



**José Adeilton de Carvalho Filho**

**ENSAIO ELETROMAGNÉTICO BASEADO NO RUÍDO DE BARKHAUSEN  
PARA ACOMPANHAMENTO DE TRANSFORMAÇÕES  
MICROESTRUTURAIS**

**João Pessoa - PB  
Março de 2018**



**José Adeilton de Carvalho Filho**

**ENSAIO ELETROMAGNÉTICO BASEADO NO RUÍDO DE BARKHAUSEN  
PARA ACOMPANHAMENTO DE TRANSFORMAÇÕES  
MICROESTRUTURAIS**

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: Eletromagnetismo Aplicado

Edgard de Macedo Silva, Dr, IFPB  
Orientador:

João Pessoa – PB, Março de 2018  
José Adeilton de Carvalho Filho, [adeiltoncarvalho87@yahoo.com.br](mailto:adeiltoncarvalho87@yahoo.com.br)

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

C331e Carvalho Filho, José Adailton.  
Ensaio eletromagnético baseado no ruído de Barkhausen  
para acompanhamento de transformações microestruturais /  
José Adailton Carvalho Filho. – 2018.  
61 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto  
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB /  
Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2018.  
Orientador: Profº. Edgard de Macedo Silva.

1. Eletromagnetismo. 2. Engenharia elétrica. 4. Ruído de  
Barkhausen. 5. Ensaios eletromagnéticos. I. Título.

CDU 537.8

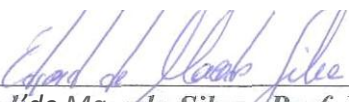
Ivanise Andrade M. de Almeida  
Bibliotecária-Documentalista  
CRB-15/0096


**ENSAIO ELETROMAGNÉTICO BASEADO NO RUÍDO DE BARKHAUSEN  
PARA ACOMPANHAMENTO DE TRANSFORMAÇÕES  
MICROESTRUTURAIS**

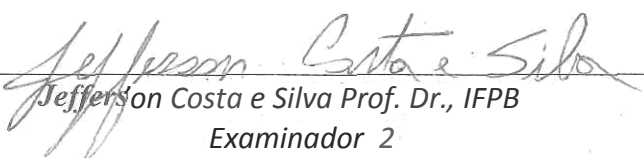
Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

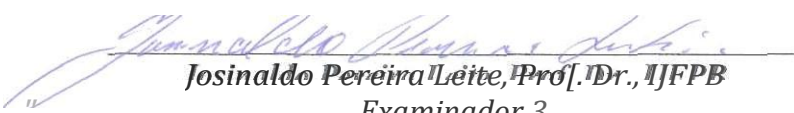
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 27/03/2018.

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
**Edgard de Macedo Silva, Prof. Dr., IFPB**  
**Orientador**

  
\_\_\_\_\_  
**Alfredo Gories Peto Prof. Dr., IFPB**  
**Examinador 1**

  
\_\_\_\_\_  
**Jefferson Costa e Silva Prof. Dr., IFPB**  
**Examinador 2**

  
\_\_\_\_\_  
**Josinaldo Pereira Leite, Prof. Dr., IFPB**  
**Examinador 3**

## **AGRADECIMENTOS**

Eu quero agradecer primeiramente a toda minha família, pelo apoio necessário durante esse desafio grandioso na minha vida como também ao meu orientador o professor Edgard de Macedo Silva pela sua dedicação durante toda minha pesquisa.

Ao grupo GSCMAT do IFPB eu agradeço ao privilégio de fazer parte dessa equipe que contribuí para o meu enriquecimento e aprimoramento na vida acadêmica.

Ao IFPB e ao CNPq pelo suporte financeiro, bem como pela bolsa de mestrado (IFPB).

*“ Gosto daquilo que me desafia.  
O fácil nunca me interessou. Já  
o obviamente impossível sempre  
me atraiu, e muito. ”*

*Clarice Lispector.*

## RESUMO

O ruído de Barkhausen é utilizado em ensaios eletromagnéticos para acompanhamento de fases em materiais ferromagnéticos. Esse ruído é gerado da interação de uma onda emitida por uma bobina e uma induzida em outra posicionada no material. As características da onda emitida como frequência e amplitude e da bobina receptora variam nesses experimentos e dificultam a padronização. No presente trabalho é realizado um estudo para determinação da frequência e amplitude ideais da onda emissora capaz de gerar o ruído Barkhausen, ao passar numa microestrutura formada de precipitados finamente distribuídos dentro do material. Esta onda ideal é em seguida utilizada para acompanhar o endurecimento e capacidade de absorver energia por impacto de um aço inoxidável duplex, na temperatura de fragilização de 475 °C, por tempos de tratamentos até 100 horas. Ondas emisoras com frequência de 5, 25, 75 e 100 Hz e amplitudes de 1, 3, 5, 7 e 9 V foram utilizadas. Medidas de raiz média quadrática foram utilizadas como parâmetro de medição do ruído de Barkhausen. Os sinais obtidos na bobina leitora foram passados para o domínio da frequência e utilizados por diferentes filtros passa alta. Os resultados foram correlacionados com medidas de dureza Rockwell C e energia absorvida por impacto. A configuração utilizada mostrou ser capaz de registrar o ruído de Barkhausen e uma onda emissora de frequência de 5 Hz e amplitude de 3 V foi determinada entre as estudadas como ideal. Esta onda, ao ser aplicada para acompanhamento do endurecimento do aço inoxidável mostrou ter valores de RMS crescentes no primeiro estágio de endurecimento, maior taxa, e decrescer no segundo de menor taxa, refletindo que o efeito paramagnético da fase formada reduz os efeitos de RMS no segundo estágio. Além disso, foi capaz de acompanhar a redução da energia absorvida por impacto das amostras estudadas. Tudo isso mostrando que os valores de medida de RMS podem ser utilizados como parâmetro para acompanhamento de precipitados finos dentro do material estudado.

Palavras- Chave: fase  $\alpha'$ . ruído de Barkhausen. frequência ideal

## ABSTRACT

Barkhausen noise is used in electromagnetic tests to monitor phases in ferromagnetic materials. This noise is generated from the interaction of a wave emitted by one coil and one induced in another positioned in the material. The characteristics of the emitted wave as frequency and amplitude and of the receiving coil vary in these experiments and they make difficult the standardization. In the present work, a study is carried out to determine the ideal frequency and amplitude of the emitting wave capable of generating the Barkhausen noise, when passing through a microstructure formed of finely distributed precipitates inside the material. This ideal wave is then used to follow the hardening and capacity to absorb energy by impact of a duplex stainless steel, at the embrittlement temperature of 475 ° C, for treatment times up to 100 hours. Emitter waves with frequencies of 5, 25, 75 and 100 Hz and amplitudes of 1, 3, 5, 7 and 9 V were used. Measurements of the mean square root were used as a measurement parameter of Barkhausen noise. The signals obtained in the reader coil were passed to the frequency domain and different high pass filters were used. The results were correlated with measurements of Rockwell C hardness and energy absorbed by impact. The configuration used showed to be able to detect the noise of Barkhausen and a frequency emitting wave of 5 Hz and amplitude of 3 V was determined among those studied as the ideal one. This wave, when applied to follow the hardening of the stainless steel showed to have increasing RMS values in the first hardening stage, higher rate, and decreasing in the second of lower rate, reflecting that the paramagnetic effect of the formed phase reduces the effects of RMS in the second stage. In addition, it was able to monitor the reduction of the energy absorbed by impact of the samples studied. All this showing that the values of RMS measurement can be used as a parameter for the monitoring of fine precipitates within the studied material.

Keywords: phase  $\alpha'$ . noise of Barkhausen. ideal frequency



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 -	Curva de magnetização para um material ferromagnético com as orientações dos domínios magnéticos.....	18
Figura 2.2 -	Curva de magnetização para um material ferromagnético com as três regiões .....	19
Figura 2.3 -	Variação da permeabilidade magnética, dureza e largura de meia altura para a amostra de material envelhecido a 475 ° C.....	20
Figura 2.4 -	Princípio de funcionamento de um ferritoscópio.....	21
Figura 2.5 -	a) Aparato experimental para detecção do ruído de Barkhausen. b) Curva tensão contra tempo. c) Curva de magnetização esquemática.....	22
Figura 2.6 -	Equipamento de ensaio de Barkhausen.....	24
Figura 2.7 -	Influência do tamanho de grão nas medidas de ruído magnético de Barkhausen.....	26
Figura 2.8 -	Efeito da deformação nas medidas de ruído magnético de Barkhausen e coercividade em aço inoxidável ferrítico.....	27
Figura 2.9 -	Equipamento clássico de ensaio Barkhausen (a) e amostra utilizada para análise do eixo de fácil magnetização do material (b).....	27
Figura 2.10 -	Microestrutura típica de um aço inoxidável duplex SAF2205.....	28
Figura 2.11 -	Diagrama de precipitação de um aço inoxidável duplex SAF 2205.....	29
Figura 2.12 -	Precipitado de $\alpha'$ em uma amostra de aço inoxidável duplex.....	30
Figura 3.1 -	Esquema do ensaio a ser realizado.....	31
Figura 3.2 -	Desenho esquemático do experimento realizado.....	32
Figura 3.3 -	Bancada experimental.....	33
Figura 3.4 -	Forno tipo mufla a ser utilizado no envelhecimento das amostras.....	34
Figura 3.5 -	Amostra de aço inoxidável duplex SAF 2205.....	35
Figura 3.6 -	Microscópio óptico.....	37

Figura 4.1 -	Microestrutura obtida por microscopia óptica do material como recebido (ataque Behara) .....	39
Figura 4.2 -	Onda triangular com frequência de 5 Hz e valor de tensão RMS de 0,81293 mV, para amostras com precipitados.....	41
Figura 4.3 -	Onda senoidal com frequência de 5 Hz e valor de tensão de RMS de 0,692614 mV, para amostras com precipitados.....	41
Figura 4.4 -	Onda quadrada com frequência de 5 Hz e valor de tensão RMS de 0,7636 mV, para amostras com precipitados.....	41
Figura 4.5 -	Variação do valor RMS da onda, em função da amplitude e frequência da onda aplicada para a condição sem precipitados.....	43
Figura 4.6 -	Transformada de Fourier dos sinais das ondas com frequência de 100 Hz e amplitudes de 5 V e 7 V.....	44
Figura 4.7 -	Variação do valor RMS da onda, em função da amplitude e frequência da onda aplicada para a condição com precipitados formados.....	46
Figura 4.8 -	Medidas do valor RMS, para amostras com e sem precipitados, em função das ondas com frequências de 5 Hz e 25 Hz e diferentes amplitudes.....	47
Figura 4.9 -	Medidas do valor RMS, para amostras com e sem precipitados, em função das ondas com frequências de 5 Hz e 50 Hz e diferentes amplitudes.....	47
Figura 4.10 -	Medidas do valor RMS, para amostras com e sem precipitados, em função das ondas com frequências de 5 Hz e 75 Hz e diferentes amplitudes.....	48
Figura 4.11 -	Medidas do valor RMS, para amostras com e sem precipitados, em função das ondas com frequências de 5 Hz e 100 Hz e diferentes amplitudes.....	48
Figura 4.12 -	Variação dos valores de RMS em função do filtro passa altas, na aplicação de ondas de frequência de 100 Hz, em uma amostra sem precipitados.....	49
Figura 4.13 -	Influência dos filtros passa altas de 3 kHz e 4 kHz, nos valores de RMS para ondas aplicadas com frequência de 5 Hz e diferentes amplitudes.....	50
Figura 4.14 -	Variação do ruído de Barkhausen em função do tempo para amostras tratadas na temperatura de 475 ° C e aplicação de ondas com a frequência de 5 Hz e amplitudes de 3 V e 5 V.....	51

Figura 4.15 - Transformada de Fourier dos sinais resultantes da aplicação da onda com frequência de 5 Hz e amplitude 3 V, nas amostras tratadas na temperatura de 475 °C.....	52
Figura 4.16 - Medidas do valor RMS e dureza Rockwell C, em função do tempo de tratamento de amostras de um aço inoxidável duplex na temperatura de 475 °C.....	54
Figura 4.17 - Medidas do valor RMS e energia absorvida por impacto, em função do tempo de tratamento de amostras de um aço inoxidável duplex na temperatura de 475° C.....	54

## **LISTA DE TABELA**

Tabela 3.1 - Composição do AID SAF 2205 como recebido, em % de peso.....	33
--------------------------------------------------------------------------	----

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A -	Ampere
AISI -	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Al -	Alumínio
B -	Densidade de fluxo magnético
C -	Carbono
Ce -	Cério
Cr -	Cromo
Cu -	Cobre
DRX -	Difração de raios X
END -	Ensaio não-destrutivo
Fe -	Ferro
H -	Intensidade de campo magnético
Hz -	Hertz
Mn -	Manganês
MO -	Microscopia óptica
Mo -	Molibdênio
N -	Nitrogênio
Nb -	Nióbio
Ni -	Níquel
S -	Enxofre
Si -	Silício
Sn -	Estanho
SAF -	<i>Sandvik Austenitic Ferritic</i>
UNS -	<i>Unified Numbering System</i>
V -	Volt
$\alpha'$ -	Precipitados rico em Cromo
$\alpha$ -	Precipitados pobre em Cromo

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1	OBJETIVO GERAL.....	17
1.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	17
2	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
2.1	CURVA DE MAGNETIZAÇÃO.....	18
2.2	Ensaio eletromagnéticos.....	20
2.2.1	Ruído magnético de Barkhausen.....	21
2.2.2	Parâmetros de análise.....	24
2.2.3	Fatores que geram o ruído de Barkhausen.....	25
2.3	AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX.....	28
3	<b>MATÉRIAS E MÉTODOS</b> .....	31
3.1	BANCADA DE TESTE.....	31
3.2	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	33
3.3	PARAMETRO DE MEDIÇÃO DO RUÍDO DE BARKHAUSEN.....	35
3.4	DETERMINAÇÃO DA FORMA DA ONDA A SER UTILIZADA.....	36
3.5	DETERMINAÇÃO DA ONDA IDEAL PARA OBTENÇÃO DO RUÍDO DE BARKHAUSEN.....	36
3.6	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	36
3.6.1	Microscopia ótica (MO).....	37
3.6.2	Ensaio de dureza.....	38

3.6.3	Ensaio de impacto.....	38
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>39</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL COMO RECEBIDO.....	39
4.2	DETERMINAÇÃO DA FORMA DA ONDA A SER UTILIZADA.....	40
4.3	DETERMINAÇÕES DA FREQUÊNCIA E AMPLITUDE DA ONDA IDEAL.....	42
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>55</b>
5.1	<b>PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>57</b>
	REFERÊNCIAS.....	58

## 1. INTRODUÇÃO

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. Este ruído deve-se aos saltos abruptos devido ao desprendimento das paredes dos domínios ao passarem por pontos de ancoragem como contornos de grãos, discordâncias, heterogeneidades ou outras imperfeições. Esta superação das paredes de domínio sobre esses pontos produzem saltos discretos na indução magnética, gerando pulsos magnéticos conhecidos como ruído magnético de Barkhausen (GRIJALBA, 2010; PRAXEDES, 2012).

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 magnetizantes, bem como características da bobina receptora como forma e frequência de reposta, que resultam em diferenças no sinal do ruído recebido (BLAŽEK et al., 2016).

Aspectos microestruturais como o aumento de tamanho de grão e deformação tem o efeito de reduzir e aumentar o ruído de Barkhausen, respectivamente (KTENA et al., 2014). O primeiro pela redução da quantidade de contornos que diminuem o bloqueio ao movimento das paredes dos domínios magnéticos e o segundo pelo aumento desse devido à presença das discordâncias geradas pela deformação. A formação de fases secundárias aumenta as tensões internas nos materiais e aumenta o ruído da Barkhausen (GHANEI; KASHEFI; MAZINANI, 2014).

Ensaio não destrutivo baseado na análise do ruído da Barkhausen vêm sendo utilizados para acompanhamento de fases e análise de anisotropia magnética de materiais (SILVA et al., 2016). Contudo, a capacidade de um ponto de ancoragem dificultar o movimento das paredes dos domínios magnéticos depende de fatores como tamanho e distribuição desses pontos. Fases formadas em pontos localizados dificultam menos que fases uniformemente distribuídas dentro do material. A primeira situação tem uma probabilidade menor de ser encontrada pelas paredes dos domínios do que a segunda.



Este trabalho estuda o efeito da presença de precipitados finamente distribuídos dentro do material, na geração de ruídos de Barkhausen, devido à interação entre diferentes ondas geradas por um solenoide emissor e o material estudado. A onda emitida percorre o material e uma bobina posicionada depois do material e capta a onda induzida nesta com o auxílio de osciloscópio. As características da onda emissora para geração do ruído de Barkhausen foi estudada pela aplicação dessas com diferentes frequências e amplitudes. Uma onda na região ideal de geração desse ruído foi utilizada para acompanhamento de precipitados finos em um material e comparado com suas propriedades de endurecimento e tenacidade. Um aço inoxidável duplex foi escolhido para esse estudo, pois quando submetidos a aquecimentos para temperaturas abaixo de 600<sup>o</sup> C e tempos inferiores a 200 horas, apresenta a formação de precipitados finamente distribuídos de uma fase nanométrica denominada de  $\alpha'$ .

A seguir são apresentados os objetivos geral e específicos do presente trabalho.

## **1.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo deste trabalho é estudar o ruído da interação entre aplicação de diferentes ondas e um material, com a formação de precipitados finamente distribuídos, para obter informações para desenvolver um ensaio eletromagnético capaz de acompanhar a formação de fases.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar o intervalo de valores da frequência e amplitude ideais, para que uma onda emissora produza o ruído de Barkhausen.
- Determinar as características de uma onda capaz de acompanhar a formação de precipitados em um aço inoxidável duplex, através de medidas do ruído de Barkhausen.
- Correlacionar as medidas do ruído de Barkhausen com o endurecimento e energia absorvida de um aço inoxidável duplex.
- Publicar os resultados.

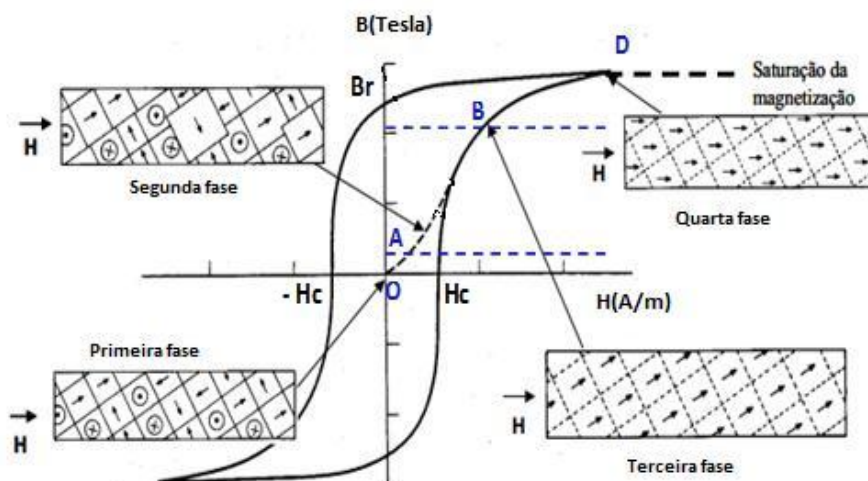
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CURVA DE MAGNETIZAÇÃO

A curva de magnetização da Figura 2.1 mostra o processo de magnetização para um material ferromagnético. Trata-se do gráfico entre densidade de fluxo magnético ( $B$ ) e intensidade de campo magnético ( $H$ ). Suas unidades no SI são Tesla e A/m, respectivamente.

A Figura 2.1 mostra o comportamento dos domínios magnéticos quando exposto a uma intensidade de campo magnético externo. Quatro fases dos comportamentos dos domínios magnéticos são apresentadas na curva de magnetização. Na primeira fase o material está no seu estado normal sem aplicação de intensidade de campo magnético externo, apresentando assim todos os domínios magnéticos aleatoriamente distribuídos. Na segunda fase, as paredes dos domínios iniciam sua movimentação devido à aplicação do campo magnético externo. Na terceira, os domínios estão orientados na direção de fácil magnetização. Em seguida, na quarta fase, os domínios estão orientados no sentido do campo magnético externo (FARIAS, 2005).

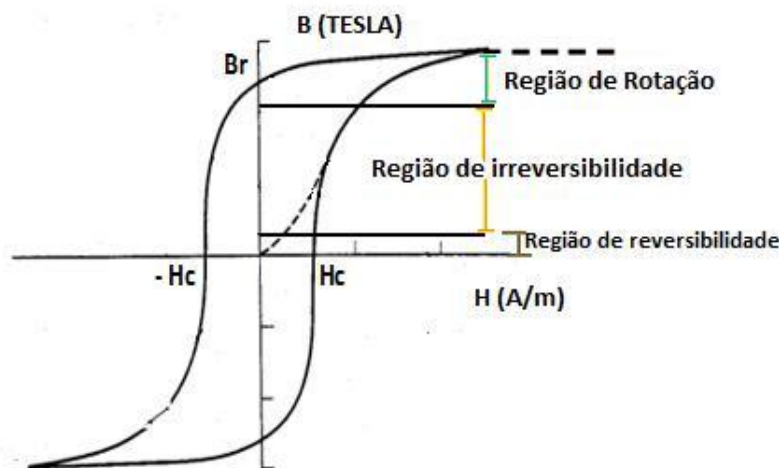
**Figura 2.1 - Curva de magnetização para um material ferromagnético com as orientações dos domínios magnéticos**



Fonte: adaptado de LEITE, 2014

A curva de magnetização se divide em três regiões como visto na Figura 2.2, que são a região de reversibilidade, de irreversibilidade e de rotação (adaptado de LEITE, 2014).

Figura 2.2 - Curva de magnetização para um material ferromagnético com as três regiões



Fonte: adaptado de LEITE, 2014

Na região de reversibilidade, o material é exposto a um campo magnético relativamente pequeno, pois está apenas no início da magnetização. Nesta região o campo aplicado provoca a movimentação das paredes dos domínios magnéticos e com a sua retirada os domínios não formam um magnetismo residual, o movimento das paredes dos domínios é reversível (FARIAS, 2005).

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 (PELIZZARI, 2010). Quando o campo magnético é removido, nessa região ocorre um magnetismo residual devido o movimento das paredes dos domínios ser cessado pelos pontos de ancoragem. 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.

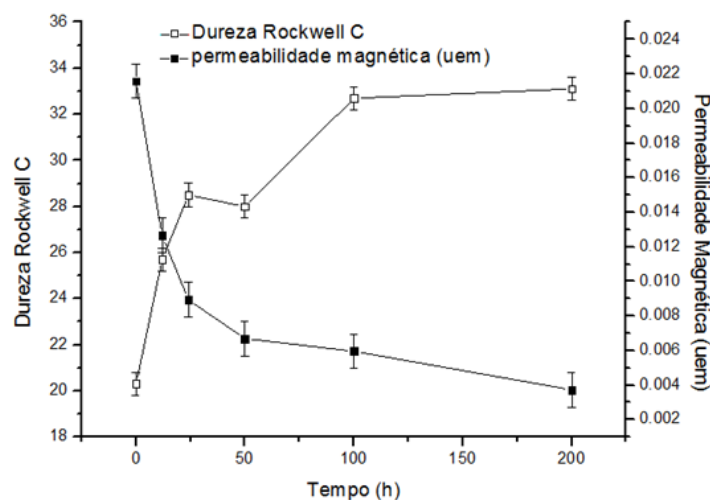
A seguir são apresentados dois ensaios eletromagnéticos utilizados para estudo entre interação entre campo magnético externo e precipitados finos em um aço

inoxidável duplex. Depois é descrito como é gerado o ruído de Barkhausen e os fatores microestruturais que produzem o ruído.

## 2.2 ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS

Silva (2016) apresentou uma técnica para acompanhamento de precipitados finamente dispersos formados em um aço inoxidável duplex UNS S31803. Esse aplicou intensidades de campos magnéticos geradas por corrente contínua em um material. Os valores desses campos foram produzidos na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos. A intensidade de campo magnético foi gerada por um solenoide e o campo magnético induzido resultante da interação foi medido através de um sensor de efeito Hall. Amostras de um aço duplex UNS S31803 foram submetidas a tratamentos de envelhecimento térmico nas temperaturas de 425°C e 475°C para tempos de 0 a 200 horas, onde as condições térmicas são favoráveis ao aparecimento da fase fragilizante  $\alpha'$  (alfa linha). Os resultados obtidos na temperatura de 475°C mostram que os valores de permeabilidade magnética reduzem com o aumento do tempo de envelhecimento e o endurecimento do material, conforme visto na Figura 2.3. Isto se deve à formação dos precipitados finamente dispersos dificultarem a movimentação das paredes dos domínios magnéticos. Quando os precipitados estão completamente formados, os valores tendem a se estabilizar em um patamar.

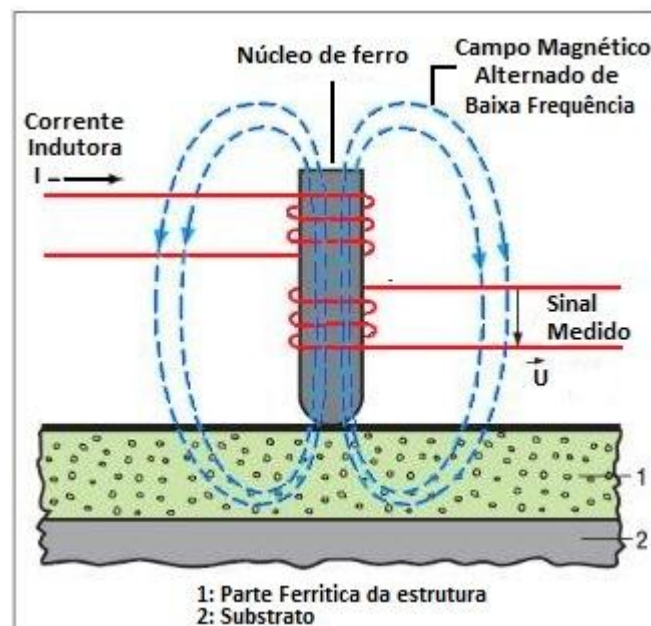
**Figura 2.3 – Variação da permeabilidade magnética, dureza e largura de meia altura para a amostra de material envelhecido a 475 ° C**



Fonte: SILVA et al., 2016

Pardal (2009) estudou também o efeito da formação de precipitados finos na permeabilidade de um aço inoxidável duplex UNS S31803. As medidas foram realizadas através de um aparelho denominado de ferritoscópio. Este é um aparelho que emprega um campo magnético para determinar a quantidade de ferrita (fase ferromagnética) presente na amostra (TAVARES, 2006). A medição desse equipamento é baseada no método da indução magnética. De acordo com (TAVARES, 2006) um campo magnético gerado por uma bobina interage com as fases magnéticas da amostra. As mudanças no campo magnético induzem uma tensão proporcional à quantidade de fase ferromagnética em uma bobina secundária. A Figura 2.4 mostra a configuração de um ferritoscópio (BORBA, 2009). (SILVA et al., 2016) e (PARDAL, 2009) obtiveram resultados semelhantes ao estudarem o mesmo material, ou seja, os valores de permeabilidade reduziram com o aumento de precipitados nanométricos formados.

Figura 2.4 – Princípio de funcionamento de um ferritoscópio



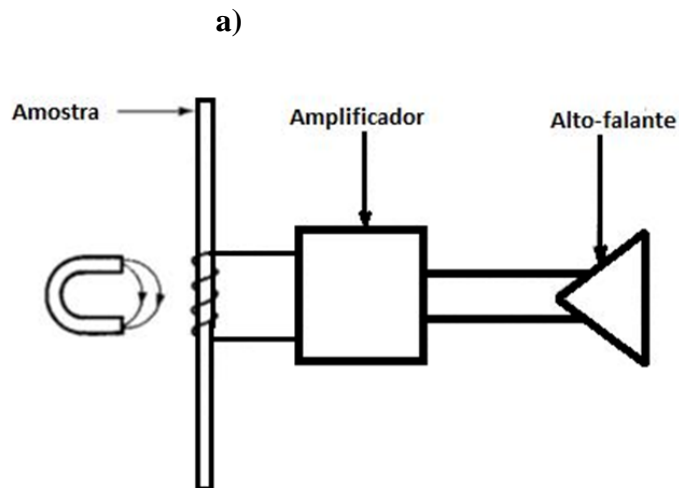
Fonte: HELMUT, 2006

### 2.2.1 Ruído magnético de Barkhausen

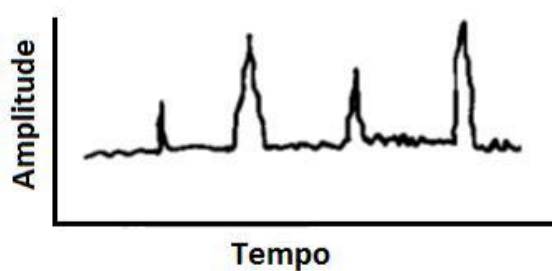
Em 1919, o engenheiro eletrônico alemão Heinrich George Barkhausen, descreveu o resultado de sua experiência que ficou conhecida como Efeito Barkhausen. Este fenômeno pode ser demonstrado pelo experimento apresentado na Figura 2.5 a. Nesta, uma bobina é enrolada em uma amostra e conectada a um amplificador e a um

alto falante. Depois a amostra é submetida a um campo magnético contínuo e suave. Nessa experiência foi observado que o suave aumento contínuo no campo magnético aplicado a um material ferromagnético provoca saltos na magnetização, que são percebidos como sons distintos em um alto falante (Figura 2.5 a). Caso a bobina seja conectada a um osciloscópio, no lugar do alto falante, picos serão observados na curva tensão contra tempo, como mostrado na Figura 2.5 b. Estes picos de tensão são conhecidos como ruído de Barkhausen. O campo magnético induzido na bobina não é contínuo em função do tempo e mostra mudanças descontínuas. Isto pode ser observado na Figura 2.5 c, onde uma parte da curva foi ampliada. Este comportamento serrilhado deve-se a presença do ruído de Barkhausen (CULLITY, 2009).

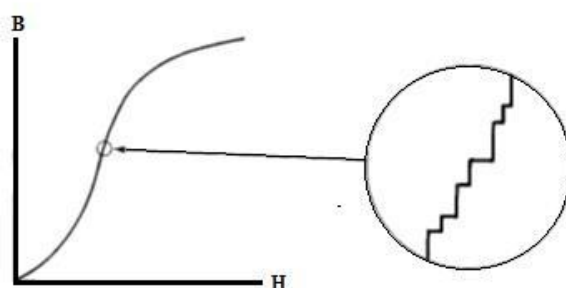
**Figura 2.5 - a) Aparato experimental para detecção do ruído de Barkhausen. b) Curva tensão contra tempo. c) Curva de magnetização esquemática**



b)



c)



Fonte: CULLITY, 2009

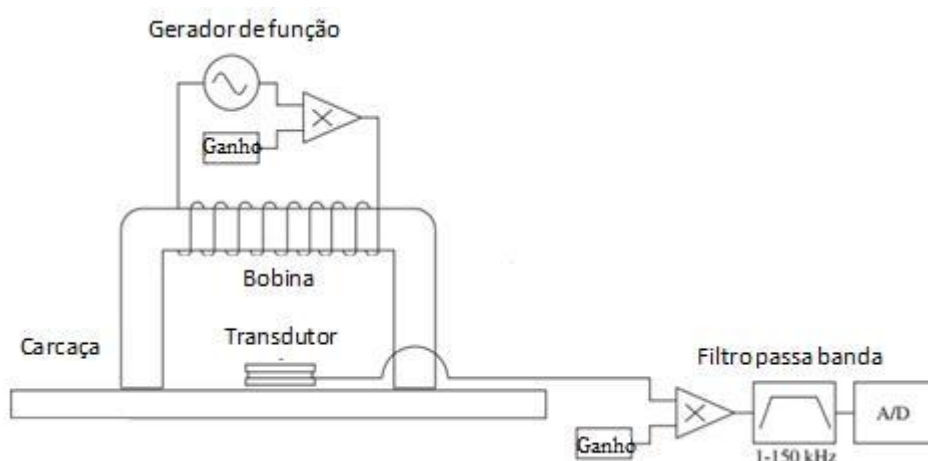
O efeito Barkhausen é o ruído provocado pela tentativa de desprendimento dos domínios da microestrutura do material (NORMANDO, 2010). Quando um campo magnético é aplicado em materiais ferromagnéticos, as paredes dos domínios magnéticos movem-se descontinuamente, a depender das características microestruturais do mesmo, tais como contornos de grão, trincas, presença de partículas não magnéticas, e até mesmo o seu grau de deformação (CALDAS-MORGAN et al., 2012; PEREZ-BENITEZ et al., 2013). Esse movimento pode ser captado em forma de tensão, o que se chama ruído Barkhausen, e tem se tornado uma técnica de ensaio END muito importante, devido sua simplicidade e precisão (KIM et al., 2003).

Um equipamento clássico de ensaio Barkhausen pode ser visualizado na Figura 2.6 (CALDAS-MORGAN et al, 2012). Nessa figura, um gerador de onda produz através da bobina de excitação um campo magnético alternado sobre a amostra e uma bobina leitora, que serve para detectar o ruído magnético de Barkhausen. Mudanças geradas na magnetização durante o movimento das paredes dos domínios magnéticos induz pulsos elétricos na bobina (transdutor). Depois esse sinal é processado e analisado (CALDAS-MORGAN et al., 2012).

A configuração da Figura 2.6 tem como principais variáveis a característica da onda gerada pelo gerador de funções e a disposição do transdutor em relação à bobina de excitação. Segundo (MOORTHY, 2016), a frequência da onda de excitação pode ser dividida em pequena (0,4 Hz), média (20 Hz) e alta como sendo 125 Hz. Contudo, (VASHISTA; MOORTHY, 2013) obtiveram em seus experimentos que a faixa de frequência da onda para produzir o ruído de Barkhausen deve ficar na região de 4 a 32

kHz. Contudo, vários trabalhos (ROCÍO et al., 2015, WANG et al., 2013, KTENA et al., 2014, ASTUDILLO et al., 2015, GHANEI; KASHEFI; MAZINANI, 2014) usam com frequências até 10 Hz. O método do ruído de Barkhausen, apesar de ser utilizado na indústria, ainda não foi normalizado devido à diversidade de dispositivos existente e suas variedades nas frequências e amplitude da onda de excitação e tipos de bobinas utilizadas.

**Figura 2.6 - Equipamento de ensaio de Barkhausen**



**Fonte: adaptado de CALDAS-MORGAN et al, 2012**

A outra variável no experimento do ruído de Barkhausen é a disposição da bobina leitora em relação à de excitação. O ruído pode ser lido com uma bobina ou duas. A leitura com duas bobinas em série facilita o cancelamento do componente da frequência magnetizante e deixa somente o ruído de Barkhausen. Um método alternativo é usar um núcleo de ferrita na bobina de detecção. Este irá funcionar com um amplificador de campo magnético (MOSES; PATEL; WILLIAMS, 2006).

### 2.2.2 Parâmetros de análise

Ruídos de interação entre densidade de fluxo magnético e material como o de Barkhausen são de natureza estocástica, de modo que análises estatísticas são necessárias para sua interpretação. Alguns parâmetros de análises que são frequentemente usados para análise do ruído de Barkhausen são apresentados a seguir.



O RMS (raiz média quadrática) é fácil de medir e é o parâmetro mais comumente utilizado para obter dados do sinal analisado, ele é obtido através da Equação 2.1:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2} \quad (2.1)$$

onde N = número de elementos na sequência de entrada e  $x_i$  é a amplitudes do sinal. O parâmetro RMS representa o valor médio do somatório das amplitudes do ruído.

O Espectro de Potência leva em consideração os picos que ocorrem simultaneamente, bem como a contribuição de picos de diferentes magnitudes. O espectro de potência é calculado da seguinte forma:

$$S_K(f) = X_K \cdot X_K^{compl. conj.} = |X_K(f)|^2 \quad (2.2)$$

Onde  $X_k(f) = FFT(X_k)$  e k é o índice da componente de frequência (harmônica) para a qual a potência foi calculada.

A curtose é um parâmetro que descreve o aguçamento de uma distribuição de ruído em relação a uma distribuição normal. A curtose é calculada a partir da Equação 2.3.

$$\sigma^4 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (X_i - \mu)^4 \quad (2.3)$$

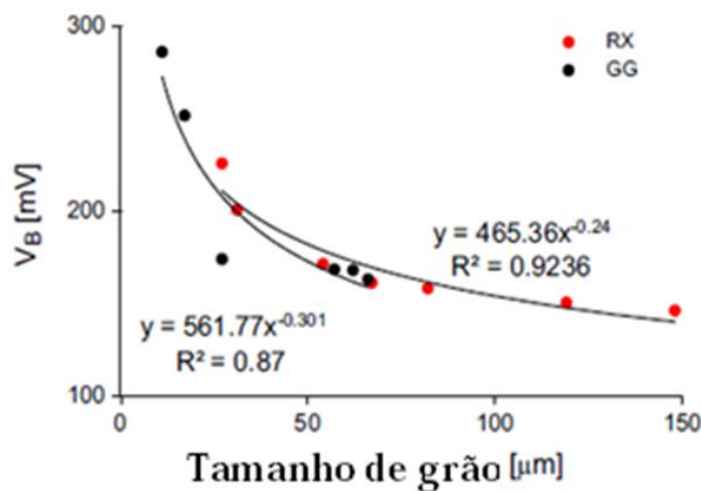
Onde N é o número de elementos em  $X_i$  e  $\mu$  representa o valor médio da sequência.

### 2.2.3 Fatores que geram o ruído de Barkhausen

O ruído de Barkhausen é gerado a partir da interação entre o movimento das paredes dos domínios magnéticos e a microestrutura do material. Esse está relacionado à composição química do material, fases, anisotropia, impurezas, tensões residuais, densidade de discordâncias e tamanho de grão (KTENA et al., 2014).

A Figura 2.7 mostra o efeito do tamanho de grão nas medidas de ruído de Barkhausen de dois materiais RX e GG, as duas amostras são de aços silício laminados a frio, o RX tem espessura variável e é recozida a 760 ° C por 2 h para obter granulometrias de 27-148 μm por recristalização, o material GG possui 540 μm espessura, é recozido em diferentes temperaturas e intervalos de tempo para atingir o crescimento de grãos. Segundo KTENA et al., (2014), o ruído magnético diminui à medida que o tamanho de grão das series de materiais RX e GG crescem. Isto se deve a redução do efeito de ancoragem dos contornos de grão, que diminuem com o aumento do tamanho de grão.

**Figura 2.7 - Influência do tamanho de grão nas medidas de ruído magnético de Barkhausen**



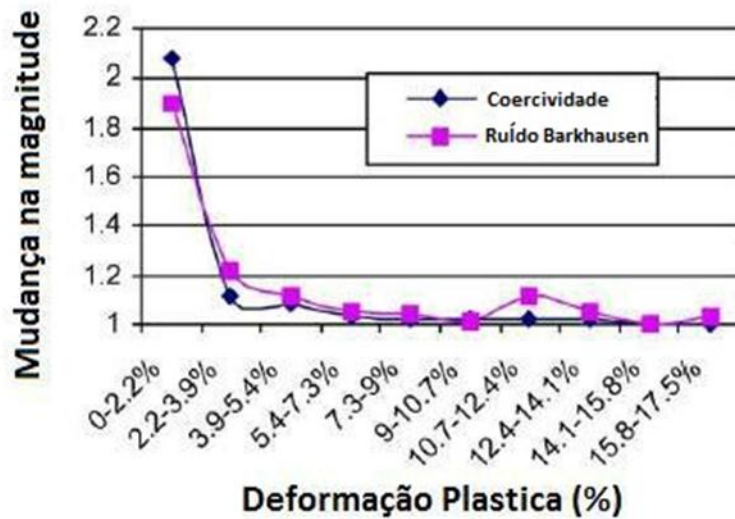
Fonte: adaptado de KTENA et al., 2014

O'Sullivan et al., (2004) estudou o efeito da deformação nas medidas de ruído de Barkhausen e coercividade em um aço inoxidável ferrítico AISI 430. Os resultados são mostrados na Figura 2.8. Nota-se que tanto a medidas coercividade quanto de ruído de Barkhausen decrescem com o aumento da deformação. O aumento da deformação gera o aumento da densidade de discordâncias e esta funciona como ponto de ancoragem para o movimento das paredes dos domínios magnéticos.

Caldas-Morgan (2012) utilizou a configuração da Figura 2.9 para detecção do eixo de fácil magnetização de chapas de aço, através do método de rotação do material. Os materiais utilizados foram os aços AISI 430, 439 e 444, que foram preparados e rotacionados de 30 em 30° até completar um ciclo de 360°, conforme apresentado na figura 2.9 (b). Ele concluiu de sua análise, que os aços estudados apresentaram

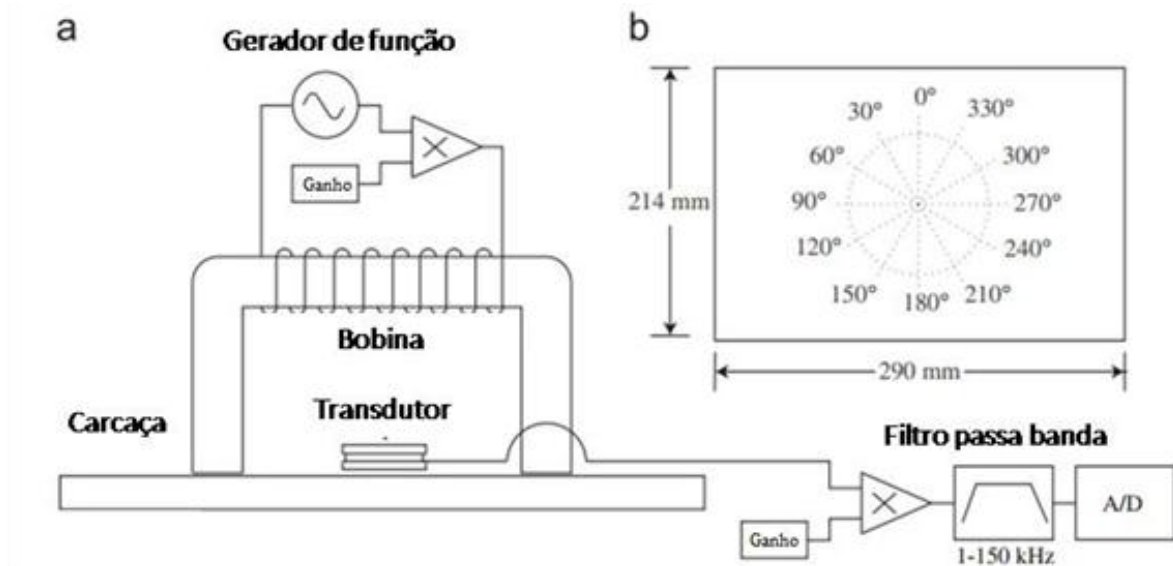
anisotropias magnéticas capazes de serem detectadas pela técnica de ruído Barkhausen e que o eixo de fácil magnetização é rapidamente detectável.

Figura 2.8 - Efeito da deformação nas medidas de ruído magnético de Barkhausen e coercividade em aço inoxidável ferrítico



Fonte: adaptado de O’SULLIVAN et al., 2004

Figura 2.9: Equipamento clássico de ensaio Barkhausen (a) e amostra utilizada para análise do eixo de fácil magnetização do material (b)



Fonte: adaptado de CALDAS-MORGAN et al., 2012

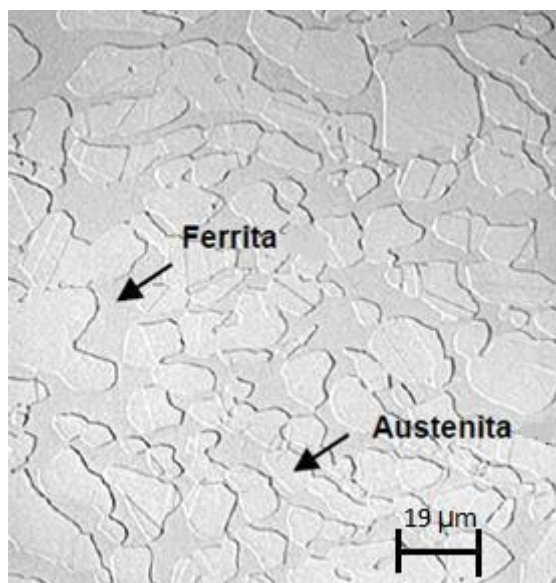
Franco (2009) estudou o uso da técnica de efeito Barkhausen para investigar o tamanho e espessura de defeitos volumétricos em aço 1070. Os resultados mostraram que é possível a detecção de defeitos e que essa detecção independe da velocidade de varredura da amostra.

No presente trabalho foi estudado o efeito da formação de precipitados paramagnéticos finamente distribuídos dentro de uma fase ferromagnética. O ensaio apresentado tem como parâmetro de medida o ruído de Barkhausen gerado da interação entre onda aplicada e material.

### 2.3 AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX

O aço inoxidável duplex tem como principal característica elevada resistência à corrosão e resistência mecânica. Isto ocorre devido a sua composição de 50% de fase ferrítica e 50% de fase austenítica. Por isso são considerados de grande importância seu uso em indústrias como petroquímicas, alimentícias, papel e celulose e na de petróleo e gás. Na Figura 2.10 é vista uma microestrutura de um aço inoxidável duplex com as suas duas fases com proporções praticamente iguais. Entretanto, aquecidos a temperaturas superiores a 300 °C esse tipo de aço perde sua tenacidade se tornando um material frágil devido ao surgimento de partículas ricas em cromo que empobrecem a matriz desse elemento (SILVA et al., 2009).

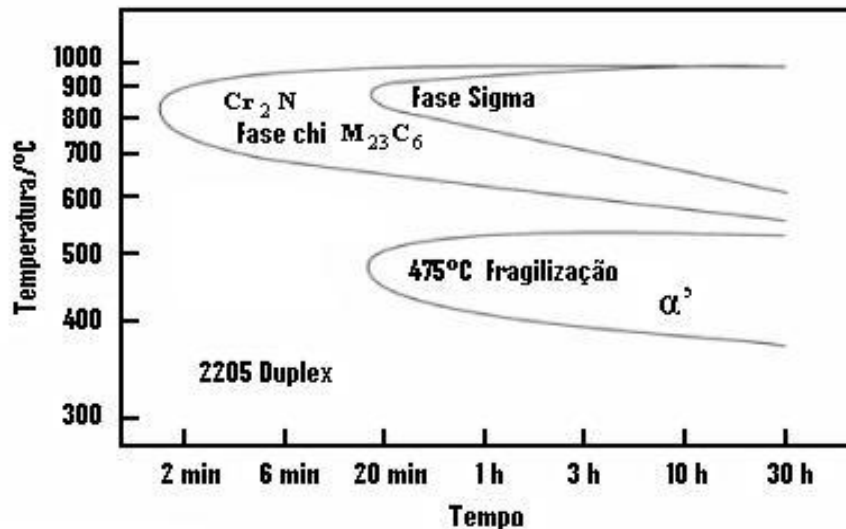
**Figura 2.10 - Microestrutura típica de um aço inoxidável duplex SAF2205**



Fonte: (GENEROSO, D.J.,2014)

Uma característica para escolha do aço SAF 2205 é devido ao fato que esse aço em específico, apresenta a formação de uma única fase fragilizante quando submetido a tratamentos térmicos de envelhecimento para temperaturas acima de 300°C e abaixo de 550°C, Figura 2.11.

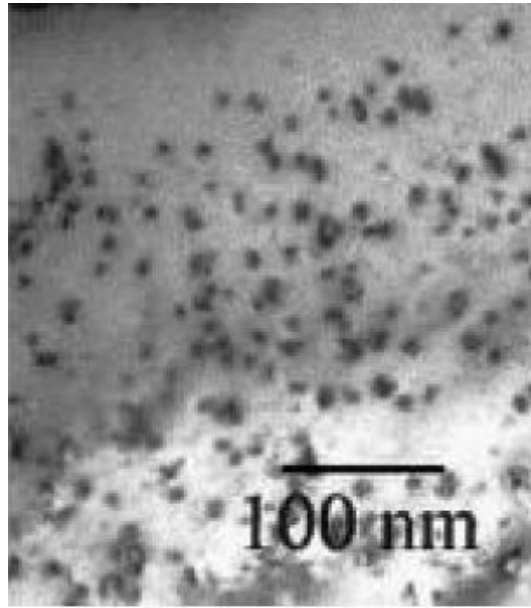
Figura 2.11- Diagrama de Precipitação de um aço inoxidável duplex SAF 2205



Fonte: SEDRIKS, 1996

Essa fase fragilizante é conhecida por  $\alpha'$  (alfa linha) e causa a fragilização do aço em estudo. Os precipitados são finamente dispersos no interior da matriz, conforme a Figura 2.12, e dificultam a movimentação das paredes dos domínios magnéticos durante a magnetização. Durante a formação da fase fragilizante  $\alpha'$  ocorre a decomposição da ferrita em fase  $\alpha$  rica em ferro e fase  $\alpha'$  rica em cromo, (MAGNABOSCO, 1995)

**Figura 2.12- Precipitado de  $\alpha'$  em uma amostra de aço inoxidável duplex.**



**Fonte: (OTÁROLA, T. et al., 2005)**

A presente revisão mostrou o princípio de obtenção do ruído de Barkhausen, as características do ensaio e algumas aplicações. A seguir será apresentada a metodologia experimental empregada neste trabalho.

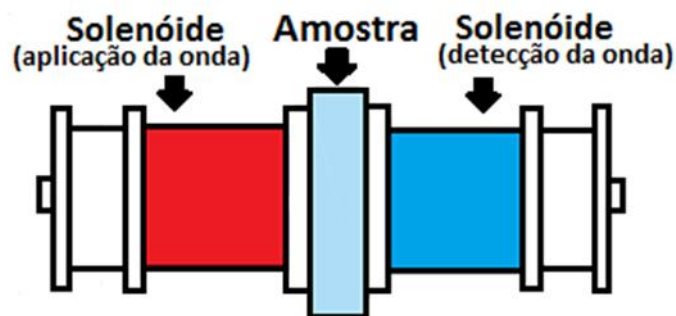
### 3 MATÉRIAS E MÉTODOS

O presente trabalho estudou o ruído gerado da interação entre intensidade de campo magnético, gerado por uma por uma onda, e um material com nanoestrutura finamente dispersa no seu interior. Este buscou obter parâmetros que possam acompanhar a formação dessa estrutura a partir da análise do ruído de Barkhausen. O material escolhido foi o aço SAF 2205 que possui para temperaturas de tratamento abaixo de 600 °C esse tipo de fase.

#### 3.1 BANCADA DE TESTE

A bancada de teste consiste de duas bobinas idênticas de 19,5 mm de comprimento. Essas bobinas foram construídas com 6000 espiras de fios de cobre esmaltado nº 38 enroladas sobre um núcleo do aço AISI 4140. Uma das bobinas foi denominada de bobina emissora de aplicação da onda, que é responsável pela magnetização do material, enquanto que a outra foi chamada de bobina receptora ou de medição da onda induzida. O material a ser estudado é posicionado entre as bobinas. A onda gerada passará pelo material e irá induzir na bobina receptora uma onda, que trará informações da interação da onda aplicada com o material a ser estudado. A Figura 3.1 mostra o esquema do ensaio a ser realizado.

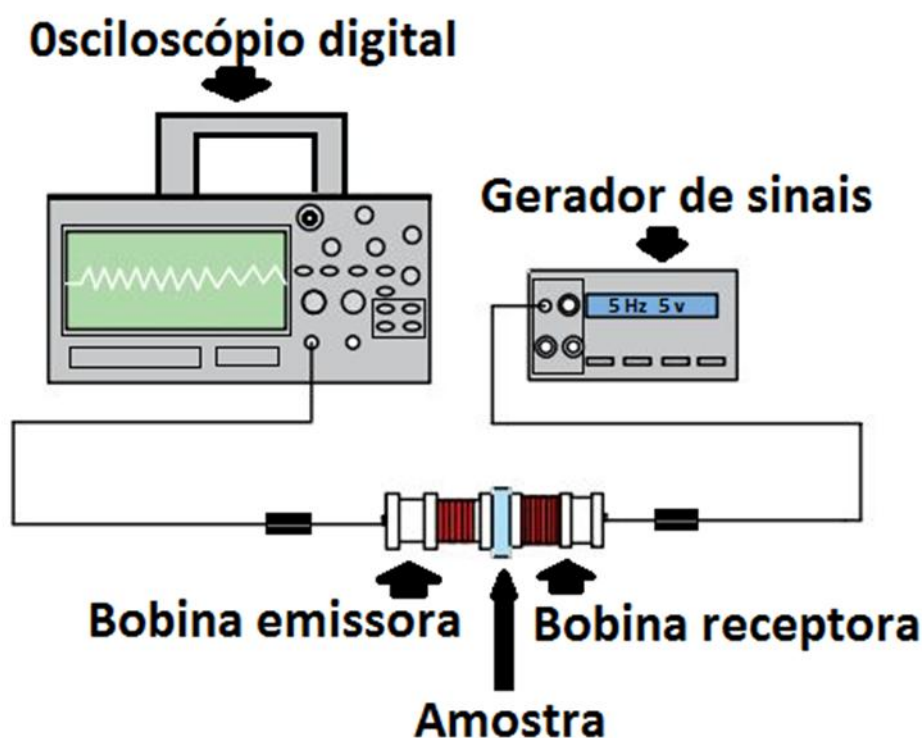
Figura 3.1 - Esquema do ensaio a ser realizado



Fonte: Própria

A Figura 3.2 mostra o desenho esquemático do experimento realizado, onde é possível observar disposição da amostra entre as duas bobinas de teste. A bobina de excitação (emissora) será magnetizada através da aplicação de uma tensão alternada em seus terminais, enquanto que o campo magnético variável produzido no material da amostra induzirá uma tensão na bobina leitora (receptora), a partir da qual podem ser obtidas informações sobre as características magnéticas do material.

Figura 3.2 - Desenho esquemático do experimento realizado



Fonte: Própria

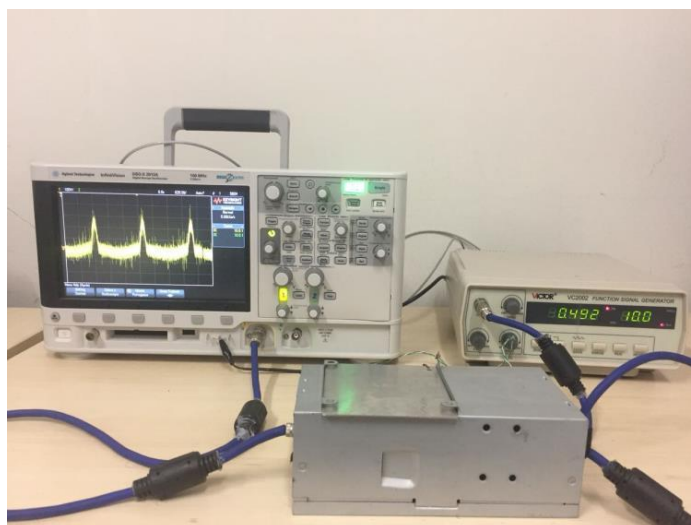
Para a magnetização da bobina de excitação e a captura da voltagem induzida na bobina leitora foram utilizados nesse processo os seguintes equipamentos: gerador de sinais de função modelo VC 2002 da marca Victor, bobina de emissão de onda, bobina de recepção da onda induzida e osciloscópio digital modelo DSO-X 2012A da Agilent Technologies, conforme a Figura 3.3.

O gerador de funções foi utilizado para fornecer ondas de excitação ao sistema de medição. O osciloscópio faz a captura do sinal de tensão induzida na bobina leitora.

O conjunto formado pelas bobinas e a amostra foram colocados em uma caixa e feito o aterramento, com o objetivo de diminuir ruídos do ambiente. Esta configuração está apresentada na Figura 3.3.



**Figura 3.3 - Bancada experimental**



**Fonte: Própria**

### 3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para o presente trabalho um aço inoxidável duplex SAF 2205 (UNS 31803) foi escolhido. Este material apresenta a formação dessas partículas finamente dispersas no interior da matriz, quando submetidos a tratamentos abaixo de  $600^{\circ}\text{C}$ . A fase formada é denominada de  $\alpha'$ .

A composição química do material das amostras, como recebido, é apresentada na Tabela 3.0, em percentual de peso.

**Tabela 3.1 - Composição do AID SAF 2205 como recebido, em % de peso**

<b>Aço Inoxidável Duplex SAF 2205</b>							
<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Co</b>
<b>0,018</b>	<b>1,480</b>	<b>0,019</b>	<b>0,001</b>	<b>0,450</b>	<b>22,220</b>	<b>5,590</b>	<b>0,130</b>
<b>Cu</b>	<b>Mo</b>	<b>N</b>	<b>Nb</b>	<b>Al</b>	<b>Sn</b>	<b>Ce</b>	<b>Fe</b>
<b>0,280</b>	<b>3,080</b>	<b>0,180</b>	<b>0,021</b>	<b>0,003</b>	<b>0,012</b>	<b>0,020</b>	<b>66,496</b>

**Fonte: GSCMat (dados do Grupo de simulação de Comportamento de Materiais)**

Foram realizados tratamentos de envelhecimento na temperatura 475°C e tempos de envelhecimento de 1, 4, 8, 12, 39 e 100 horas, com um objetivo de obtermos vários níveis devido à fragilização da fase  $\alpha'$ . Estas amostras foram produzidas pelo GSCMat e fazem parte de padrões fabricados pelo grupo para teste dos ensaios eletromagnéticos desenvolvidos.

O processo de envelhecimento das amostras foi realizado em um forno de resistência elétrica conforme mostrado na Figura 3.4. Este tem câmara de dimensões (160x160x350) mm e é do tipo mufla, marca Jung e modelo 912. A temperatura máxima do forno é de 1.200 °C. Os resfriamentos das amostras foram ao ar.

**Figura 3.4 – Forno tipo mufla a ser utilizado no envelhecimento das amostras**



**Fonte: Própria**

As amostras utilizadas neste trabalho têm formato retangular, de dimensões (30 x 20 x 7,5) mm, como vista na Figura 3.5 e foram obtidas por corte em eletroerosão a fio.

**Figura 3.5 - Amostra de aço inoxidável duplex SAF 2205**



**Fonte: Própria**

### 3.3 PARAMETRO DE MEDIÇÃO DO RUÍDO DE BARKHAUSEN

O parâmetro de análise que é frequentemente usado para medir o ruído de Barkhausen foi a raiz média quadrática (RMS). Este foi determinado por um programa desenvolvido no laboratório.

O RMS (raiz média quadrática) é fácil de medir e é o parâmetro mais comumente utilizado para obter dados do sinal analisado, ele é obtido através da Equação 3.1:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2} \quad (3.1)$$

onde  $N$  = número de elementos na sequência de entrada e  $x_i$  é a amplitude do sinal. O parâmetro RMS representa a raiz quadrada da média dos sinais das amplitudes ao quadrado

### 3.4 DETERMINAÇÃO DA FORMA DA ONDA A SER UTILIZADA

Uma amostra tratada na temperatura de  $475^{\circ}\text{C}$  por 100 horas foi utilizada para este estudo. Este tratamento fornece um material em que a quantidade de precipitados no interior da fase ferrita está formada. Este foi submetido à aplicação de ondas com as formas triangular, senoidal e quadrada e frequência de 5 Hz e amplitude de 5 V. Foi realizada a FFT do sinal e um filtro passa alta de 3 kHz foi aplicado em cada onda e o valor do RMS foi obtido de modo a determinar a forma de onda que fornecia o maior ruído possível.

### 3.5 DETERMINAÇÃO DA ONDA IDEAL PARA OBTENÇÃO DO RUÍDO DE BARKHAUSEN

Amostras na condição como recebida, que não apresentam precipitados, e amostras tratadas na temperatura de  $475^{\circ}\text{C}$  (com precipitado) foram escolhidas para esta etapa. Ondas triangulares com as frequências de 5 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz e amplitudes de 1 V, 3 V, 5 V e 9 V foram geradas por uma bobina emissora e a onda induzida na segunda bobina, posicionada do outro lado da peça, teve seus dados obtidos por um osciloscópio. O tempo de aquisição do sinal foi de 2 s. O objetivo era determinar a melhor onda que gerasse maiores valores de ruído para ser estudado. A região de interesse para este trabalho era a que produzisse a maior diferença de RMS entre a condição com e sem tratamento.

Após a obtenção da região de melhor estudo para o ruído de Barkhausen, duas ondas com a frequência de 5 Hz e amplitudes de 3 e 5 V foram escolhidas para verificar a possibilidade de acompanhamento da formação dos precipitados finos, em um aço inoxidável duplex. Estas ondas foram aplicadas nas amostras tratadas na temperatura de  $475^{\circ}\text{C}$  pelos tempos de 1h, 4h, 8h, 12 h, 39 h e 100 horas.

### 3.6 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

O material estudado foi caracterizado por medidas de dureza e energia absorvida por impacto. A caracterização por microscopia não foi realizada para as amostras

tratadas, pois este material para o tempo de tratamento empregado, forma precipitados nanométricos que não podem ser observados por microscopia óptica.

Os ensaios de dureza e impacto são técnicas indiretas para acompanhamento da presença desses precipitados e por serem técnicas consolidadas, estas foram escolhidas para correlação com os obtidos pelo ensaio eletromagnético apresentado neste trabalho.

### 3.6.1 Microscopia óptica (MO)

Com a finalidade de observar a microestrutura das amostras em estudo, foi utilizada a técnica da microscopia óptica, que consiste em utilizar o microscópio óptico como uma ferramenta de observação das amostras do material.

Para a utilização da técnica de microscopia óptica, a amostra de aço inoxidável passou pelo processo metalográfico. Este consiste das etapas de lixamento, polimento e ataque químico. A sequência de lixas foi 220, 320, 400 e 600. O polimento foi realizado com o abrasivo alumina (3  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ ) e o reagente para ataque químico foi o Behara.

O microscópio óptico que utilizado foi o NIKON, série EPIPHOT, como visto na Figura 3.6. Este equipamento possui câmera de captura de imagem.

**Figura 3.6 – Microscópio óptico**



**Fonte: Própria**

### 3.6.2 Ensaio de dureza

Os resultados do ensaio eletromagnético estudado foram comparados com a capacidade de endurecimento do material. As amostras como recebidas e as envelhecidas foram submetidas a ensaios de dureza Rockwell C de acordo com a norma NBR 6672. O equipamento utilizado para a realização desse ensaio foi o Durômetro da Mitutoyo, modelo Durotwin 963-102.

Cada uma das amostras foi submetida a cinco medidas, com distância de 2 mm. Em seguida foi feita a média com respectivo erro e a determinação do intervalo de confiança de 95%.

### 3.6.3 Ensaio de impacto

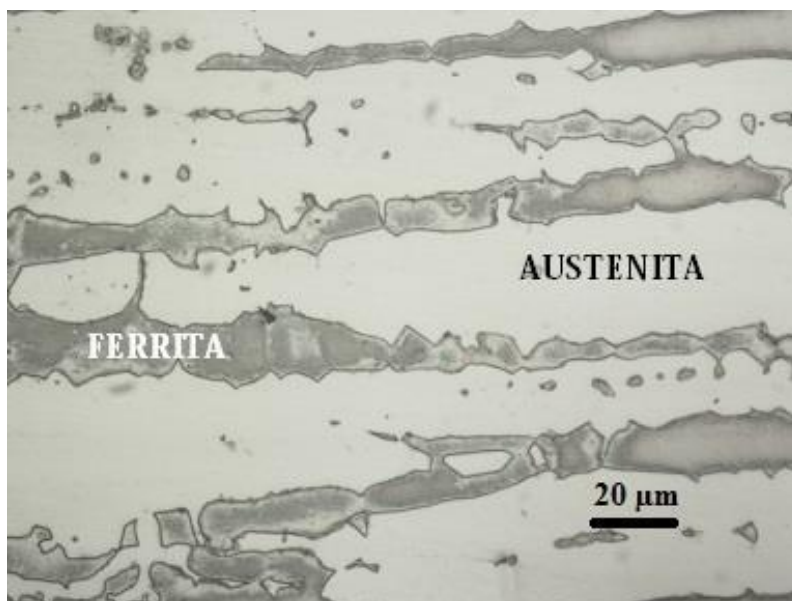
Resultados de ensaios de impacto obtidos do banco de dados do mesmo material foram utilizados para correlação com os obtidos de ensaio eletromagnético estudado. Foram utilizados resultados de energia de Charpy do mesmo material para a amostra como recebida e as tratadas na temperatura de 475 °C, e envelhecidas por 4, 8, 12, 39 e 100 horas. Para esse procedimento foi utilizada a máquina universal para ensaios de materiais da Wolperp/Amsler, modelo PW30/15K pertencente ao laboratório de ensaios do Instituto Federal da Paraíba (IFPB) do campus de João pessoa, PB. Esses resultados estão no banco de dados do GSCMat.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL COMO RECEBIDO

O material utilizado no presente trabalho foi um aço inoxidável duplex. A Figura 4.1 mostra a microestrutura do material como recebido, onde se observa regiões claras que é a austenita e escura que é a ferrita. A primeira é paramagnética e a segunda ferromagnética. Este material se caracteriza por formar precipitados nanométricos no interior da fase ferrita quando submetido a temperaturas abaixo de  $550^{\circ}\text{C}$ . Essa microestrutura somente pode ser observada com microscopia de alta resolução como a microscopia eletrônica de transmissão, por exemplo (SILVA et al., 2009).

**Figura 4.1 - Microestrutura obtida por microscopia óptica do material como recebido (ataque Behara).**



Amostras desse material foram submetidas a tratamentos na temperatura de  $475^{\circ}\text{C}$  por tempos de até 100 horas para formação da fase  $\alpha'$ , que se forma a partir da decomposição da fase ferromagnética ferrita. Esta temperatura foi escolhida por ser a de maior cinética de fragilização do aço inoxidável duplex (TAVARES et al., 2010, SILVA et al., 2009). Contudo, para acompanhar a formação dessa fase foram escolhidas as medidas de dureza e energia absorvida por impacto, que são ensaios consolidados para acompanhar o endurecimento e a capacidade de absorver energia,

respectivamente (TAVARES et al., 2010, SILVA et al., 2009). Os resultados dessas duas técnicas foram correlacionados com os obtidos pelo ensaio eletromagnético estudado no final do capítulo de discussão.

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados do ensaio eletromagnético. Inicialmente foi determinada a forma da onda a ser utilizada, ou seja, quadrada, senoidal ou triangular. Depois foi determinada a melhor frequência e amplitude da onda, entre as estudadas, que produzisse o ruído de Barkhausen e no final realizado a correlação com os ensaios de dureza e energia absorvida.

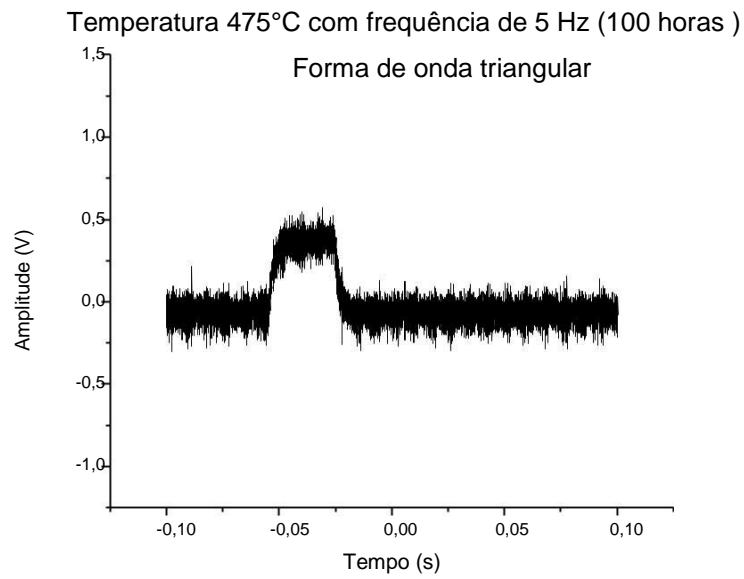
#### 4.2 DETERMINAÇÃO DA FORMA DA ONDA A SER UTILIZADA

O ruído de Barkhausen é gerado pela interação da movimentação das paredes dos domínios magnéticos e a microestrutura. Fatores como contornos de grãos, impurezas, partículas de segunda fase, por exemplo, são considerados como barreiras para movimentação dessas paredes. Os ensaios eletromagnéticos, baseados nas medidas desse ruído, tem como princípio a aplicação de uma onda, que ao passar pelo material carrega a informação da microestrutura no ruído gerado da interação, que é medida em uma bobina leitora (ROCÍO et al., 2015, LINDGREN; LEPISTÖ, 2004, GHANEI; KASHEFI; MAZINANI, 2014, KTENA et al., 2014). Diversas formas de onda são usadas para os ensaios eletromagnéticos com o objetivo de obter o ruído de Barkhausen, sendo usadas ondas triangulares, senoidais e quadradas com diferentes frequências (ROCÍO et al., 2015, LINDGREN; LEPISTÖ, 2004, GHANEI; KASHEFI; MAZINANI, 2014, KTENA et al., 2014, WANG et al., 2013).

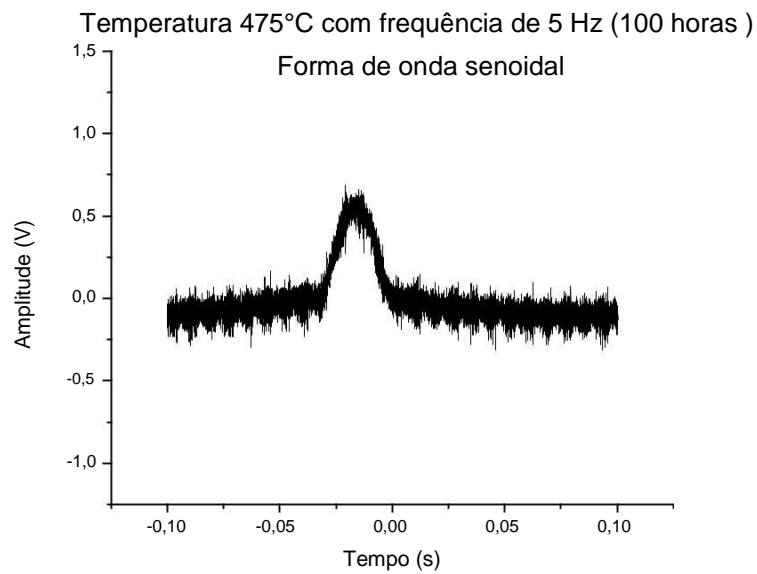
No presente trabalho foi realizado um estudo para definir a forma de onda mais adequada a ser utilizada. Ondas de mesma amplitude e frequência de 5 Hz, nas formas quadrada, senoidal e triangular foram utilizadas. Esta frequência foi escolhida inicialmente de modo a evitar a geração de correntes parasitas nas amostras (ROCÍO et al., 2015). O parâmetro de análise da onda foi a raiz do valor quadrático médio (RMS) da onda com a aplicação de um filtro passa altas digital de 3,5 kHz para evitar interferências de baixas frequências e do meio ambiente (MOSES; PATEL; WILLIAMS, 2006). Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4.



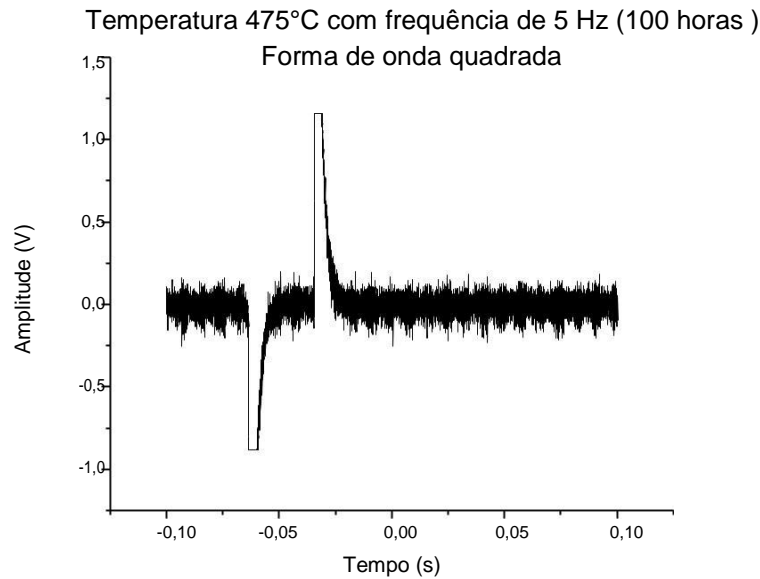
**Figura 4.2 - Onda triangular com frequência de 5 Hz e valor de tensão RMS de 0,00081293 V,  
para amostras com precipitados**



**Figura 4.3 - Onda senoidal com frequência de 5 Hz e valor de tensão RMS de 0,000692614 V,  
para amostras com precipitados**



**Figura 4.4 - Onda quadrada com frequência de 5 Hz e valor de tensão RMS de 0,7636 V, para amostras com precipitados.**



Nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 temos os valores de RMS obtidos da interação de ondas com diferentes formas e um material com precipitados homogeneamente distribuídos no interior do grão do material. A amostra escolhida foi de um aço inoxidável duplex que foi submetido a um tratamento de aquecimento na temperatura de 475<sup>o</sup> C por 100 horas e resfriado ao ar. Este material foi escolhido por que nesta condição tem-se somente a formação dessa nova fase e ser muito utilizado no setor de petróleo e gás (TAVARES et al., 2010, SILVA et al., 2016).

O resultado obtido com a onda triangular apresentou maior valor de RMS. Isto indica a presença maior de ruído gerado da interação entre movimento das paredes dos domínios e microestrutura, sendo escolhida para o estudo.

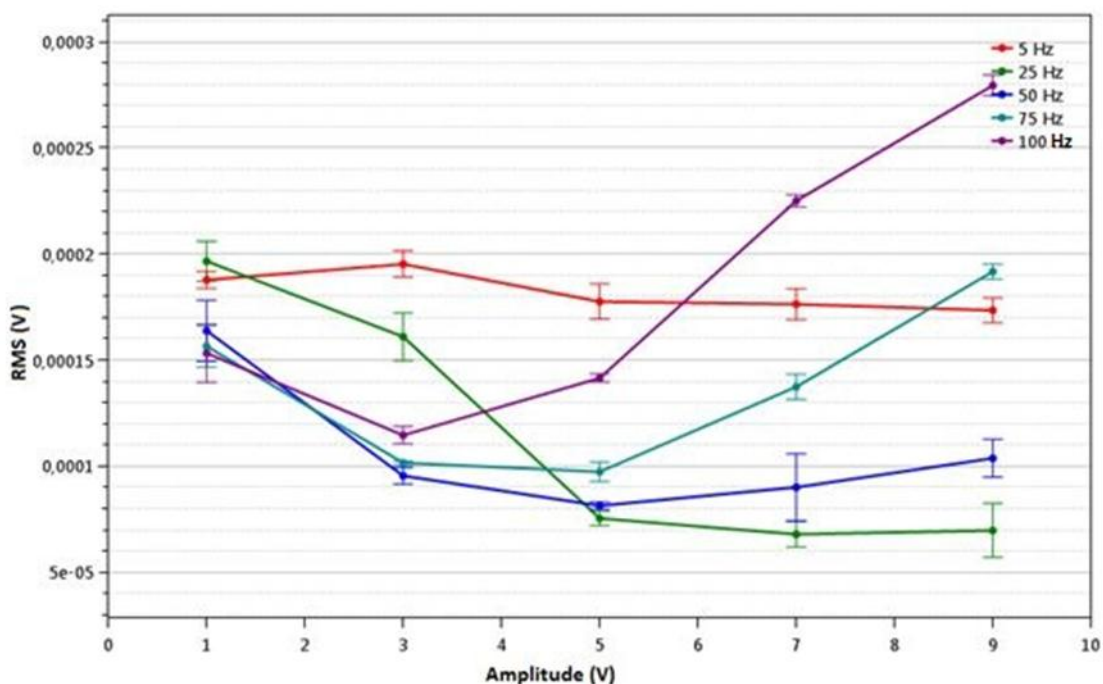
### 4.3 DETERMINAÇÕES DA FREQUÊNCIA E AMPLITUDE DA ONDA IDEAL

A Figuras 4.5 mostra a variação dos valores de RMS medidos, em função da amplitude e da frequência das ondas triangulares aplicadas para amostras sem precipitados. Na Figura 4.5, as ondas com frequências de 5 Hz apresentaram uma leve redução nos valores de RMS com o aumento das amplitudes. No caso da onda de 25 Hz ocorreu uma queda seguida de uma estabilização para amplitudes acima de 5 V.

Contudo, as aplicações das frequências de 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz apresentaram quedas dos valores de RMS para amplitudes até 5 V, 5 V e 3 V, respectivamente e depois crescimento.

Os aços inoxidáveis duplex são formados por uma matriz ferromagnética e ilhas de uma fase paramagnética. O aumento da amplitude da onda aplicada no material sem precipitados leva a uma maior interação das ondas com a fase paramagnética do material (austenita) reduzindo os valores de RMS. Este efeito de redução é ampliado com o aumento das frequências estudadas, como observado na Figura 4.5, visto que este resulta numa maior varredura do material. Todavia, com o aumento das amplitudes e frequências, os valores de RMS passam a crescer para as frequências de 75 Hz e 100 Hz. Isto se deve ao aumento das intensidades dos harmônicos referentes a essas frequências que passam a ter suas amplitudes sobrepostas às frequências na região de estudo do ruído e aumentam os valores de RMS.

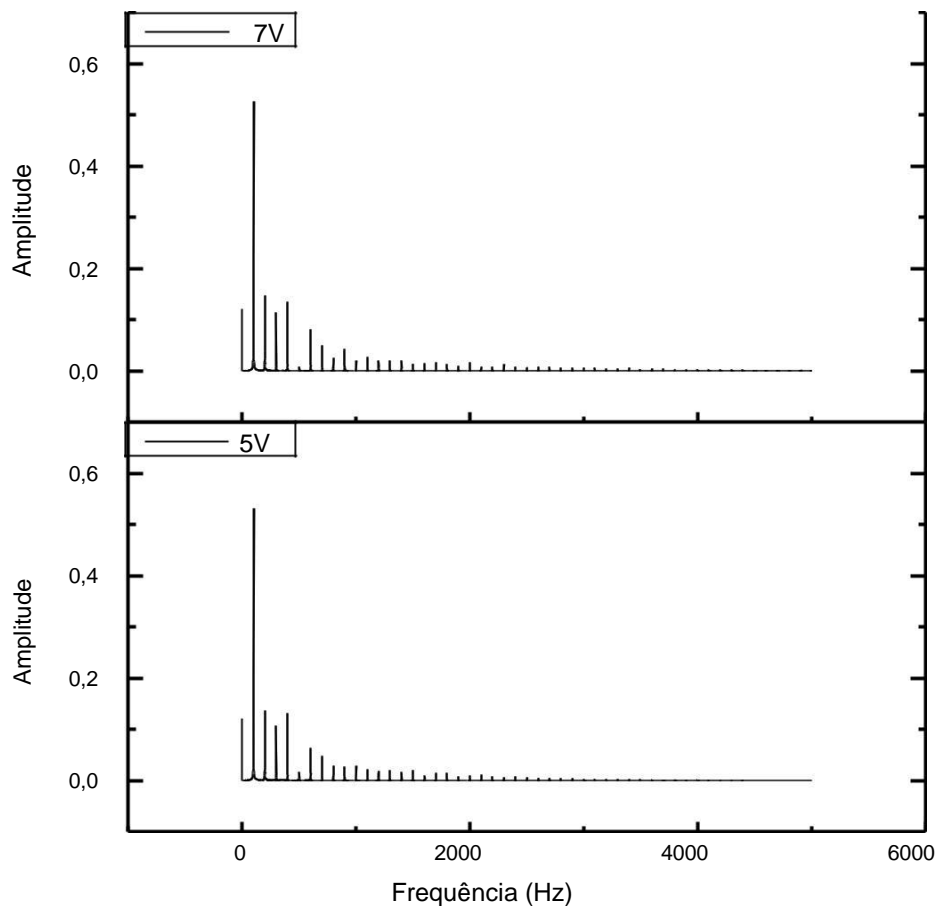
**Figura 4.5 - Variação do valor RMS da onda, em função da amplitude e frequência da onda aplicada para a condição sem precipitados**



Na Figura 4.6 temos a variação dos valores de RMS para a frequência de 100 Hz e amplitude de 5 V e 7 V, mostrando que o aumento destas leva a uma maior quantidade

de harmônicos nas regiões de maior frequência do espectro. Pode ser observado da Figura 4.6 que para a amplitude de 5 V , os harmônios da frequência de 100 Hz são percebidos até frequências em torno de 3000 Hz, enquanto que para 7 V estes são notados em todo espectro. Ensaios eletromagnéticos que analisam o ruído de Barkhausen costumam a aplicar filtros passa alto para evitar o efeito dos harmônicos sobre os sinais dos ruídos (MOORTHY, 2016).

**Figura 4.6 - Transformada de Fourier dos sinais das ondas com frequência de 100 Hz e amplitudes de 5 V e 7 V**



A seguir será apresentada a comparação entre os resultados obtidos para amostras sem precipitados e com precipitados. Para esta condição foi escolhida o tratamento na temperatura de 475<sup>o</sup> C por 100 h. Segundo (SILVA et al., 2016), nesta condição, já temos a consolidação da formação dos precipitados finamente dispersos na região da ferrita do material. A fase austenita não sofre transformações nos aços inoxidáveis duplex (TAVARES et al., 2010).

A Figura 4.7 apresenta a variação dos valores de RMS, em função da amplitude e frequência das ondas aplicadas para amostras com precipitados. As Figuras 4.5 e 4.7 para as situações com e sem a presença da nova fase mostram ser semelhantes. Porém, para melhor entendermos o comportamento nas duas situações estudadas são apresentados nas Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 uma comparação das medidas realizadas para ondas de frequência de 5 Hz, com e sem tratamento, e as ondas de 25 Hz (Figura 4.8), 50 Hz (Figura 4.9), 75 Hz (Figura 4.10) e 100 Hz (Figura 4.11) para as mesmas condições.

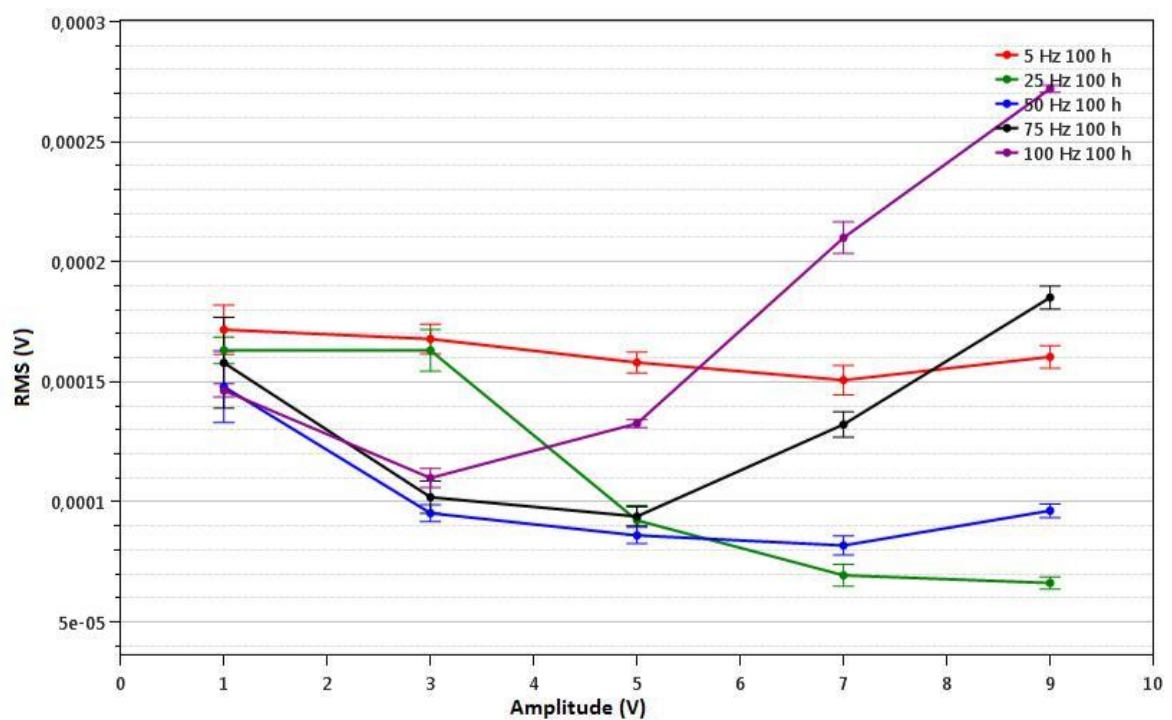
As Figuras 4.8 a 4.11 mostram que as medidas realizadas com ondas de 5 Hz apresentam diferença entre a condição com e sem tratamento. A presença de diferença é observada também para ondas com frequências de 25 Hz e amplitudes abaixo de 3 V (Figura 4.8). Esta diferença não é observada para as frequências de 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz, Figuras 4.9, 4.10 e 4.11, respectivamente. Estes resultados indicam que a região onde se pode trabalhar com o ruído de Barkhausen, nas condições estudadas, corresponde à utilização de frequências inferiores a 25 Hz, onde a de 5 Hz teve os melhores resultados. Trabalhos realizados com o ruído de Barkhausen indicam a utilização de frequências de 0,4 Hz até 10 Hz (ROCÍO et al., 2015, WANG et al., 2013, KTENA et al., 2014, GHANEI; KASHEFI; MAZINANI, 2014, ASTUDILLO et al., 2015, BLAŽEK et al., 2016). Entretanto, alguns trabalhos utilizam frequências de 50 Hz a 1000 Hz (KTENA et al., 2014).

No presente trabalho, tanto para a condição com e sem precipitado os resultados apresentam aumento nos valores de RMS para frequências de 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz e amplitudes de 7 V, 5 V e 3 V, respectivamente (Figuras 4.9, 4.10 e 4.11). Como discutido a partir da Figura 4.6, anteriormente, isto se deve a interferências da amplitude dos harmônicos dessas frequências na região de estudo dos ruídos. A fim de melhor entendermos este comportamento, amostras sem precipitados foram submetidos a ondas com a frequência de 100 Hz e amplitudes de 1 V, 3 V, 5 V, 7V e 9 V (Figura 4.12). Além disso, foram aplicados filtros passa altas de 3 kHz, 4 kHz, 4,5 kHz e 4,75 kHz. Nota-se que à medida que aumentamos o valor do filtro passa altas há uma redução dos valores de RMS com o aumento da amplitude da onda aplicada, indicando uma redução na influência dos harmônicos da frequência de 100 Hz.

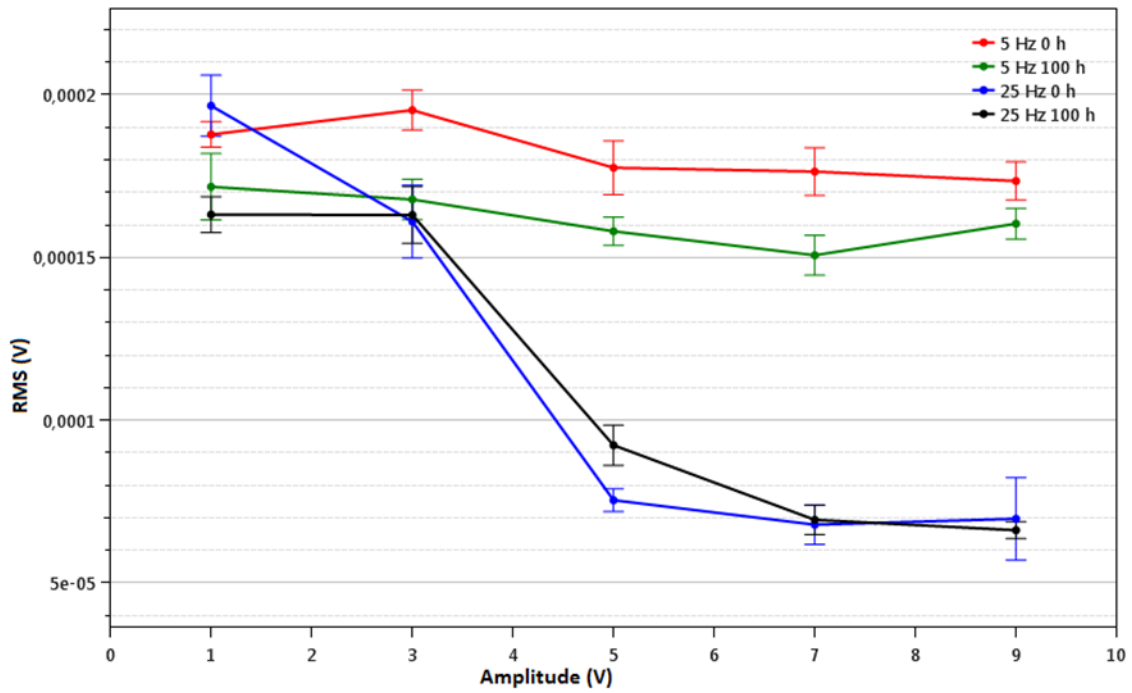
Entre as frequências estudadas, a de 5 Hz foi a mais indicada para trabalho com o ruído de Barkhausen com o material analisado. Para caracterização da onda aplicada,

em seguida, será realizado o estudo das amplitudes dessas, que seja necessária para termos uma maior faixa de medição nos experimentos. Duas condições de filtro passa altas foram empregadas, sendo de 3 kHz e 4 kHz, com o objetivo de determinar qual deles elimina possíveis interferências das amplitude da frequência sobre os ruído gerados da interação entre essa e a microestrutura do material.

**Figura 4.7 - Variação do valor RMS da onda, em função da amplitude e frequência da onda aplicada para a condição com precipitados formados.**



**Figura 4.8 - Medidas do valor RMS, para amostras com e sem precipitados, em função das ondas com frequências de 5 Hz e 25 Hz e diferentes amplitudes .**



**Figura 4.9 - Medidas do valor RMS, para amostras com e sem precipitados, em função das ondas com frequências de 5 Hz e 50 Hz e diferentes amplitudes**

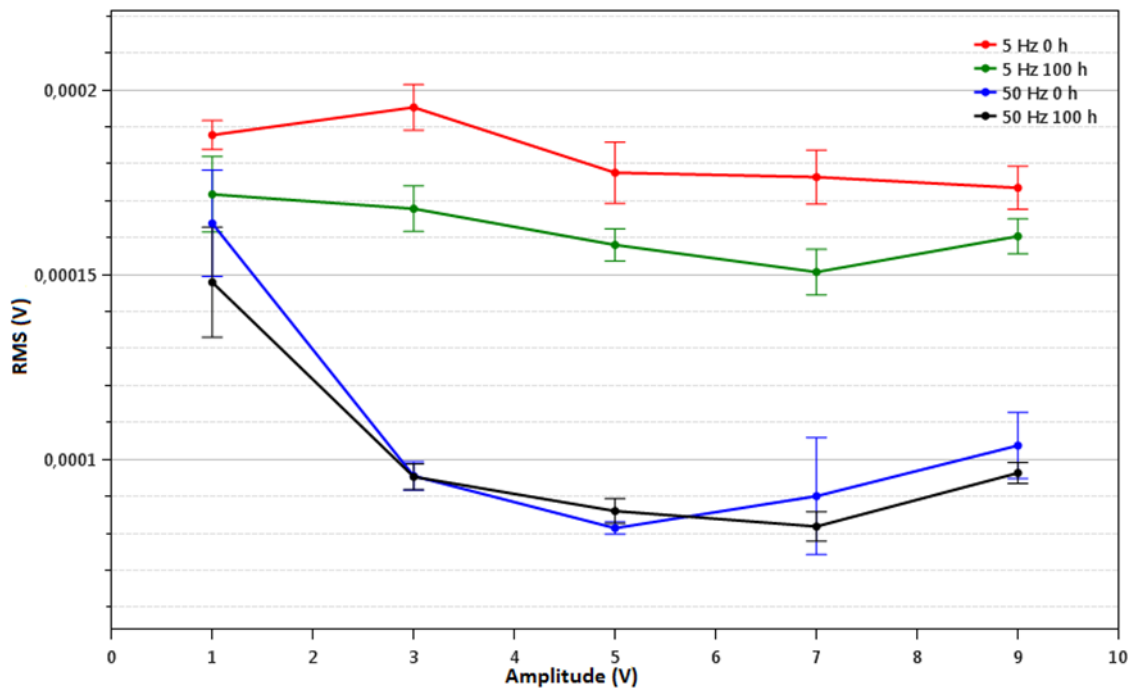


Figura 4.10 - Medidas do valor RMS, para amostras com e sem precipitados, em função das ondas com frequências de 5 Hz e 75 Hz e diferentes amplitudes

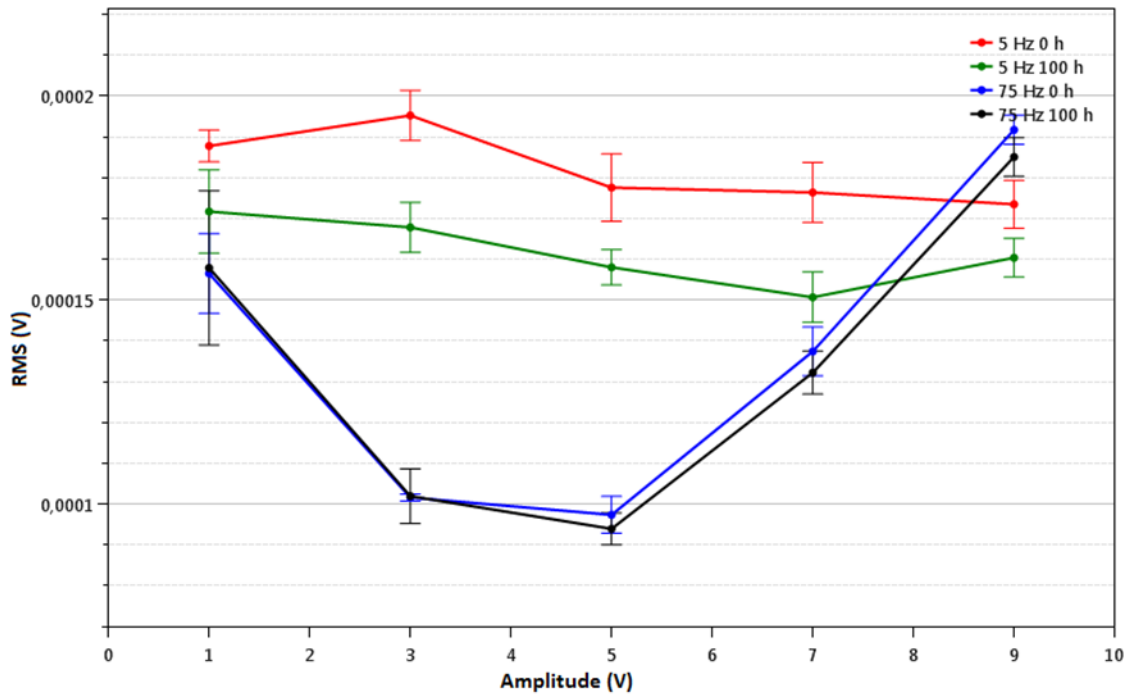
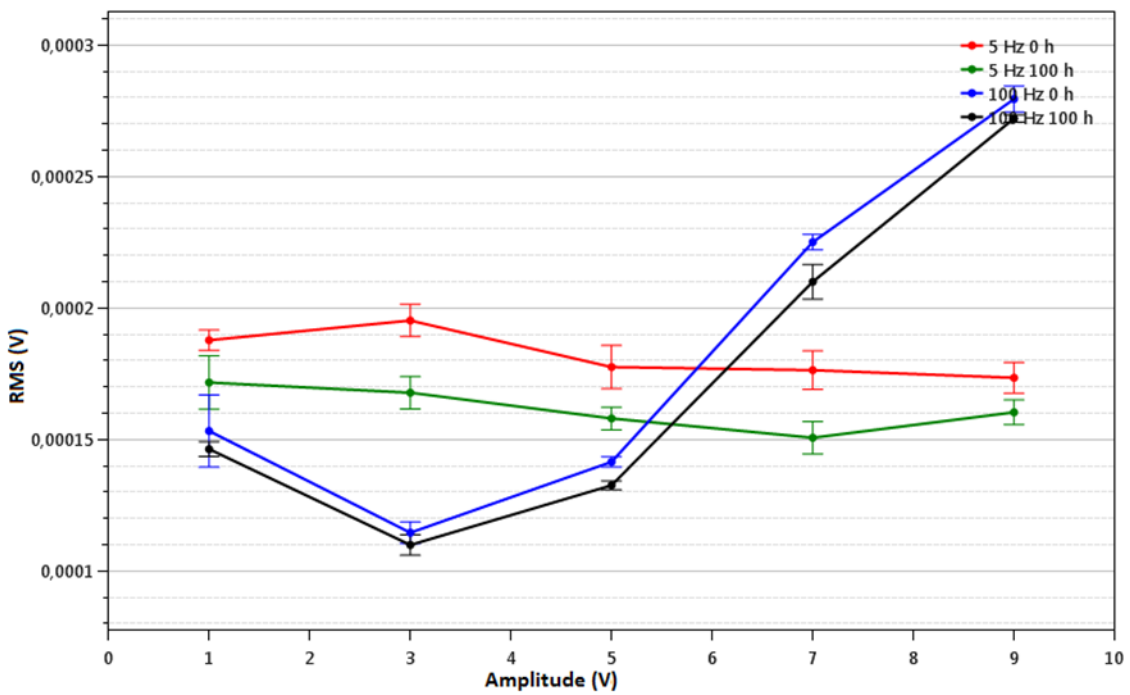
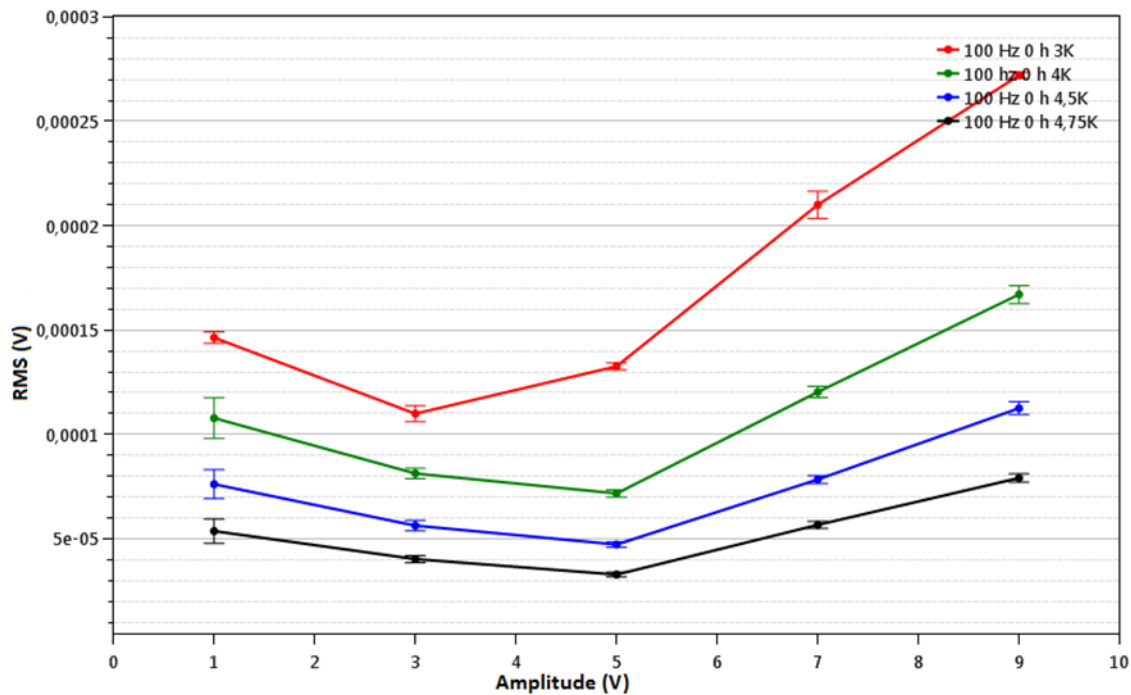


Figura 4.11 - Medidas do valor RMS, para amostras com e sem precipitados, em função das ondas com frequências de 5 Hz e 100 Hz e diferentes amplitudes





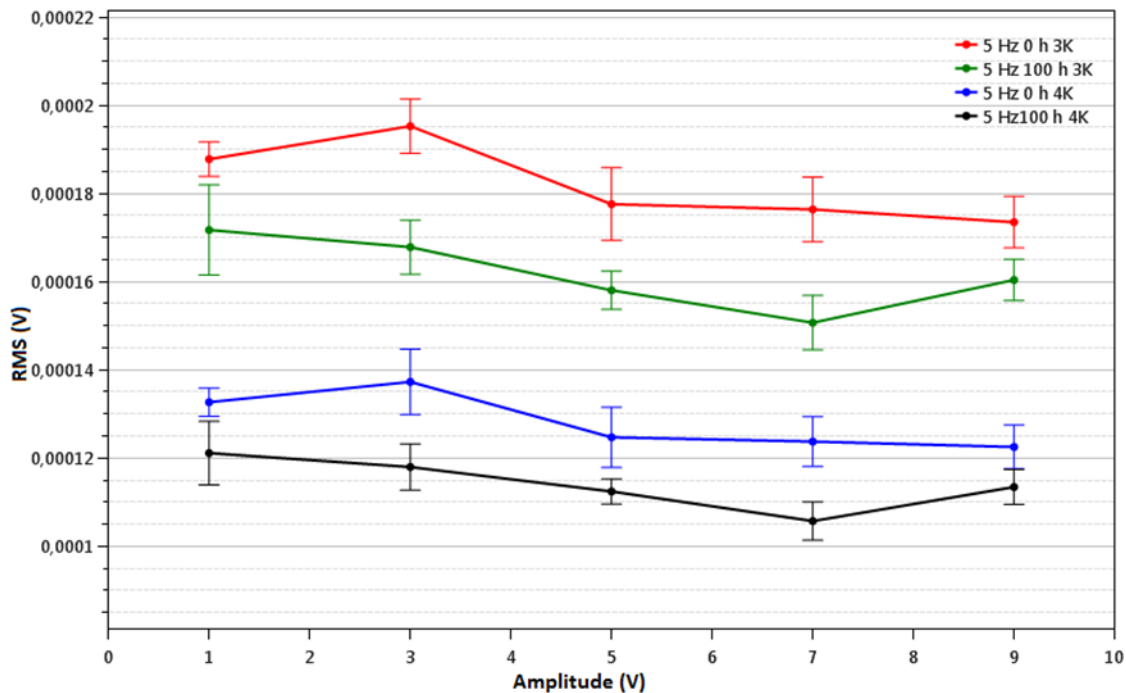
**Figura 4.12 - Variação dos valores de RMS em função do filtro passa altas, na aplicação de ondas de frequência de 100 Hz, em uma amostra sem precipitados.**



A Figura 4.13 mostra a influência da aplicação dos filtros passa altas de 3 kHz e 4 KHz, nos espectros da transformada de Fourier gerado da onda medida na bobina leitora, pela emprego de ondas de frequências de 5 Hz, na bobina emissora.

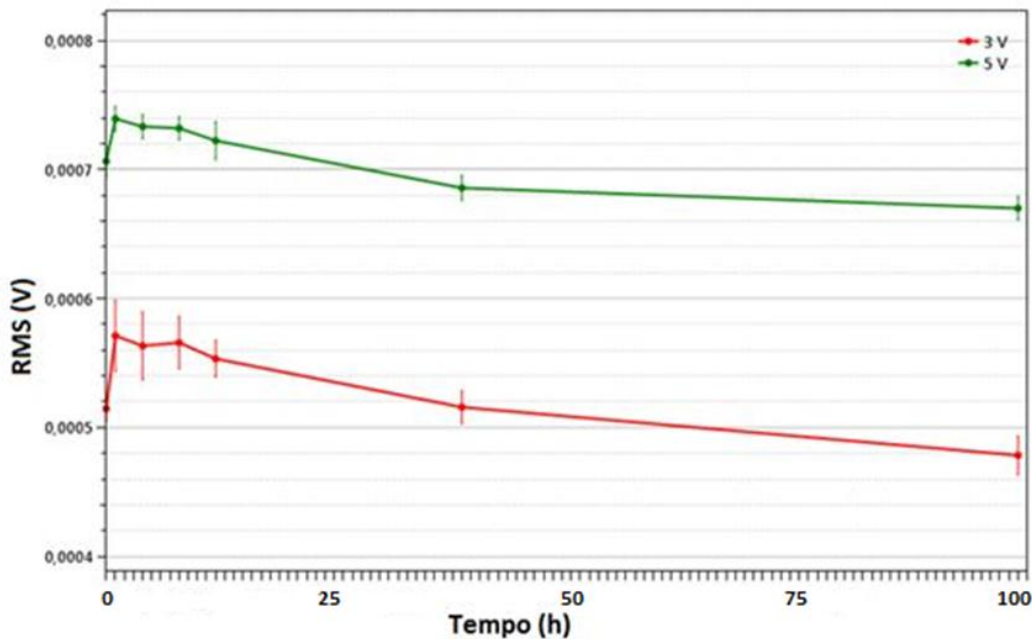
Observa-se da Figura 4.13, que tanto a aplicação do filtro passa altas de 3 kHz, quanto de 4 kHz, resulta na redução dos valores de RMS com o aumento da amplitude da onda. Nota-se também que a utilização do filtro de 3 kHz resulta em uma maior amplitude de medição, ou seja, diferença entre as condições com e sem tratamento. Além disso, o comportamento das curvas com e sem tratamentos tiveram comportamento semelhantes para valores de amplitudes até 7 V, indicando que a diferença se deve a presença de precipitados na amostra tratada, por ser a única diferença microestrutural entre as duas. Contudo, para a amplitude de 9 V, os valores de RMS tiveram um aumento, possivelmente pelo influência dos harmônicos de 5 Hz, com já discutido. As amplitudes de 3 V e 5 V foram escolhidas para o acompanhamento da formação dos precipitados finamente dispersos na matriz de ferrita, que é objeto de estudo do presente trabalho. Estas foram selecionadas considerando que valores próximos de 9 V já poderiam ter influências dos harmônicos e a de 1 V teve diferença inferior a das outras medições.

**Figura 4.13 - Influência dos filtros passa altas de 3 kHz e 4 kHz, nos valores de RMS para ondas aplicadas com frequência de 5 Hz e diferentes amplitudes.**



A Figura 4.14 mostra a variação do ruído de Barkhausen em função do tempo de envelhecimento para amostras tratadas na temperatura de  $475^{\circ}\text{C}$ , para ondas de frequência de 5 Hz e amplitudes de 3 V e 5 V. Nota-se um aumento nos valores do ruído até 1 hora de tratamento, seguido de redução até o tempo de 100 horas. Este comportamento foi observado para ambas às amplitudes. Porém, as medidas realizadas com a amplitude de 3 V, apesar de apresentar menores valores de ruído de Barkhausen, tiveram maiores amplitudes de medidas, ou seja, maiores diferença entre o pico de 1 h e a menor medida correspondente a 100 h. A amplitude de 5 V faz que os harmônicos da frequência de 5 Hz elevem os valores de RMS e reduzem a amplitude de medida.

Figura 4.14 - Variação do ruído de Barkhausen em função do tempo para amostras tratadas na temperatura de 475 ° C e aplicação de ondas com a frequência de 5 Hz e amplitudes de 3 V e 5 V.

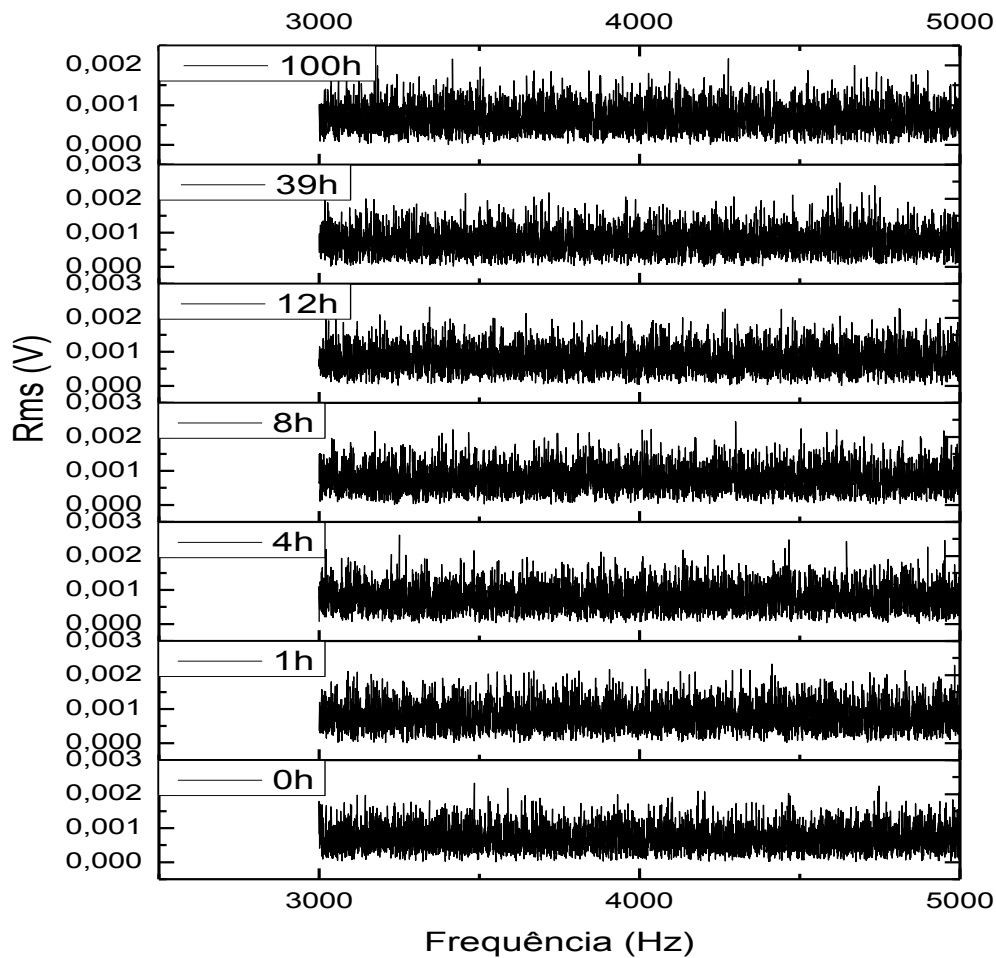


A ferrita na temperatura 475<sup>o</sup> C se decompõe formando precipitados no interior da matriz ferrítica. Este se caracteriza pela decomposição espontânea da matriz formando inicialmente regiões ricas e pobres em cromo. Com o passar do tempo as regiões ricas, que inicialmente eram coerentes com a matriz, perdem essa coerência com a matriz e os precipitados são formados (SILVA et al, 2009).

O aumento inicial da curva da Figura 4.14 até 1 h se deve ao estágio inicial de formação dos precipitados, onde eles estão ainda pequenos e não são eficientes para ancorar o movimento dos domínios magnéticos produzindo uma maior quantidade de ruído. Com o passar do tempo e a consolidação dos precipitados, os valores do ruído vão diminuindo com o aumento da eficiência de ancoragem dos precipitados.

A Figura 4.15 mostra a transformada de Fourier dos sinais produzidos pela onda de 5 Hz e 3V nas amostras envelhecidas nos diversos tempos na temperatura de 475 ° C e usando um filtro passa alta de 3 kHz. Observa-se que a variação na quantidade de ruído visualmente não é sensível. Porém, como mostrado na Figura 4.14 o ensaio é capaz de distinguir as variações com as medidas de RMS.

Figura 4.15 - Transformada de Fourier dos sinais resultantes da aplicação da onda com frequência de 5 Hz e amplitude 3V, nas amostras tratadas na temperatura de 475 ° C



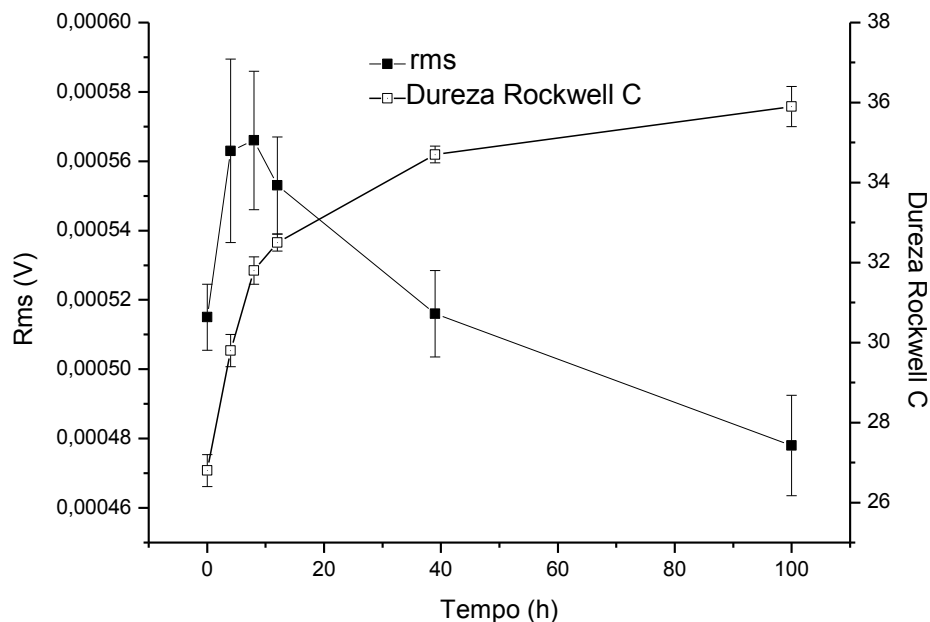
Na Figura 4.16 temos a variação das medidas de dureza e ruído de Barkhausen para amostras tratadas na temperatura de 475 ° C. Os valores de dureza apresentam dois estágios de endurecimento com taxas de endurecimento diferentes, como observados em outros trabalhos (SILVA et al., 2009, SILVA et al, 2016). O primeiro estágio vai até 12 horas e o segundo a partir deste. No primeiro estágio temos os maiores valores de ruído de Barkhausen, por ser uma região em que os precipitados ainda estão em formação e esses não são eficazes em ancorar os domínios magnéticos. A intensidade de campo magnético produzida pela onda, nessa região, é suficiente para que os domínios magnéticos, ao se movimentarem, vençam o boqueio produzido pelos precipitados e produzem os saltos abruptos nas tensões e com isso o ruído de Barkhausen.

No segundo estágio temos a redução da taxa de endurecimento, pois os precipitados já estão em fase final de formação. Contudo, ocorre uma redução nos valores de RMS que chegam a se igualar aos valores da condição sem precipitados para tempos de 39 horas e continua caindo até 100 horas. A fase  $\alpha'$ , que se forma a partir da ferrita é paramagnética (TAVARES et al., 2010, SILVA et al., 2009) e sua formação reduz o ferromagnetismo do material e as medidas de RMS. Isto indica que durante o primeiro estágio de endurecimento o ruído de Barkhausen é mais efetivo em aumentar os valores de RMS do que o paramagnetismo da fase formada. Entretanto, no segundo estágio temos o efeito da redução do paramagnetismo parece superar ao do efeito de Barkhausen sobre os valores de RMS.

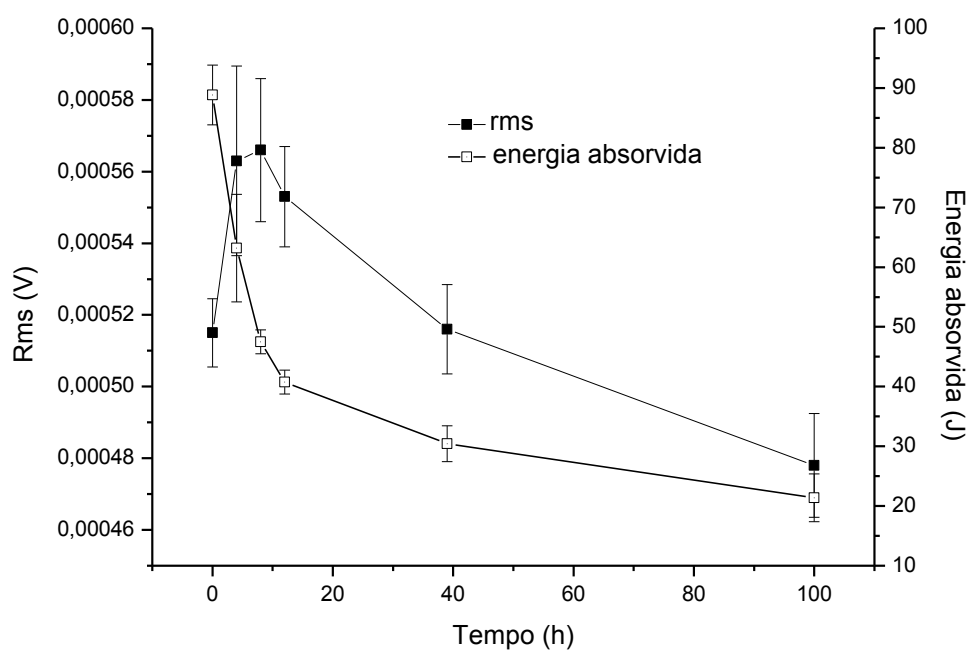
Na Figura 4.17 são mostradas a variação dos valores de RMS e energia absorvida por impacto das amostras tratadas na temperatura de 475 ° C. Nota que a partir do momento em que já temos precipitados, as duas curvas passam a ter o mesmo comportamento. Isto ocorre para o tempo de 4 horas no gráfico. Para o tempo de 12 h, em que o material já apresenta uma redução em torno de 46% na sua capacidade de absorver energia por impacto, as medidas de RMS começam a cair. Neste instante o efeito do paramagnetismo começa a superar ao do efeito de Barkhausen sobre as medidas de RMS.

O ensaio eletromagnético estudado mostrou ser capaz de acompanhar a formação de precipitados finos em um aço inoxidável duplex e mostrou que os valores de RMS apontam como parâmetro para monitoramento da fragilização desse tipo de material em serviço.

**Figura 4.16 - Medidas do valor RMS e dureza Rockwell C, em função do tempo de tratamento de amostras de um aço inoxidável duplex na temperatura de 475 ° C**



**Figura 4.17 - Medidas do valor RMS e energia absorvida por impacto, em função do tempo de tratamento de amostras de um aço inoxidável duplex na temperatura de 475 ° C**



## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho estudou o desenvolvimento de um ensaio eletromagnético baseada no ruído da interação entre campo magnético e material chegando às seguintes conclusões:

- A onda eletromagnética gerada pela bobina emissora é capaz de induzir na bobina leitora, uma onda que, ao passar pelo material a ser estudado, traz informações da microestrutura do material. No presente trabalho, a informação analisada foi o ruído gerado da interação da onda com o material estudado, que é conhecido como de Barkhausen.
- A aplicação das diferentes ondas no material, com e sem a presença de precipitados, resultou em comportamento semelhante para as frequências utilizadas. Houve a sobreposição dos resultados para as frequências de 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz. Contudo, a frequência de 5 Hz apresentou uma diferença suficiente para as condições estudadas para realização de medições.
- Ondas geradas pela bobina emissora com frequências até 25 Hz são capazes de produzir diferença de medidas entre as amostras com e sem precipitados para amplitudes inferiores a 3 V, sendo assim recomendadas para trabalhar com o ruído de Barkhausen. Esta região é a mais utilizada na literatura quando empregados ensaios eletromagnéticos para análise microestrutural.
- As ondas com frequências de 50 Hz, 75 Hz e 100 Hz tiveram redução dos valores de RMS, com o aumento da amplitude e em seguida o seu crescimento posterior. Isto se deve às amplitudes dos harmônicos dessas frequências passarem a serem presentes na região da aplicação do filtro passa alta, para valores crescentes de amplitudes da onda inicial.
- O filtro passa alta de 3 kHz foi capaz de produzir uma maior amplitude de medida em relação ao de 4 kHz, ou seja, diferença entre as medidas das condições com e sem precipitado. O filtro de 4 kHz, apesar de reduzir o efeito das amplitudes dos harmônicos da onda aplicada, diminuiu a quantidade de ruído necessário para o estudo.
- A onda produzida pela bobina emissora com frequência de 5 kHz e amplitude de 3 V apresentou melhor amplitude de medida em relação às outras

ondas estudadas, sendo escolhida para aplicação para acompanhamento da formação de precipitados em um aço inoxidável duplex SAF 2205.

- O material estudado apresenta dois estágios de endurecimentos com taxas diferentes. Observou-se que no primeiro estágio, ao se aplicar a onda considerada ideal, o aumento do RMS devido ao efeito de Barkhausen superava ao da perda do ferromagnetismo do material, proveniente da formação de precipitados paramagnéticos. No segundo estágio, o efeito da redução do paramagnetismo superou ao do efeito de Barkhausen reduzindo as medidas de RMS a valores inferiores ao do material sem precipitado.
- As medidas de RMS mostram ser capazes de acompanhar a perda de energia absorvida por impacto mostrado ser um parâmetro que pode ser utilizado para monitoramento de estruturas do aço estudo em serviço.



## 5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo de um número maior de frequências e amplitudes para ondas aplicadas na região abaixo de 25 Hz, para termos maior precisão na característica da onda estudada.
- Estudo do efeito da geometria das amostras na interação entre onda e material, de modo a correlacionarmos as características das ondas aplicadas com essa.
- Estudo de anisotropia magnética a partir da rotação das amostras e comparação dos resultados com outras técnicas.
- Simulação pelo Método dos Elementos Finitos da bancada de teste e determinação da limitação do ensaio.
- Aplicação do ensaio para material em que a formação dos precipitados não é uniformemente distribuída dentro do material.
- Aplicação para outros tipos de materiais.

## REFERÊNCIAS

ASTUDILLO, M. R. N. et al. Correlation between martensitic phase transformation and magnetic Barkhausen noise of AISI 304 steel. **Procedia Materials Science**, v. 9, p. 435–443, 2015.

BORBA R.M., **Comparativo de técnicas de determinação de fase ferrita no aço UNS S31803**, 8 f. Relatório final de pesquisa. Fundação Educacional Inaciana - FEI, 2009.

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.

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

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

FARIAS, A.R., **Caracterização do ruído magnético Barkhausen em matérias estruturais utilizando a transformada Wavelet**, 102 f. Dissertação (Mestrado). Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN, 2005.

FRANCO, FREDDY A.; PADOVESE, L.R. NDT flaw mapping of steel surfaces by continuous magnetic Barkhausen noise: Volumetric flaw detection case. **NDT&E Internacional**. n. 42, p. 721-728, 2009

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.

HELMUT FISCHER. Operator's Manual. Feritscope® MP30E-S and MP30E-R. Version 2.2. September 2006.

KIM, DONG-WON; KWON, DONGIL. Quantification of the Barkhausen noise method for the evaluation of time-dependent degradation. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, n. 257, p. 175–183, 2003.

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

LEITE, J. P.. **Técnica não destrutiva para análise da interação de linhas de campo magnético e material**. 150 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2014.

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.

MAGNABOSCO, R. **Influência da microestrutura no comportamento eletroquímico do aço inoxidável UNS S31803 (SAF 2205)**. 181 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo - USP, 1995.

MOORTHY, V. Important factors influencing the magnetic Barkhausen noise profile. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 52, n. 4, 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. **Material Science and Engineering**, n. A 527, p. 2886–2891, 2010.

O’SULLIVAN, D. et al. Characterisation of ferritic stainless steel by Barkhausen techniques. **NDT and E International**, v. 37, n. 6, p. 489–496, 2004.

OTÁROLA, T. et al. Embrittlement of a superduplex stainless steel in the range of 550-700 °C. **Engineering Failure Analysis**, v. 12, n. 6 SPEC. ISS., p. 930–941, 2005.

PARDAL, J. M. **Efeitos dos tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas, magnéticas e na resistência a corrosão de aços inoxidáveis superduplex**. 411 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal Fluminense - UFF, 2009.

PELIZZARI, E. **Análise de tensões em arames de risers flexíveis pelo método micromagnético de ruído Barkhausen**. 45 f. Tese de Graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2010

PEREZ-BENITEZ, J. A. et al. Analysis of the influence of some magnetizing parameters on magnetic Barkhausen noise using a microscopic model. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, n. 347, p. 51–60, 2013.

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 f. Tese de mestrado. Universidade Federal do Ceará - UFC, 2012

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, 201

SILVA, E. M. et al. Phase transformations evaluation on an UNS S31803 duplex stainless steel based on nondestructive testing. **Materials Science & Engineering**. n. 516, p. 126-130, 2009.

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.

SEDRIKS, A.J., **Corrosion of stainless steel**, 2.ed , John Wiley & Sons, NY,1996.

TAVARES, S. S. M.; SILVA, M. R.; PARDAL, J. M.; ABREU, H. F. H.; GOMES, A.M. Microstructural changes produced by plastic deformation in the UNS S31803 duplex stainless steel. **Journal of Materials technology**. v.180. n. 1-3. p. 318-322, 2006.

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.

VASHISTA, M.; MOORTHY, V. Influence of applied magnetic field strength and frequency response of pick-up coil on the magnetic Barkhausen noise profile. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 345, p. 208–214, 2013.

WANG, P. et al. An application of back propagation neural network for the steel stress detection based on Barkhausen noise theory. **NDT and E International**, v. 55, p. 9–14, 2013.