a Transformada Wavelet Discreta, família Daubechies, aplicando 5 níveis de decomposição. Nos resultados, observou-se que o sistema é capaz de monitorar a formação de arestas postiças de corte através da análise de sinais de forças de corte obtidos por emissão acústica.

Abdulkareem et al. (2019) estudaram uma metodologia utilizando Transformada Wavelet de detecção de danos em estruturas baseadas na resposta à vibração, de modo a evitar distorção nos limites do sinal original, ou distorção de borda, o que poderia gerar identificação de danos não confiáveis, como no caso de alguns métodos que utilizam a transformada. Para isso, foi utilizada uma placa de aço quadrada e aplicada a Transformada Wavelet Contínua, cuja função básica escolhida foi a wavelet Paul. Os índices de escala e ângulos selecionado foram o 3 e 1, respectivamente. Os resultados numéricos mostraram que o problema da distorção de contorno é resolvido usando a diferença modal.

Knitter-Piatkowska et al. (2020) realizaram um estudo em uma estrutura metálica a fim de verificar a possibilidade da utilização da Transformada Wavelet para avaliar as condições do material. Para isso, foram excitadas ondas mecânicas na placa de metal. Tanto os sinais gerados pelo atuador, como os que chegaram ao transdutor foram gravados. Os dados registrados foram decompostos e analisados através da família wavelet Daubechies, em 8 níveis de decomposição. Os resultados mostraram que é possível a aplicação deste tipo de ensaio para identificar danos em elementos estruturais, além de ter mostrado relação entre os detalhes da Transformada Wavelet e o tipo de dano.

Saha et al. (2021) realizaram testes com emissões acústicas, que é um ensaio não-destrutivo que pode detectar a formação de microfissuras em tempo real, localizando e registrando ondas elásticas geradas durante o processo de fratura. Para tal, foram utilizados sinais com oito características e decompostos em 3 níveis de decomposição cada uma, utilizando a família Daubechies. Foi possível observar que à medida que a fração volumétrica das fibras de aço diminuem, diminui o número de emissões acústicas. Conclui-se que a

classificação da forma de onda das emissões acústicas pode ser útil para entender o processo de fissura por tração.

Ryu et al. (2020) propuseram um esquema para seleção adaptativa de parâmetros de filtros a fim de detectar defeitos em imagens de aço por meio de suas texturas, utilizando reconstrução do sinal por Transformada Wavelet. Para isso, foi utilizado a família Gabor em três níveis de decomposição. Os resultados foram satisfatórios, em relação à métodos convencionais existentes na detecção de defeitos em aço por texturas de imagens.

Yazdanpanah et al. (2022) pesquisaram sobre as curvas de fragilidade, que apresentam informações úteis quanto ao dano exercido por terremoto em diferentes níveis de piso de aços adjacentes. Os estudos foram realizados a partir de Morlet WB-DSF e Morlet complexo, considerando apenas o período estrutural da primeira modalidade. Os resultados indicam que tais curvas de fragilidade apresentam desempenho superior em relação às curvas de Morlet baseados em wavelets. Além disso, as curvas com Morlet complexo tem menor probabilidade de danos e são mais eficientes.

Li et al. (2018) analisaram o ruído eletroquímico de corrosão em diferentes microestruturas de aço inoxidável duplex 2205, baseados na Transformada Wavelet, que mostra a característica de corrosão em conformidade. Sendo assim, foi aplicada a família Daubechies, em 4 níveis de decomposição para caracterizar os comportamentos de corrosão. A intensidade energética do ensaio não-destrutivo reflete a gravidade da corrosão e sua mudança com o tempo podem demonstrar evolução que o sistema sofre. Os resultados confirmaram a interferência da eletricidade e demonstraram completamente o mecanismo de corrosão.

Chin et al. (2023) propuseram abordagens baseadas em Transformada Wavelet para caracterizar fadiga de molas helicoidais de suspensão de aço sobre recursos de vibração. Neste estudo, uma wavelet Daubechies, com dois níveis de decomposição, foi utilizada para a análise multifractal. Os resultados mostraram que os métodos propostos foram eficazes para determinar a energia do sinal e a multifractalidade dos sinais de vibração.

Zhang et al. (2020) estudaram corrosão do aço carbono Q235 monitorado pela técnica do ruído eletroquímico. Os sinais foram analisados pela wavelet Daubechies em 8 níveis de decomposição, a fim de calcular a fração de energia associada. Constatou-se que através da

Transformada Wavelet foi possível separar os transientes correspondentes à passivação e estágio de transição.

Knak et al. (2021) realizaram um diagnóstico não destrutivo de vigas de concreto reforçadas com placas de aço. Para isso, utilizaram análise modal e Transformada Wavelet Contínua. A influência do número de fugas das wavelets foram estudadas através da família de wavelets gaussianas de ordem 4. Os resultados mostraram que que a Transformada Wavelet poderia ser aplicada com sucesso para determinar a forma e posição exatas do deslocamento nas juntas adesivas de vigas mistas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo detalha os métodos científicos utilizados para realização desta pesquisa, que foi dividida em duas partes: determinação das famílias wavelets a serem usadas no ensaio eletromagnético e aplicação destas no estudo do Ruído Magnético de Barkhausen, em amostras de 8 mm de espessura, em um ensaio eletromagnético que possui a substituição da bobina receptora por um sensor de efeito Hall.

3.1. MATERIAIS

Foram utilizadas neste estudo 2 amostras AID SAF 2205, uma como recebida, ou seja, sem a presença da fase sigma e a outra tratada a 850 °C por 15 min, com a presença da fase sigma. A condição de tratamento foi obtida através de um aquecimento em um forno de indução, a uma temperatura de 850 °C, durante 15 minutos, que é tempo suficiente para que gere 4% da fase sigma no material, que já é capaz de começar comprometer as propriedades de tenacidade e resistência à corrosão desse material. A amostra, na condição em que havia a presença de precipitado, foi usinada pelo processo de eletroerosão em forma circular, cujo diâmetro possui valor de 24 mm e espessura de 8 mm. As composições químicas do material da amostra sem precipitado são apresentadas em percentual de peso na Tabela 1. Estas amostras pertencem o acervo do Grupo de Simulação de Comportamento dos Materiais (GSCMat) do Instituto Federal da Paraíba (IFPB).

Tabela 1 - Composição do AID SAF 2205 em percentual de peso.

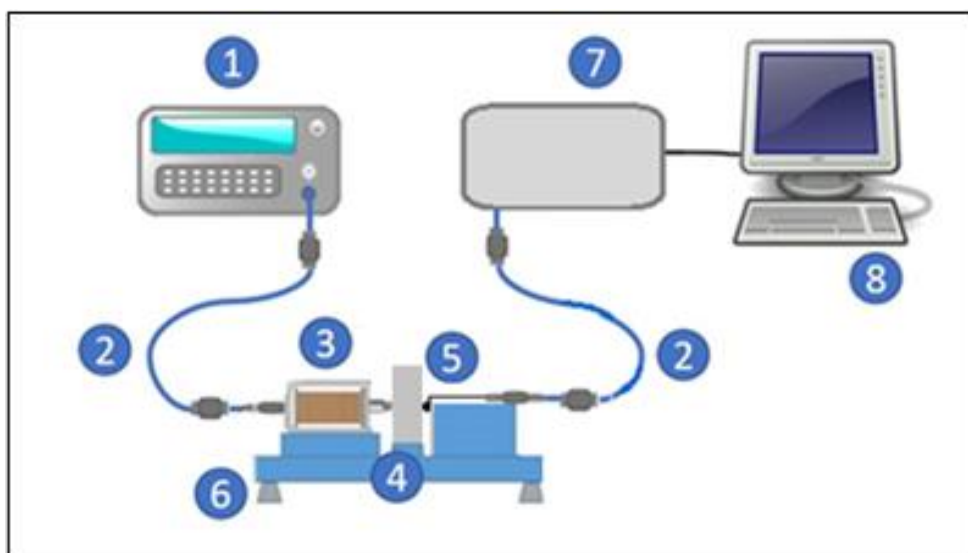
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Co
0,055	1,333	0,019	0,002	0,458	21,823	6,085	0,130
Cu	Mo	N	Nb	Al	Sn	Ce	Fe
0,191	3,609	0,180	0,028	0,013	0,012	0,020	66,496

Fonte: Fialho (2015)

3.2. BANCADA EXPERIMENTAL DE TESTE

A Figura 14 mostra a bancada de teste construída por Lins (2020) para obtenção dos dados que foram utilizados nesta pesquisa. Em (1) observa-se o módulo de emissão, um gerador de sinais de função Minipa, cujo modelo é MFG 4205B, que transmite as ondas de formatos variados para a bobina emissora, através dos cabos blindados (2). Segundo Carvalho Filho (2018), as ondas em formato triangular e senoidal são as indicadas para utilização deste experimento, uma vez que indicam maior presença de ruído, advindos do movimento das paredes dos domínios magnéticos. Entre essas a senoidal é a mais utilizada na literatura, sendo a escolhida para o presente trabalho.

Figura 14 - Configuração experimental: (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (3) bobina emissora, (4) amostra, (5) sensor de efeito Hall, (6) bancada de testes com gaiola de Faraday, (7) placa de aquisição e (8) computador.

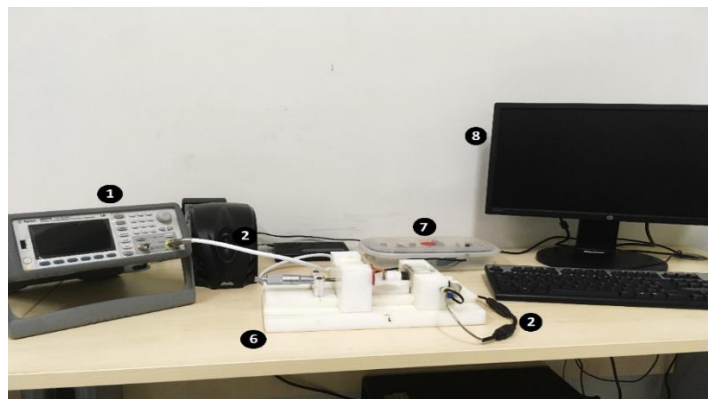


Fonte: Lins (2020)

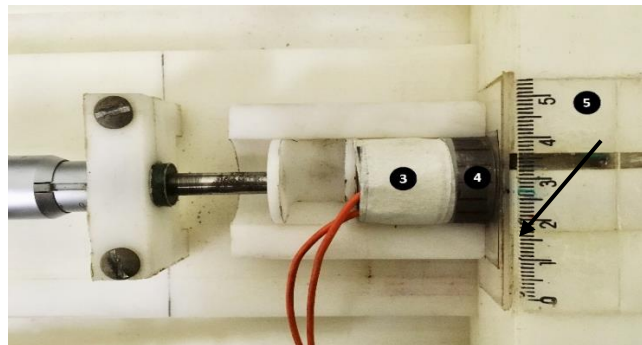
A bobina emissora tem a função de introduzir uma densidade de fluxo magnético no material e fica posicionada no centro de uma das faces da amostra, ilustrada na posição 4 da Figura 14. Na outra face da amostra, tem-se o sensor de efeito Hall (5), que detecta o campo

resultante da interação entre a onda emissora e o material. Em (6) tem-se a bancada de teste, feita em poliacetal a fim de minimizar a influência do material no direcionamento das linhas de campo. A placa de aquisição (7) conecta o sensor ao computador (8) através de cabo USB, onde é feita de maneira automática, a aquisição dos dados pelo programa Permeabilidade GSCMat desenvolvido pelo grupo. As fotos dos equipamentos do Ensaio Não Destrutivo são ilustradas na Figura 15 (LINS, 2020).

Figura 15 - Equipamento de ensaio: (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (3) bobina emissora, (4) amostra, (5) sensor de efeito Hall, (6) bancada de testes com gaiola de Faraday, (7) placa de aquisição e (8) computador.



(a)



(b)

Fonte: Lins (2020)

3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.3.1 DEFINIÇÃO DOS ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS PARA ACOMPANHAMENTO DA FASE SIGMA

O parâmetro que será utilizado para a análise da onda será o RMS da onda, que diz respeito à raiz quadrada do valor quadrático médio, conhecido pelas iniciais do termo em inglês *Root Mean Square*. É um parâmetro estatístico usado para caracterizar a potência de um sinal. Este parâmetro escalar é útil para quantificar o sinal RMB em volts. Este parâmetro foi escolhido devido a sua simplicidade para interpretar o RMB (MORGAN, 2013).

O valor RMS é calculado conforme a Equação 5 (LINS, 2020):

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

em que:

N: número de amostras do sinal;

d_i : valor do sinal no tempo, que representa os detalhes da TWD amplitudes do RMB.

Os valores RMS, realizados para o sinal de detalhe no tempo, dos sinais serão obtidos com um intervalo de confiança de 95% através do desvio padrão.

3.3.2 ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS

Segundo Lins (2020), os melhores resultados obtidos com ondas senoidais de frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz, para detecção de 4 % de fase sigma, que é suficiente para fragilizar um aço inoxidável duplex, ocorre para faixa de amplitude de 1 V até 2 V. Estes resultados foram obtidos a partir de um ensaio eletromagnético em que a bobina receptora é substituída por um sensor de efeito Hall. Para a determinação das

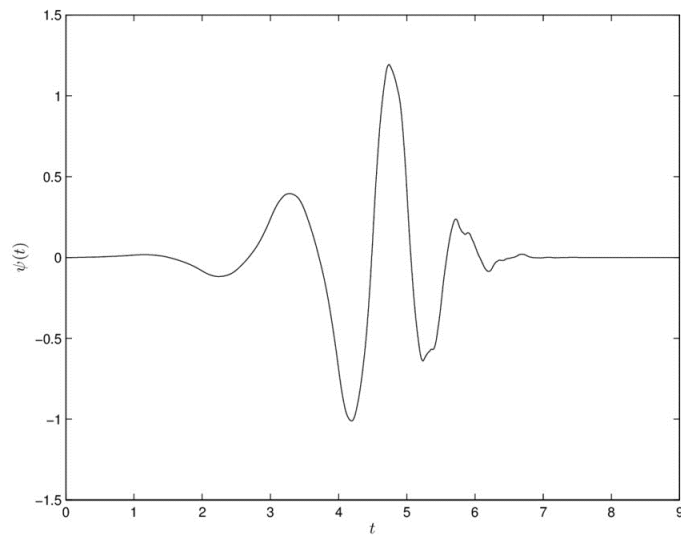
características das ondas emisoras que sejam capazes de acompanhar a formação da fase sigma, foram analisadas as amostras como recebida e a tratada na temperatura de 850 °C por 15 min. Nessa etapa foi determinada as características da onda emissora capaz de ter sensibilidade para detectar a presença de 4 % da fase sigma proveniente do tratamento. Essa análise foi realizada para a espessura de 8 mm.

As ondas emisoras estudadas foram senoidais, com frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz e amplitudes de 1 V; 1,25 V; 1,5 V; 1,75 V e 2 V. Essas foram obtidas com a aquisição de 1000 pontos a cada 1s, através do sensor de efeito Hall posicionado no lado oposto da amostra em relação a bobina emissora, que detectou o RMB. Foram capturados 50 sinais de cada arranjo de frequência e amplitude para cada onda.

Inicialmente, a fim de se observar o desempenho do sensor Hall como substituição da bobina receptora, foram analisadas as ondas emisoras com frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz, com amplitudes de 1 V, 1,25 V, 1,5 V, 1,75 V e 2 V e aplicada a família db10, escolhida em razão dos resultados obtidos por Rodrigues (2022), que constatou bom desempenho para bancada experimental de teste utilizando bobina receptora.

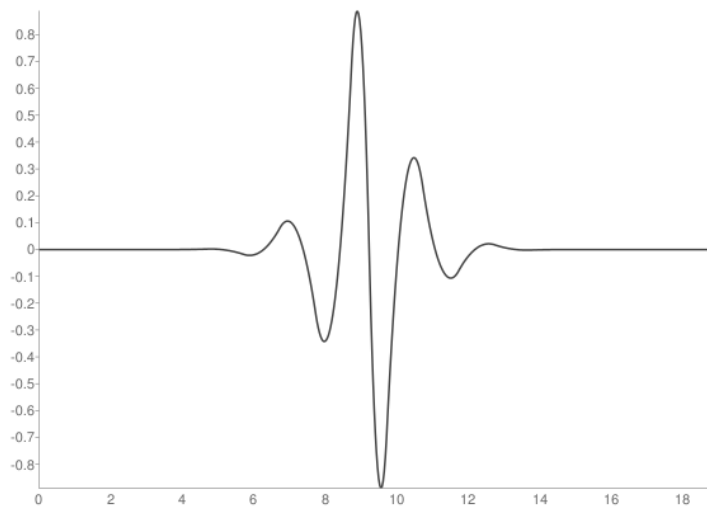
Feito isso, o próximo passo se deu em determinar a escolha do tipo de família a ser utilizada. Para este fim, foram analisadas dentre as famílias wavelet do programa Matlab, as que apresentavam maior diferença em porcentagem, entre as condições com e sem precipitados, para frequência de 5 Hz e 1,5 V de amplitude. Esse sinal foi escolhido dentro da região determinada por Lins (2020) como o melhor para o ensaio com bobina receptora substituída por um sensor de efeito Hall. As famílias Daubechies, Symlets, Coiflets, Biorthogonal, foram analisadas e, como critério de escolha, foi fixado a maior diferença em porcentagem acima de 10 %, entre as condições com e sem precipitado. Após análise das famílias wavelets, foram escolhidas para essa aplicação, as famílias db5 e bio 3.9, por apresentarem maior diferença percentual entre a condições com e sem a presença de precipitados, como mostradas nas Figuras 16 e 17, respectivamente.

Figura 16 – Família db5



Fonte: Jackson e Turnbull (2017)

Figura 17 – Família 3.9



Fonte: Jackson e Turnbull (2017)

Por fim, os sinais obtidos através da bancada experimental de teste utilizando sensor Hall, obtidos por Lins (2020), foram analisadas com as famílias db5 e bio 3.9, com as mesmas frequências. No entanto, apenas os sinais com amplitude de 1,5 V foram testados, por ser um

valor médio dentre as amplitudes, pois observou-se que, para esta análise, o valor da amplitude não interfere nos resultados. Lins (2020), na sua pesquisa, analisou os sinais do Ruído Magnético de Barkhausen a partir da aplicação da FFT e filtros passa-altas. Na presente metodologia, os sinais foram analisados a partir dos detalhes e aproximações fornecidos pela Transformada Wavelet Discreta.

A Tabela 2 resume todos os parâmetros dos sinais que foram analisados para a espessura de 8 mm. Rodrigues (2022) realizou o ensaio eletromagnético utilizando a bobina receptora e para análise dos sinais foi aplicada a família db10 da TWD, portanto, a título de comparação, a família db10 também foi aplicada para observar os resultados diante dos ensaios eletromagnéticos com bobina receptora, utilizada por Rodrigues (2022) e com sensor Hall, utilizado por Lins (2020).

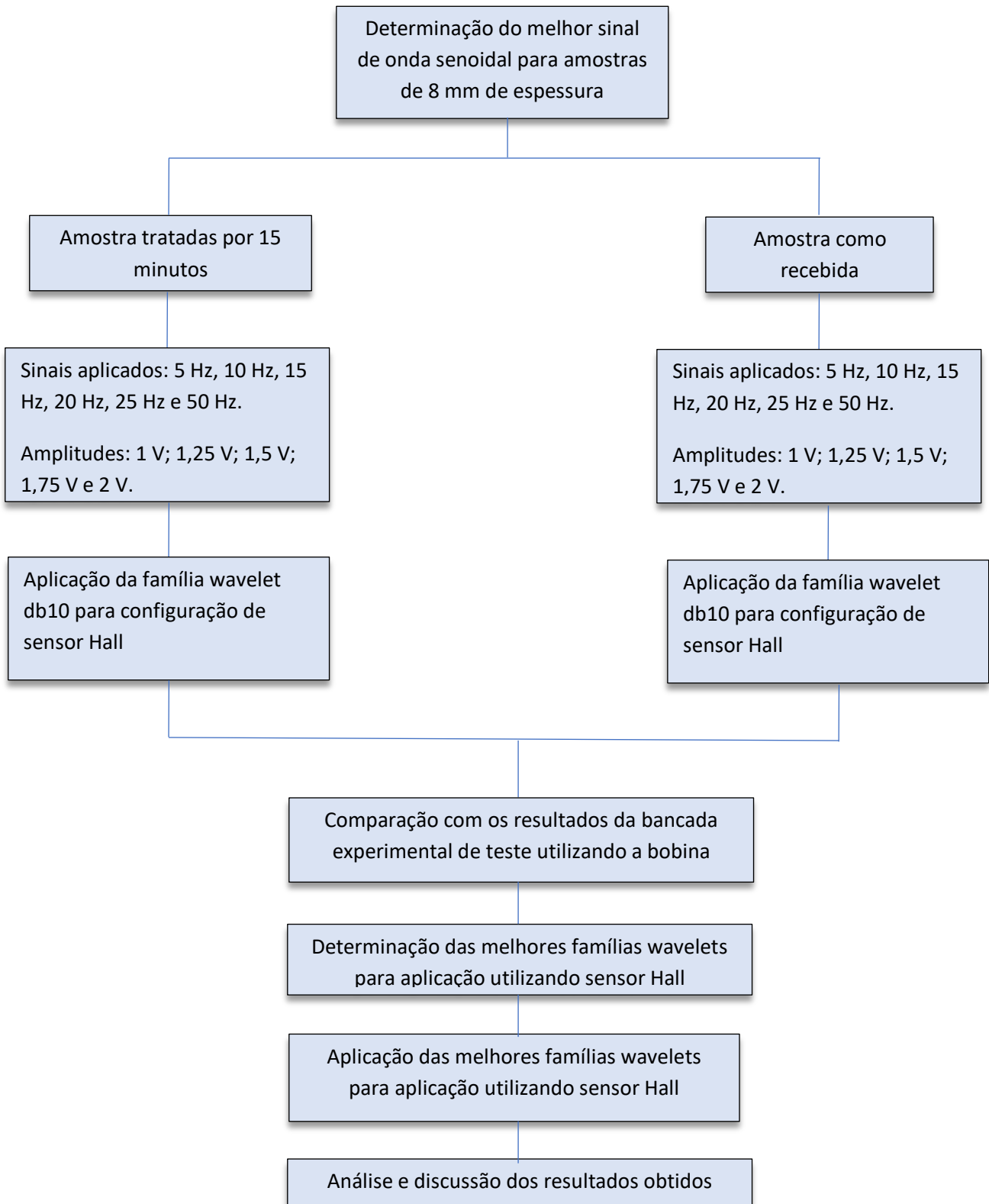
Tabela 2 – Resumo dos parâmetros e etapas da metodologia

Tipo de onda	Frequência	Amplitudes
Senoidal	5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20, 25 Hz e 50 Hz.	1; 1,25; 1,5; 1,75 e 2 V.
Etapa 1: análise do Ruído Magnético de Barkhausen obtidos por sensor Hall através dos detalhes da família db10		
Etapa 2: escolha das melhores famílias para ensaio utilizando sensor Hall		
Etapa 3: aplicação das melhores famílias e análise dos sinais obtidos por sensor Hall		

Fonte: própria (2022)

A Figura 18 mostra um esquema dos ensaios eletromagnéticos a serem aplicados para acompanhamento da fase prejudicial sigma.

Figura 18 - Esquema dos ensaios eletromagnéticos a ser aplicado para acompanhamento da fase prejudicial sigma.



Fonte: própria (2023)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção faz inicialmente uma comparação da aplicação da transformada Wavelet Discreta entre uma configuração de ensaio em que a bobina receptora está posicionada na superfície oposta à da emissora, com uma em há a substituição da bobina receptora por um sensor de efeito Hall. Em seguida, é determinada a melhor família para a configuração com o sensor de efeito Hall e por fim a comparação entre os resultados obtidos com aplicação da melhor família com a metodologia em que utilizou corte de frequência aplicada na bancada com sensor Hall.

4.1 COMPARAÇÃO ENTRE A BANCADA COM BOBINA RECEPTORA COM A DO SENSOR DE EFEITO HALL.

Rodrigues (2022) utilizou a ferramenta matemática da Transformada Wavelet Discreta em um ensaio eletromagnético com bobina receptora e concluiu que a família db10 mostra-se eficiente para frequências de 5 Hz, 25 Hz e 50 Hz, em comparação com filtragem por corte de frequência. Sendo assim, foram aplicadas a família db10 em sinais obtidos através de ensaio eletromagnético com sensor Hall, a fim de observar possíveis melhorias em comparação com os resultados de Rodrigues (2022).

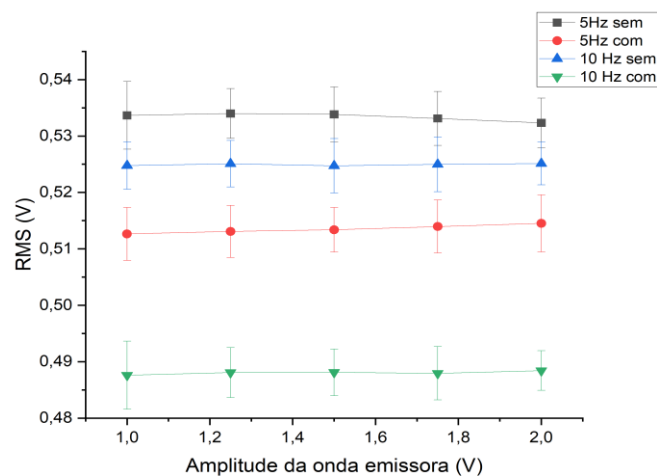
As Figuras de 19 à 23 mostram os valores de RMS em função da amplitude das ondas emissoras de 1 V a 2 V, para as condições com e sem precipitado e frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz. Este intervalo de amplitude da onda emissora foi determinado por Lins (2020) como a melhor faixa para estudos com a substituição da bobina receptora, posicionada na superfície oposta da emissora, por um sensor de efeito Hall.

Nota-se das Figuras 19 à 23 que os valores de RMS das condições com precipitados são inferiores aos sem precipitados. O constituinte sigma é paramagnético e forma-se a partir da decomposição da ferrita que é ferramagnética e assim aumenta o paramagnetismo e valores de RMS. Rodrigues (2022) observou comportamento contrário com a configuração com o uso da

bobina receptora, ou seja, os valores de RMS para a condição com precipitados foi superior a sem o constituinte novo. Isto indica que a interação entre movimento das paredes dos domínios magnéticos e o precipitado é suficiente para que o efeito do ruído magnético de Barkhauen gerado supere o efeito do paramagnetismo de sigma.

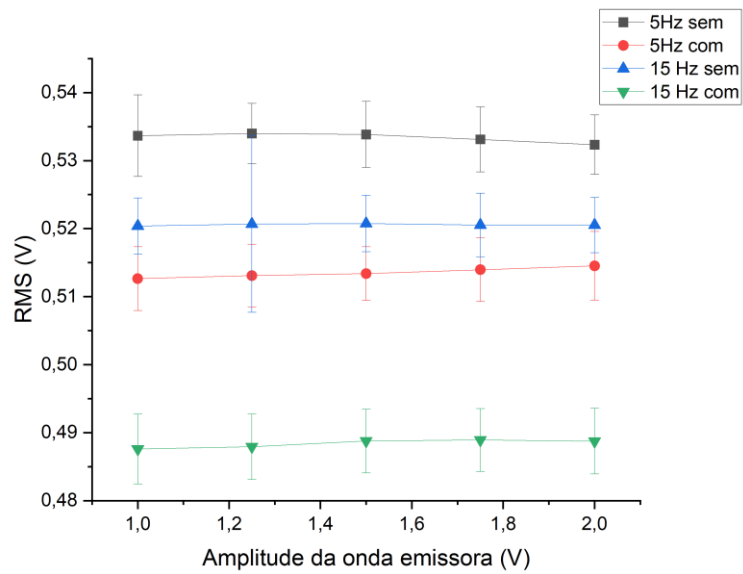
Observa-se também das Figuras 19 à 23 que o aumento da frequência reduz os valores de RMS. Isto é associado à penetração da onda ser inversamente proporcional ao aumento da frequência. A frequência de magnetização e a tensão (tensão de pico) são os dois principais parâmetros operacionais ajustáveis durante as medições. A frequência afeta principalmente a profundidade a partir da qual o sinal é obtido e também determina o tempo necessário para concluir uma medição. Quanto menor a frequência, mais tempo levará para completar um teste. A tensão de excitação ajusta a magnitude do campo de magnetização aplicado à amostra, quanto maior a tensão, maior o campo de magnetização, assim, quanto maior o volume de interação (CHUKWUCHEKWA, 2011). Nas configurações estudadas na região de trabalho os valores de RMS são independentes da amplitude da onda emissora para cada frequência estudada.

Figura 19 – Aplicação da família db10 em uma faixa de amplitude entre 1 V à 2 V para frequência de 10 Hz, entre as condições com e sem precipitado, para ensaio utilizando sensor Hall



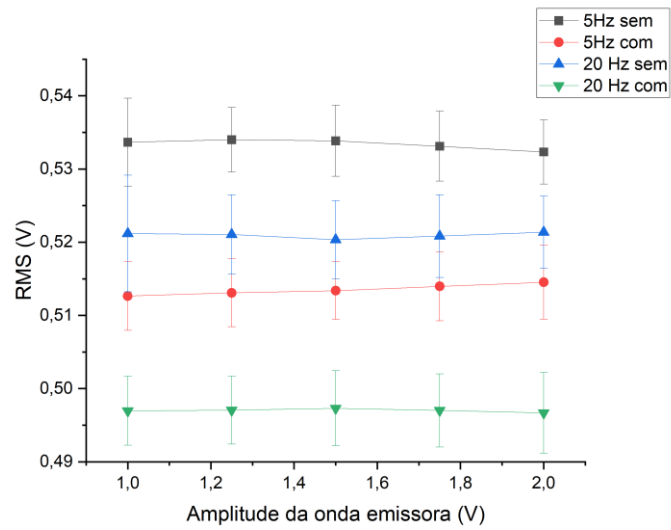
Fonte: própria (2023)

Figura 20 – Aplicação da família db10 em uma faixa de amplitude entre 1 V à 2 V para frequência de 15 Hz, entre as condições com e sem precipitado, para ensaio utilizando sensor Hall



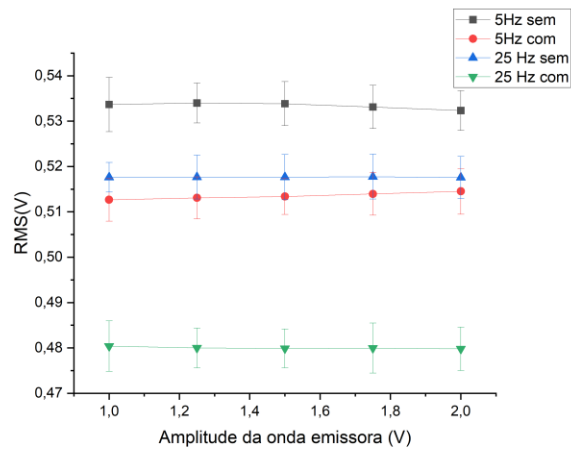
Fonte: própria (2023)

Figura 21 - Aplicação da família db10 em uma faixa de amplitude entre 1 V à 2 V para frequência de 20 Hz, entre as condições com e sem precipitado, para ensaio utilizando sensor Hall



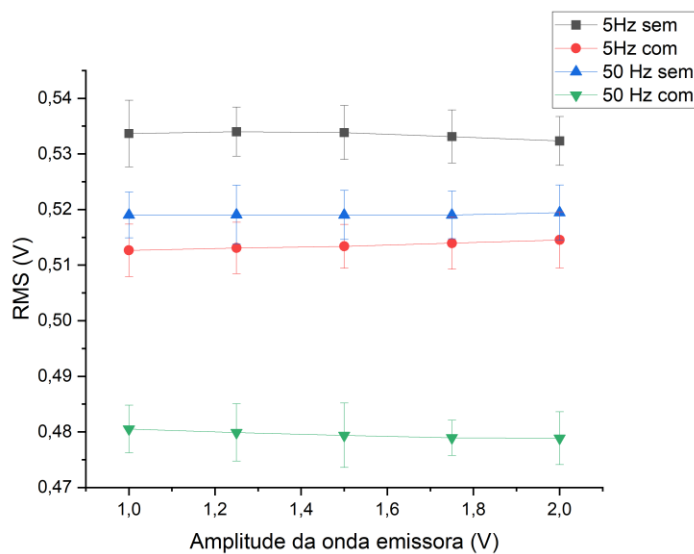
Fonte: própria (2023)

Figura 22 - Aplicação da família db10 em uma faixa de amplitude entre 1 V à 2 V para frequência de 25 Hz, entre as condições com e sem precipitado, para ensaio utilizando sensor Hall



Fonte: própria (2023)

Figura 23 - Aplicação da família db10 em uma faixa de amplitude entre 1 V à 2 V para frequência de 50 Hz, entre as condições com e sem precipitado, para ensaio utilizando sensor Hall



Fonte: própria (2023)

A tabela 3 mostra a diferença entre RMS para as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação da wavelet discreta da família db10 aplicada na configuração com o sensor de efeito Hall e com o a bobina receptora, para aplicação de frequências de 5 Hz, 25 Hz e 50 Hz e amplitude de onda emissora de 1 V. Nota-se um aumento na amplitude de medida na configuração com o sensor de efeito Hall, de 5 vezes para frequência de 5 Hz a 3,9 para a de 50 Hz.

Tabela 3 – Diferença entre RMS para as condições com e sem a presença de fase sigma para aplicação da Transformada Wavelet em ensaio com sensor Hall

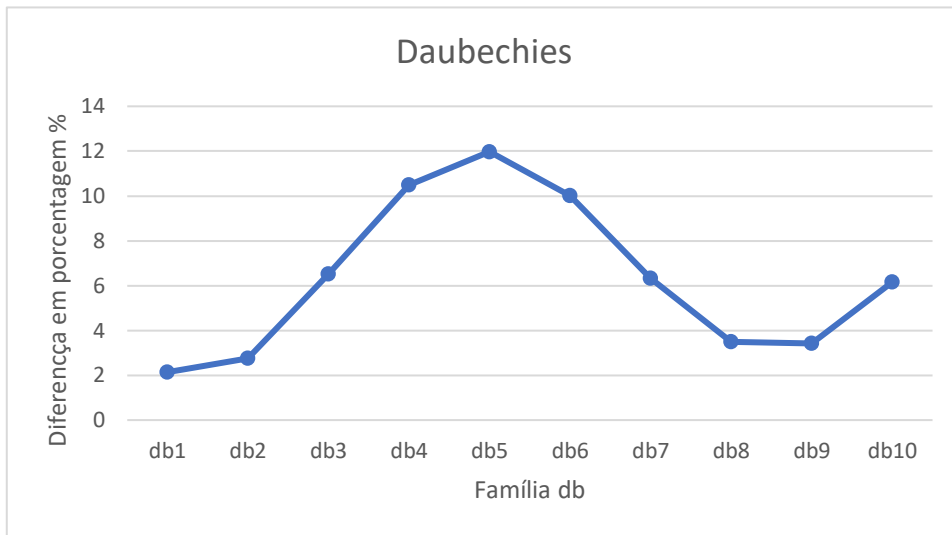
Frequência	Com sensor de efeito Hall	Com bobina receptora	Razão entre com e sem sensor Hall
5Hz	0,02	0,004	5
25 Hz	0,04	0,01	4
50 Hz	0,04	0,0102	3,9

Fonte: própria (2023)

4.2 DETERMINAÇÃO DA MELHOR FAMÍLIA PARA SE TRABALHAR COM O SENSOR DE EFEITO HALL

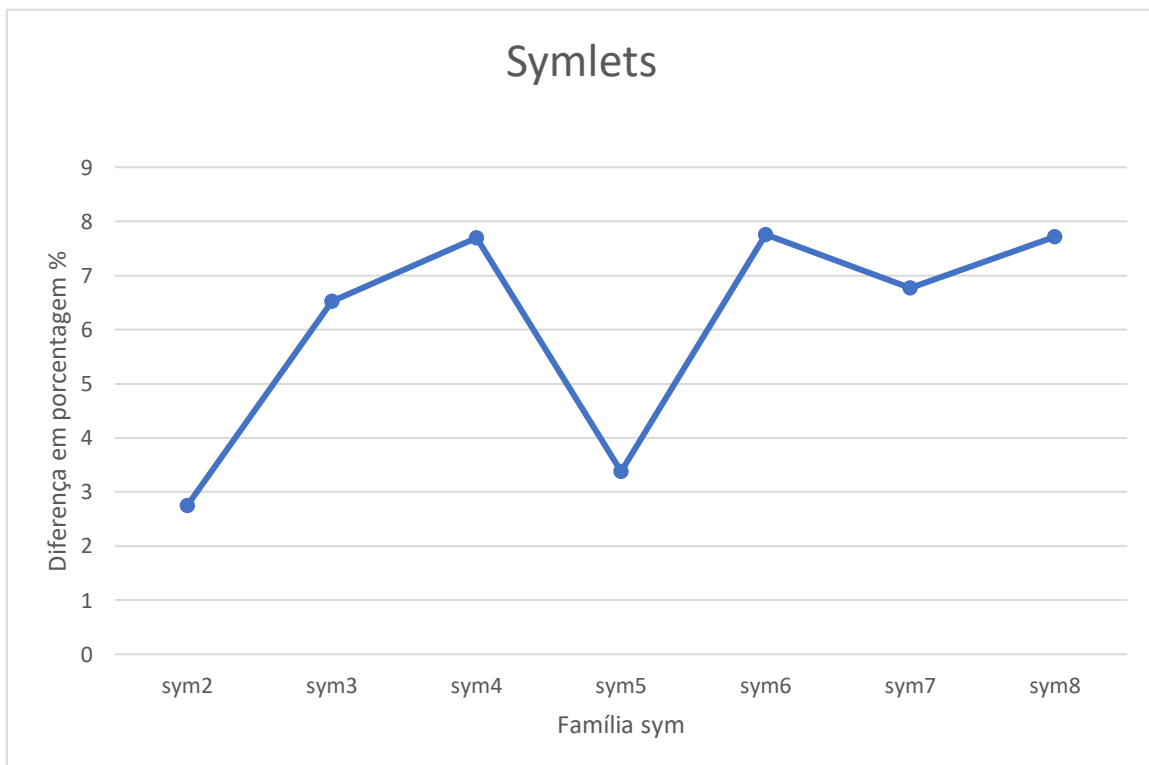
Nesta etapa foram analisadas entre as famílias de wavelet do Matlab, as que apresentavam maior diferença em porcentagem entre as condições com e sem precipitados para frequência de 5 Hz e 1,5 V de amplitude. Este valor de amplitude foi escolhido, pois no intervalo de 1 V até 2 V os valores de RMS mostram ser independentes dessa e assim foi escolhido o valor intermediário. As Figuras 24 até 27 mostram a diferença em porcentagem, baseadas nos valores RMS, em função do tipo de wavelet para as famílias Daubechies, Symlets, Coiflets, Biorthogonal, respectivamente. Foi fixado como critério de escolha a maior diferença em porcentagem entre as condições com e sem acima de 10 %. Na Figura 24 a escolhida foi a db5 com diferença de 12 %. As famílias Symlets e Coiflet apresentaram resultados inferiores a 9,5 %, conforme apresentado nas Figuras 25 e 26. A família Biorthogonal apresentou melhor resultado para a wavelet bio 3.9 com diferença de 11,3 %, Figura 27. As wavelets db5 e bio 3.9 foram escolhidas para o presente estudo.

Figura 24 - Variação em porcentagem entre as condições com e sem a fase sigma, em função dos tipos de wavelets Daubechies.



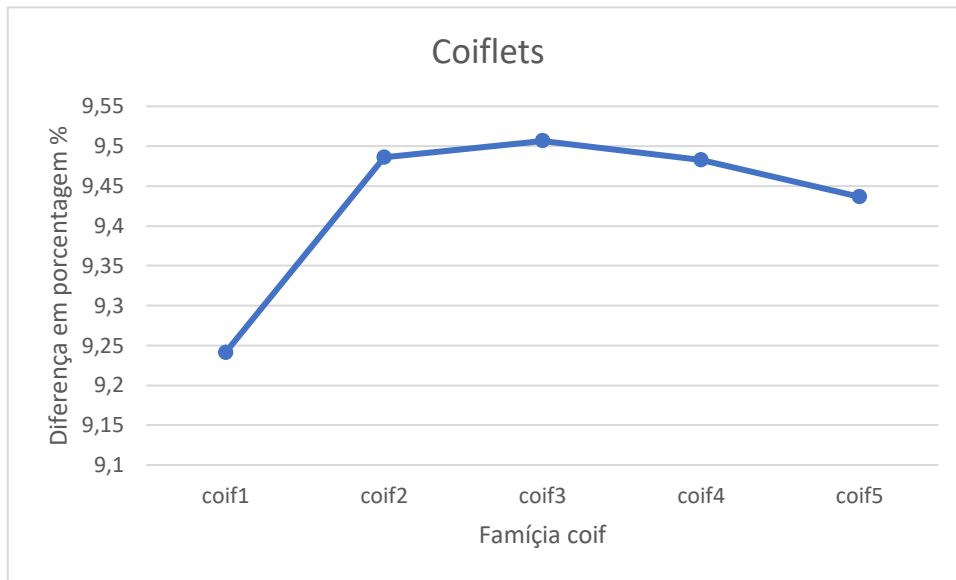
Fonte: própria (2023)

Figura 25 - Variação em porcentagem entre as condições com e sem a fase sigma, em função das wavelets do tipo Symlets.



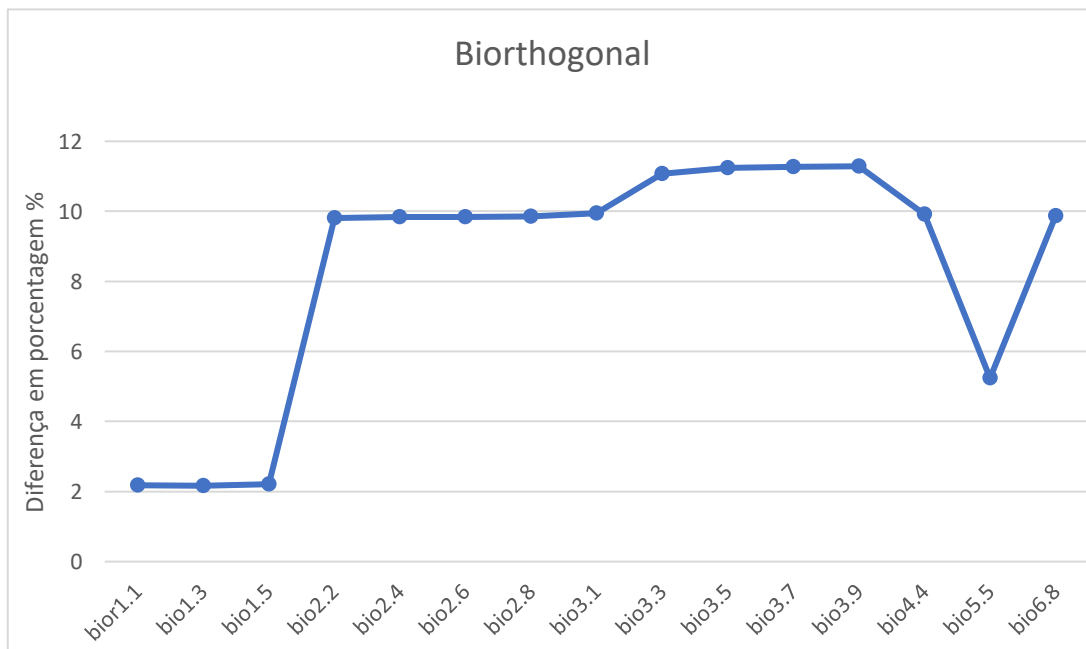
Fonte: própria (2023)

Figura 26 - Variação em porcentagem entre as condições com e sem a fase sigma, em função das wavelets do tipo Coiflets.



Fonte: própria (2023)

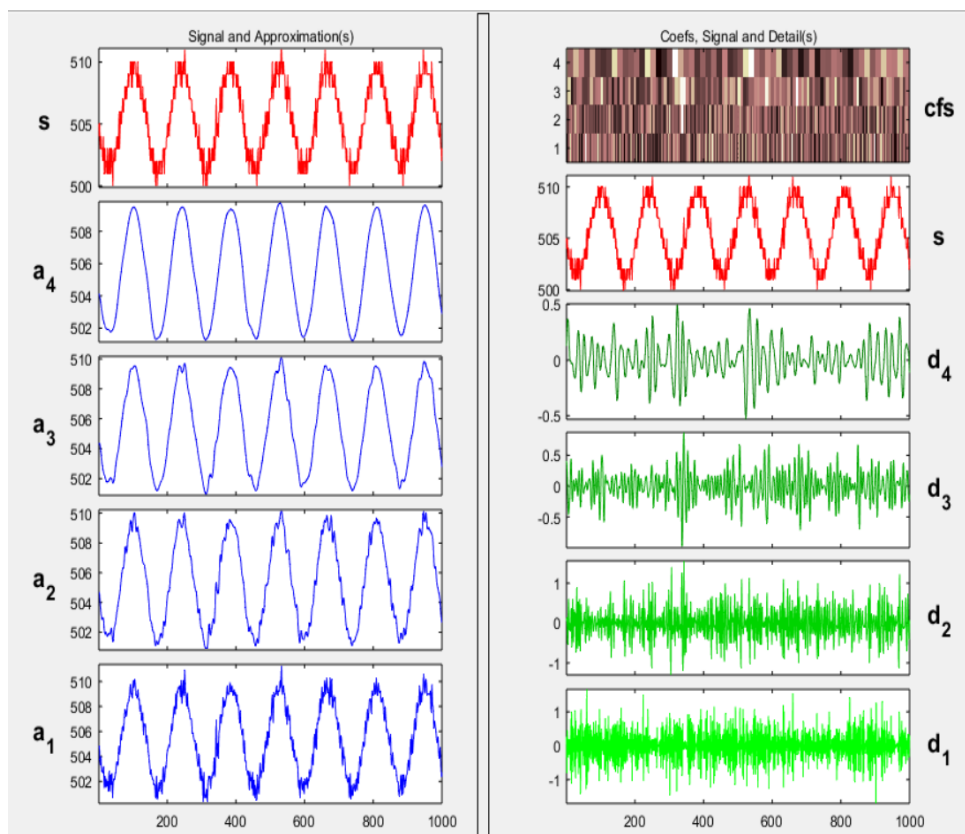
Figura 27 - Variação em porcentagem em as condições com e sem a fase sigma, em função dos tipos de wavelets Biorthogonal.



Fonte: própria (2023)

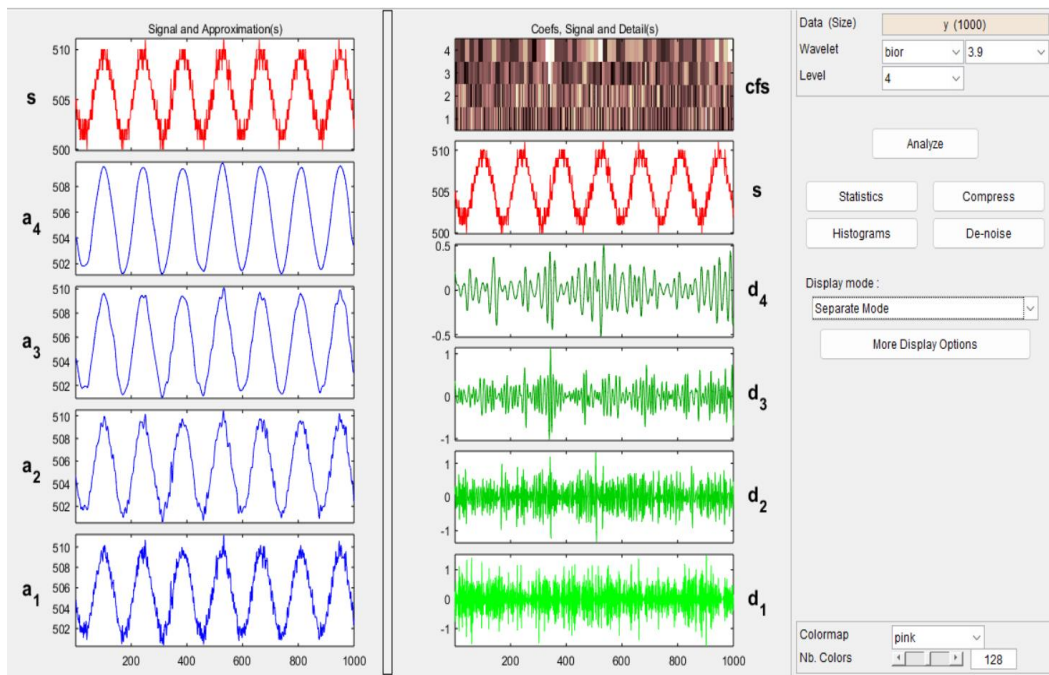
As Figuras 28, 29, 30 e 31 mostram a aplicação das famílias db5 e bio 3.9 nos sinais com frequência de 5 Hz e amplitude de 1,5 V, para as condições com e sem a presença do constituinte sigma e aplicação de quatro níveis de decomposição. A Figura 28 mostra aplicação da db5 na condição com e na Figura 29 o uso da bio 3.9 para a mesma condição. O RMS para a db5 foi de 0,486 V e para bio 3.9 0,4864. Os sinais praticamente não sofrem diferença, mesmo com a uso das duas wavelets. As Figuras 30 e 31 mostram aplicação para condição sem. O RMS para a db5 foi de 0,5262 e da bio 3.9 0,5413. Os valores de RMS para essa condição teve pouca variação entre as duas wavelets. Contudo, os menores valores para a condição sem indica que, para o sinal usado, as paredes dos domínios magnéticos têm dificuldades de vencer a barreira de precipitados e reduzem assim os RMS obtidos (referência).

Figura 28 - Aplicação da wavelet db5 no sinal de onda senoidal de 5 Hz e amplitude de 1,5 V para a condição com precipitado.



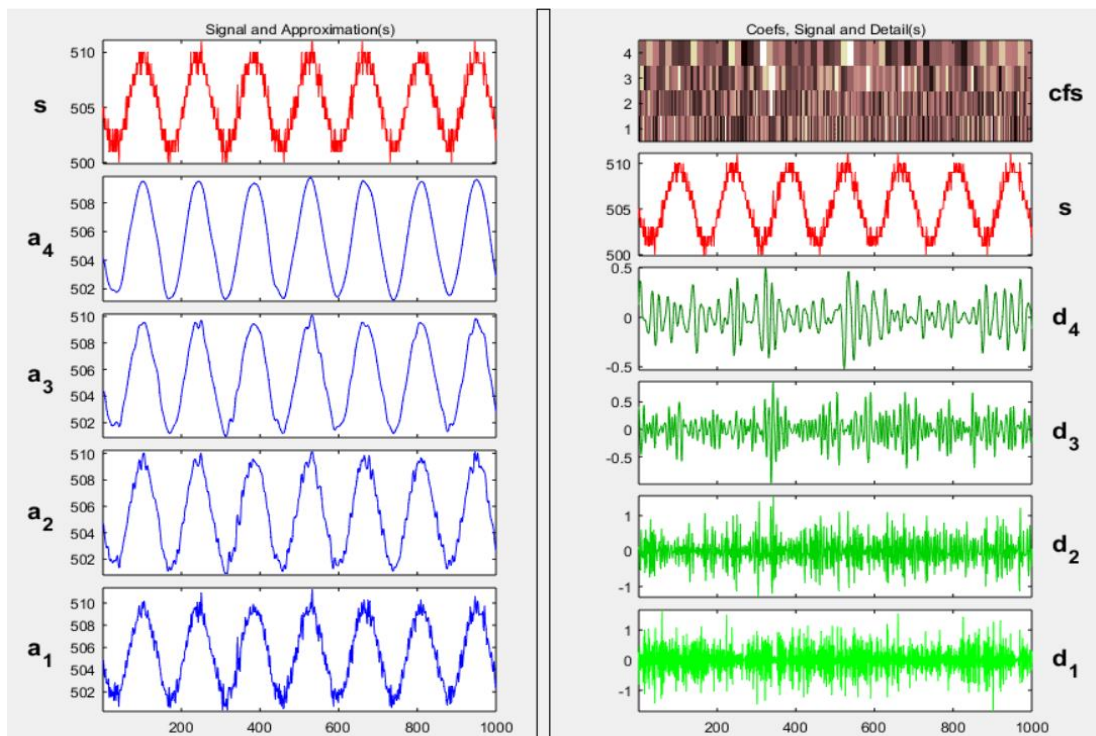
Fonte: própria (2023)

Figura 29 - Aplicação da wavelet bio 3.9 no sinal de onda senoidal de 5 Hz e amplitude de 1,5 V para a condição com precipitado.



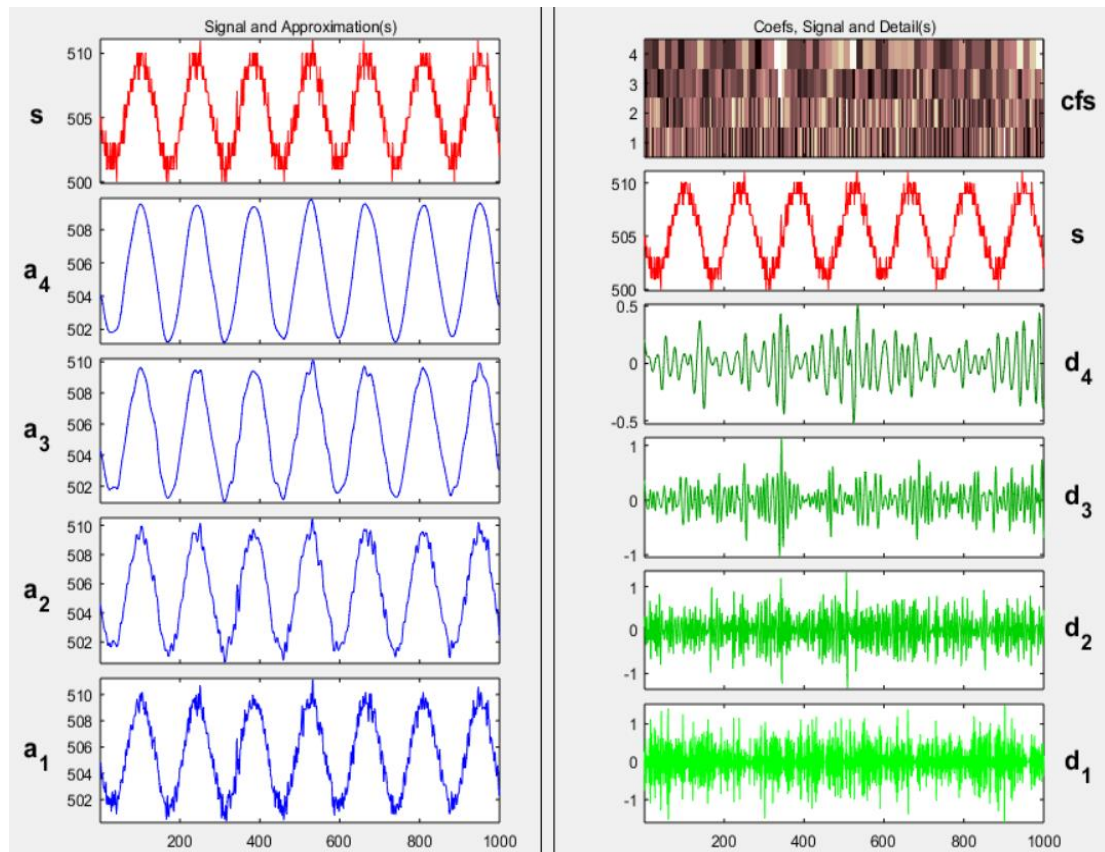
Fonte: própria (2022)

Figura 30- Aplicação da wavelet db5 no sinal de onda senoidal de 5 Hz e amplitude de 1,5 V para a condição sem precipitado.



Fonte: própria (2023)

Figura 31 - Aplicação da wavelet db5 no sinal de onda senoidal de 5 Hz e amplitude de 1,5 V para a condição com precipitado.



Fonte: própria (2023)

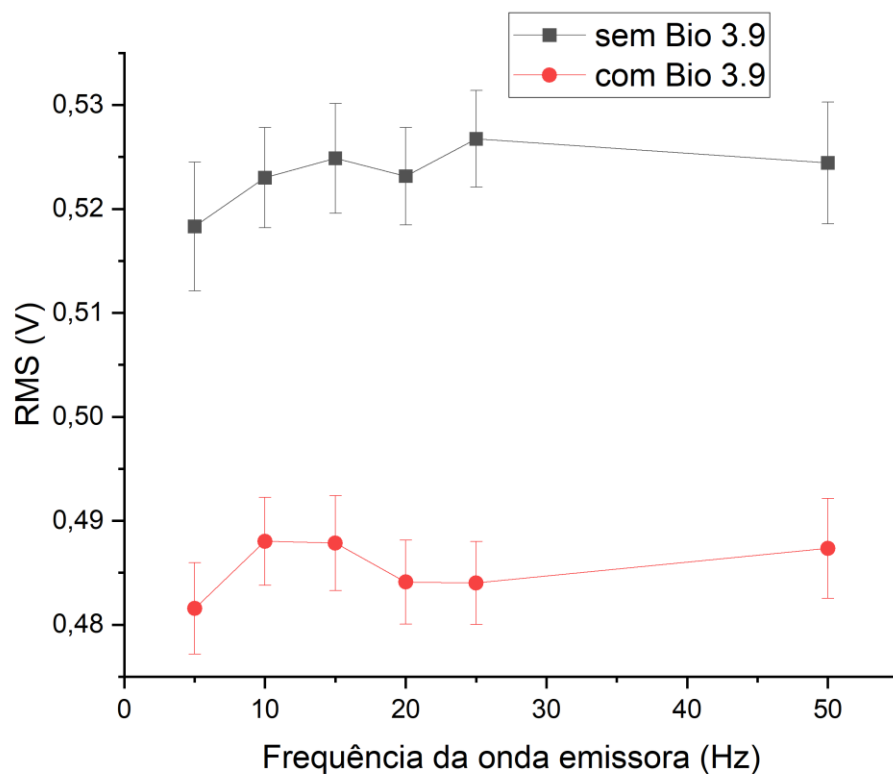
4.3 COMPARAÇÃO ENTRE A APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA EM UM ENSAIO COM SENSOR HALL E APLICAÇÃO DE CORTE DE FREQUÊNCIA

Lins (2020) analisou o Ruído Magnético de Barkhausen através de sensor Hall, aplicando corte de frequência, e concluiu que o experimento foi capaz de detectar fase sigma. Além disso, foi observado que a melhor região de análise está entre as faixas de amplitudes de 1 V até 2 V. No presente trabalho, foi realizado um estudo preliminar para escolha das famílias wavelets a serem usadas no ensaio eletromagnético, com a mudança da bobina receptora por

um sensor de efeito Hall. Sendo assim, as wavelets db5 e bio 3.9, ambas em dois níveis de decomposição, foram escolhidas para o prosseguimento do estudo.

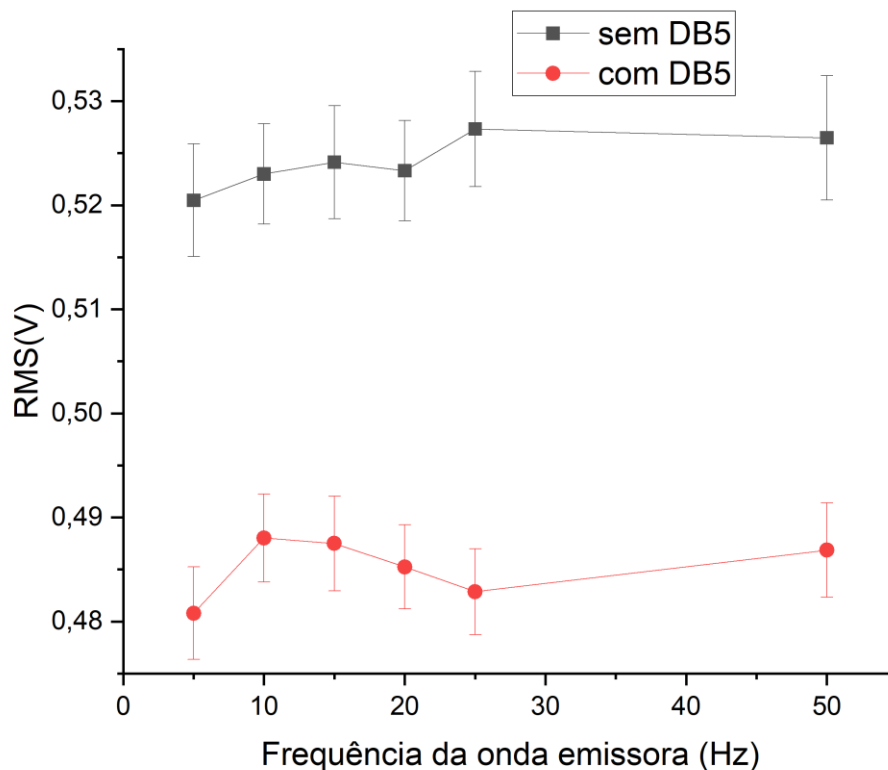
As Figuras 32 e 33 mostram a variação do RMS em função da frequência para aplicação das famílias Bio 3.9 e db5 para amostras com e sem a presença de precipitado. Nota-se comportamento similar entre a aplicação das duas famílias, ou seja, pouca variação em função da variação de frequência e valores de RMS próximos para as famílias tanto para condição com como sem o precipitado.

Figura 32 - Variação do RMS em função da frequência para aplicação da família Bio 3.9 para amostras com e sem a presença de precipitado



Fonte: própria (2023)

Figura 33 - Variação do RMS em função da frequência para aplicação da família db5 para amostras com e sem a presença de precipitado



Fonte: própria (2023)

A tabela 4 mostra a diferença entre RMS para as condições com e sem a presença de sigma, para aplicação da wavelet discreta da família db5 e bio 3.9 aplicada na configuração com o sensor de efeito Hall, para aplicação de frequências de 5 Hz e 25 Hz e amplitude de onda emissora de 1,5 V. Neste experimento, observou-se uma diferença de 0,04 V no valor do RMS entre as amostras com e sem precipitado, com a família db5 e bio 3.9, para a frequência de 5 Hz e 25 Hz. Lins (2020) obteve diferença de 0,002 V, ou seja, a ordem de grandeza aumenta vinte vezes com a Transformada Wavelet Discreta, em comparação com a análise por corte de frequência.

Tabela 4 – Diferença entre RMS para as condições com e sem a presença de fase sigma para aplicação da Transformada Wavelet em ensaio com sensor Hall, aplicando as famílias db5 e bio 3.9

Frequência	Família	Com TWD	Com corte de frequência	Razão entre aplicação da TWD e corte de frequência
5Hz	db5 e bio 3.9	0,04	0,002	20
25 Hz	db5 e bio 3.9	0,04	0,002	20

Fonte: própria (2023)

Após a análise dos resultados apresentados, observa-se melhorias em relação ao uso do sensor Hall na obtenção dos sinais do Ruído Magnético de Barkhausen. Além disso, a Transformada Wavelet Discreta mostra-se uma ferramenta adequada para análise do RMB, uma vez que os resultados apresentaram ganho na amplitude, em relação à análise feita com filtro passa-altas.

5. CONCLUSÕES

A presente pesquisa se propôs a estudar a aplicação da Transformada Wavelet Discreta na análise do Ruído Magnético de Barkhausen, em um ensaio eletromagnético, empregando um sensor de efeito Hall para substituir a bobina receptora. Dessa forma, após aplicação da metodologia explanada e baseado-se nos resultados obtidos, apresenta-se as seguintes conclusões:

- Os valores de RMS para as frequências estudadas mostram serem independentes da amplitude da onda emissora na faixa de 1 V a 2 V e caírem com o aumento da frequência. A profundidade de penetração é inversamente proporcional ao aumento da frequência.
- Os valores de RMS para a condição com precipitado mostram ser inferiores ao da condição sem, para as ondas estudadas. Isto significa que, como os valores RMS independem da amplitude na região de estudo, o movimento das paredes dos domínios magnéticos não é suficiente para gerar ruído para superar o efeito do paramagnetismo do constituinte sigma.
- A comparação entre o uso da bobina receptora e o sensor de efeito Hall, para detecção do constituinte sigma, mostrou um aumento na amplitude de medida na ordem de 5 vezes para frequência de 5 Hz e 3,9 para 50 Hz.
- O estudo realizado para determinar a melhor família wavelet para detectar a presença do constituinte sigma, entre as famílias Daubechies, Symlets, Coiflets e Biorthogonal, apontou as db5 e bio 3.9 como as melhores. Esses resultados são para configuração com o sensor de efeito Hall posicionado na superfície oposta da bobina emissora. A aplicação dessas famílias mostra comportamento similar, ou seja, pouca variação em função da variação de frequência e valores de RMS próximos para as famílias tanto para condição com precipitado, como sem. A aplicação das famílias db5 e bio 3.9 indicam um aumento de 20 vezes na amplitude de medidas quando comparado com a aplicação do filtro passa altas.

5.1. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Diante da presente pesquisa, propõe-se para trabalhos futuros as seguintes sugestões:

- estudar o efeito da espessura das amostras;
- comparar os resultados obtidos com a utilização de outras técnicas, como decomposição empírica de modos.

5.2. TRABALHOS PUBLICADOS

- RODRIGUES, A. M; SAMPAIO, S. O.; LIMA, L. G.; CARVALHO, S. L; LEITE, J. P.; SILVA, J. P. “Harmonic analysis of electromagnetic waves for detecting embrittlement microstructures in a duplex stainless steel”, 26º Congresso Internacional de Engenharia Mecânica – COBEM, virtual, 2021.
- SILVA, J. B. O.; SILVA, E. M.; LINS, R. S. A. T.; CARVALHO, S. L.; CORREIA, S. E. N.; LEITE, J. P. “Detection of the best working region in an electromagnetic test for sigma harmful constituent analysis”, XV Congresso Internacional de Metrologia Elétrica – SEMETRO, 2023.

REFERÊNCIAS

ABDULKAREEM, M.; BAKHARY, N.; VAFAEI M.; NOOR, N. M.; MOHAMED, R. N. Application of two-dimensional wavelet transform to detect damage in steel plate structures. **Measurement**, v. 146, p. 912–923. 2019.

AHMED, Y. S; ARIF, A. F. M.; VELDHUIS, S. C. Application of the wavelet transform to acoustic emission signals for built-up edge monitoring in stainless steel machining. **Measurement**, v. 154, 2020.

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

.BARROS NETO, I. P. **Análise do Ruído Magnético de Barkhausen por Meio da Transformada Wavelet Discreta para Detecção de Microestrutura Fragilizante em Aço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba (IFPB) – João Pessoa, Paraíba, 2021.

CARVALHO FILHO, J. A. **Ensaio magnético baseado no Ruído de Barkhausen para acompanhamento de transformações microestruturais**. 2018. 61 f. Tese de Mestrado. Instituto Federal da Paraíba, João pessoa – IFPB, 2018.

CASTILHO, J. E. INTRODUÇÃO AO MUNDO DAS WAVELETS. São Carlos, SP. **SBMAC**, Notas em Matemática Aplicada, v. 62, p. 144, 2012.

CHIN, C. H.; ABDULLAH, S.; SINGH, S. S. K.; ARIFFIN, A. K.; SCHRAMM, D. Fatigue Life Modelling of Steel Suspension Coil Springs Based on Wavelet Vibration Features Using Neuro-Fuzzy Methods. **Materials**, v.16, p. 2494, 2023.

DONG, Haijiang; LIU, Xiucheng; SONG, Yahu; WANG, Bo; CHEN, Shenglai; HE, Cunfu. Quantitative evaluation of residual stress and surface hardness in deep drawn parts based on magnetic Barkhausen noise technology. **Measurement**, v. 168, 2021.

DUCHARNE, B. *et.al*. Phenomenological model of Barkhausen noise under mechanical and magnetic excitations. **IEEE Trans Magn**, v. 54, n.11, 2018. DOI

10.1109/TMAG.2018.2833419. Disponível em: <https://0.1109/TMAG.2018.2833419>. Acesso em 27 jul. 2022.

DUCHARNE, B. *et al.* Directional magnetic Barkhausen noise measurement using the magnetic needle probe method. *J Magn Magn Mater*, v. 519, p. 167453, 2021.

FRANCO GRIJALBA, F. A.; PADOVESE, L. R. Non-destructive scanning for applied stress by the continuous magnetic Barkhausen noise method. *J Magn Magn Mater*, v. 446, p. 231–238, 2018. DOI 10.1016/j.jmmm.2017.09.036. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304885317319054>. Acesso em: 20 set. 2022.

FREITAS DE SOUZA, M.; FERREIRA SERRÃO, L.; MANUEL PARDAL, J. Tempering influence on residual stresses and mechanical properties of AISI 4340 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [S. l.], p. 1123-1134, 2022.

HE, Y.; MEHDI, M.; HILINSKI, E. J.; EDRISY, A. Through-process characterization of local anisotropy of Non-oriented electrical steel using magnetic Barkhausen noise. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 453, p. 149–162, 2018. DOI 10.1016/j.jmmm.2018.01.023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.01.023>. Acesso em 20 jul. 2022.

HIZLI, H.; GÜR, C. H. Applicability of the Magnetic Barkhausen Noise Method for Nondestructive Measurement of Residual Stresses in the Carburized and Tempered 19CrNi5H Steels, *Research in Nondestructive Evaluation*, v. 29, n.4, p. 221–236, 2018. DOI 10.1080/09349847.2017.1359711. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8383691>. Acesso em: 15 de jul. 2022.

JACKSON, A.; TURNBULL, B. Identification of particle-laden flow features from wavelet decomposition. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, v. 361, p. 12-27, 2017.

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

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

of Magnetism and Magnetic Materials, v. 433, p. 131–140, 2017.

KNAK, M.; WOJTCZAK, E.; RUCKA, M. Non-Destructive Diagnostics of Concrete Beams Strengthened with Steel Plates Using Modal Analysis and Wavelet Transform. **Materials**, v.14, p. 3014, 2021.

KNITTER-PIATKOWSKA, A.; DOBRZYCKI, A. Application of Wavelet Transform to Damage Identification in the Steel Structure Elements. **Licensee MDPI, Basel, Switzerland**, 2020.

LI, J.; DU, C. W.; LIU, Z. Y.; LI, X. G.; LIU, M. Effect of microstructure on the corrosion resistance of 2205 duplex stainless steel. Part 2: Electrochemical noise analysis of corrosion behaviors of different microstructures based on wavelet transform. **Construction and Building Materials**, v.189, p. 1294–1302, 2018.

LI, Z. *et al.* Magnetic Barkhausen Noise Technique for Early-Stage Fatigue Prediction in Martensitic Stainless-Steel Samples. **J Nondestruct Eval Diagn Progn Eng Syst**, v. 4, n.4, 2021.

LI, D.; NIE, J.; REN, W.; NG, W.; WANG, G.; WANG, Y. A novel acoustic emission source location method for crack monitoring of orthotropic steel plates. **Engineering Structures**, v.253, 2022.

LINS, R. S. A. T. **Ensaio Eletromagnético para Análise do Ruído de Barkhausen por Meio de um Sensor de Campo Magnético**. 2010. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba (IFPB) – João Pessoa, Paraíba, 2021

MEHTA, M. *et al.* Effect of Solution Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of 2205 Duplex Stainless Steel; **International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing**, v. 7, n. 6, 2019.

MORGAN, M. A. C. **Ruído Magnético de Barkhausen contínuo rotacional**. 2013. 149p. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

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, p. 3–8, 2006.

NESLUSAN, M. *et al.* Barkhausen noise emission in Fe-resin soft magnetic composites,

Slovakia; **Czech Republic**, v.525, p. 167683, 2021.

NORIS, L. F. *et al.* Continuous scanning technique with barkhausen magnetic noise for carbon steel sheets. **Materials Research**, v. 22, p.22, 2019.

OLIVEIRA, A. V. G. **Ensaio Eletromagnético para Detecção de Fase Sigma em Aços Inoxidáveis Duplex**. 2016. 102 f. Tese de Mestrado. Instituto Federal da Paraíba, João pessoa – IFPB, 2016.

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.

REIS, A. J. R.; SILVA, A. P. A. Aplicação da Transformada Wavelet Discreta na Previsão de Carga a Curto Prazo Via Redes Neurais”. [Online]. **SBA: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automação** [online], v. 15, n. 1, p. 101-108, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-17592004000100013>. Acesso em: 20 maio 2022.

RYU, S.; KOO, G.; KIM, S. W. An Adaptive Selection of Filter Parameters: Defect Detection in Steel Image Using Wavelet Reconstruction Method. **ISIJ International**, v. 60, n. 8, p. 1703–1713, 2020.

SAHA, I.; SAGAR, R. V. Classification of the acoustic emissions generated during the tensile fracture process in steel fibre reinforced concrete using a waveform-based clustering method. **Construction and Building Materials**, v.294, p. 123541, 2021.

SAMIMI, A. A., KRAUSE, T. W., CLAPHAM. L., *Multi-parameter Evaluation of Magnetic Barkhausen Noise in Carbon Steel*. **J Nondestruct Eval**. p. 35-40, 2016.

SANTOS, C.; FREIRE, P.; TORRENCE, C. A Transformada Wavelet e sua Aplicação na Análise de Séries Hidrológicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 271–280, 2013. DOI 10.21168/rbrh.v18n3.p271-280. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/2897>. Acesso em: 14 set. 2022.

SERNA-GIRALDO, C. P.; PADOVESE, L. R. Monitoring of carbon steels welded joints by magnetic Barkhausen noise Monitoreo de uniones soldadas de acero al carbono usando el ruido magnético de Barkhausen. **Revista Chilena de Ingeniería**, v. 23, n. 3, p. 413-420, 2015.

SILVA, M.; OLESKOVICZ, M.; COURRY, D. V. Uma Nova Ferramenta Baseada na Transformada Wavelet para Localização Digital de Faltas. **SBA: Controle & Automação**

Sociedade Brasileira de Automação [online], v. 16, n. 3, p. 345-358., 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-17592005000300007>. Acesso em: 10 jun. 2022.

SILVA, E. de Macedo et al. Induced Magnetic Field Used to Detect the Sigma Phase of a 2205 Duplex Stainless Steel. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 35, n. 2, p. 1–10, 2016b.

SILVA, E.M.S.; Leite, J.P.; França Neto, F.A.; Leite, J.P.; Fialho, W.M.L.; Albuquerque, V.H.C.; Tavares, J.M.R.S. Evaluation of the Magnetic Permeability for the Microstructural Characterization of a Duplex Stainless Steel. **J. Test. Eval**, v.44, p.3, 2016.

TAVARES, S. S. M., PARDAL, J. M., GUERREIRO, J. L., GOMES, A. M., DA SILVA, M. R., Magnetic detection of sigma phase in duplex stainless steel UNSS 31803, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. v. 322, p. 29–33, 2010.

TAVARES, S. S. M. *et.al.* Temper embrittlement of supermartensitic stainless steel and non destructive inspection by magnetic Barkhausen noise. **Eng Fail Anal**, [Canadá], v. 100, p. 322–328, 2019. DOI 10.1016/j.engfailanal.2019.02.034. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.02.034>. Acesso em: 22 jul. 2022.

VIEGAS, I. L. **Estudo do uso de onda emissora senoidal para geração do ruído de Barkhausen com amostras circulares de diferentes espessuras**. 2019. 58f. 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.

YAZDANPANA O.; MOHEBI, B.; KAZEMI, F.; MANSOURI, I.; JANKOWSKI, R. Development of fragility curves in adjacent steel moment-resisting frames considering pounding effects through improved. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v.173, 2022.

ZANIOL, C. **Previsão da Inflação através de Wavelets e Redes Neurais**. 2021. 159 p. Tese (Doutorado em Matemática Aplicada) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ZHANG, Z.; LI, X.; ZHAO, Z.; BAI, P.; LIU, B.; TAN, B.; WU, X. In-situ monitoring of pitting corrosion of Q235 carbon steel by electrochemical noise: Wavelet and recurrence quantification analysis. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v.879, p. 114776, 2020.