



**Francildo de Oliveira Silva**

**ESTUDO DO EFEITO DA GEOMETRIA NA INTERAÇÃO ENTRE  
CAMPO MAGNÉTICO INDUZIDO E MATERIAL PARA A  
DETERMINAÇÃO DA FASE FERRITA**

**João Pessoa – PB**

**Fevereiro de 2018**



**Francildo de Oliveira Silva**

**ESTUDO DO EFEITO DA GEOMETRIA NA INTERAÇÃO ENTRE  
CAMPO MAGNÉTICO INDUZIDO E MATERIAL PARA A  
DETERMINAÇÃO DA FASE FERRITA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Eletromagnetismo Aplicado

Edgard de Macedo Silva, Dr.

Orientador

João Pessoa – PB, Fevereiro de 2018

©Francildo de Oliveira Silva – francildo\_oliveira@hotmail.com

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

S586e

Silva, Francildo de Oliveira.

Estudo do efeito da geometria na interação entre campo magnético induzido e material para a determinação da fase ferrita / Francildo de Oliveira Silva. – 2018.

60 f. : il.

Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2018.

Orientação : Dr. Edgard de Macedo Silva.

1. Magnetismo. 2. Campo magnético. 3. Fase ferrita.. 4. Permeabilidade magnética. 5. Geometria. I. Título.

CDU 537.6/.8(043)

Lucrecia Camilo de Lima  
Bibliotecária  
CRB 15/132

Francildo de Oliveira Silva

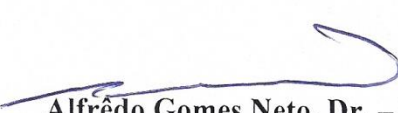
**ESTUDO DO EFEITO DA GEOMETRIA NA INTERAÇÃO ENTRE  
CAMPO MAGNÉTICO INDUZIDO E MATERIAL PARA A  
DETERMINAÇÃO DA FASE FERRITA**

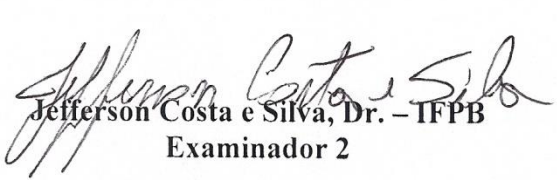
Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

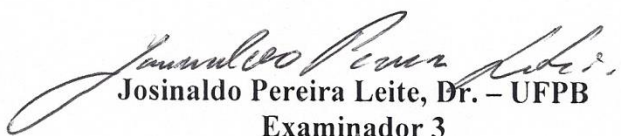
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 27/02/18.

BANCA EXAMINADORA

  
Edgard de Macedo Silva, Dr. – IFPB  
Orientador

  
Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB  
Examinador 1

  
Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB  
Examinador 2

  
Josinaldo Pereira Leite, Dr. – UFPB  
Examinador 3

João Pessoa – PB

Fevereiro de 2018

## **DEDICATÓRIA**

A meu pai Francisco de Assis Silva (in memoriam).

## AGRADECIMENTOS

- A Deus.
- À minha mãe, Maria de Lourdes, meus irmãos e toda a minha família por todo apoio dado.
- À minha esposa Fernanda por todo companheirismo.
- Ao professor e orientador Edgard de Macedo Silva pela orientação e ajuda para realização deste trabalho.
- Ao professor João Pereira Leite pelo auxílio na condução das medidas magnéticas.
- Aos participantes de minha banca de qualificação, Prof. Alfredo Gomes Neto, Prof. Jefferson Costa Silva pelas contribuições dadas.
- Aos colegas do laboratório do Grupo de Simulação e Comportamento de Materiais (GSCMat) pela ajuda na realização dos ensaios.
- Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) – Campus Cajazeiras, por ceder o estacionamento.
- Ao diretor geral do Campus João Pessoa, Prof. Neilor Cesar dos Santos pela liberação do alojamento no período dos resultados finais.
- Aos professores do Mestrado.
- A todos os colegas do Mestrado em Engenharia Elétrica.

*“Seja a mudança que você quer ver no mundo.”*

*Mahatma Gandhi*

## RESUMO

Os Aços Inoxidáveis Duplex são formados por uma fase denominada de ferrita e outra austenita, sendo que somente a primeira é a que sofre transformações. A ferrita se decompõe abaixo de 600°C formando uma fase fragilizante denominada de  $\alpha'$  e acima de 600°C em outra fase conhecida como sigma. Ensaio eletromagnéticos são utilizados para o acompanhamento dessas fases que levam a danos em estruturas. Entre eles, destacam-se correntes parasitas, ruído de Barkhausen, medidas de permeabilidade magnética e de campo magnético induzido. No presente trabalho é feito um estudo da influência da geometria circular sobre a interação entre campo magnético induzido e material, para acompanhamento da transformação da fase ferrita. A região de estudo escolhida foi entre 600°C e 850°, onde ocorre a transformação da fase ferrita para a fase sigma. Amostras com diferentes diâmetros e espessura foram submetidas a tratamentos térmicos a 850° C com durações de ¼ h, 1 h e 2 h para obtenção de diferentes quantidades de fase ferrita. Medidas de campo magnético induzido, dureza e quantidade de fase ferrita foram correlacionadas. Os resultados mostram que o ensaio é sensível na região de redução dos 5% iniciais da quantidade de ferrita, que corresponde à de fragilização do material. Contudo, mostrou ter limitação para amostras com espessuras abaixo de 2 mm.

Palavras-Chaves: fase ferrita; permeabilidade magnética; campo magnético induzido.



## ABSTRACT

Duplex Stainless Steels are formed by a phase called ferrite and another austenite. Only the first one suffers transformations. The Ferrite decomposes below 600°C forming a weakening phase called  $\alpha'$  and above 600°C in another phase known as sigma. Electromagnetic tests are used to follow these phases that lead to damage in structures. Among them, we highlight parasite currents, Barkhausen noise, magnetic permeability measurements and induced magnetic field. In the present work, a study of the circular geometry effect on the interaction between induced magnetic field and material, to monitor the transformation of the ferrite phase. The study region chosen was between 600°C and 850°C, where the transformation of the ferrite phase to the sigma phase. Samples with different diameters and thickness were subjected to heat treatments at 850°C with durations of ¼ h, 1 h and 2 h to obtain different amounts of ferrite phase. Measures of induced magnetic field, hardness and amount of ferrite phase were correlated. The results show that the test is sensitive in the region of reduction of the initial 5% of the amount of ferrite, which corresponds to the embrittlement of the material. However, it was shown to be limiting for samples with thicknesses below 2 mm.

Keywords: phase ferrite; magnetic permeability; induced magnetic field.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Produtos da decomposição da fase ferrita. a) Fase $\alpha'$ formada abaixo de 600°C. b) Microestrutura da amostra de AID 2507 envelhecida a 800°C por 1 hora.....	14
Figura 2: Ferritoscópio desenvolvido por Helmut Fisher. ....	15
Figura 3: Princípio de funcionamento do ferritoscópio .....	16
Figura 4: Fator de correção devido a espessura da amostra .....	17
Figura 5: Fator de correção através da distância de medição em relação a borda.....	18
Figura 6: Curvas de envelhecimento do AISD S322750 a 400°C, 450°C e 475°C .....	20
Figura 7: Curvas de envelhecimento do AISD S322750 a 475°C, 500°C e 550°C .....	21
Figura 8: AISD S322750 envelhecido em diversas temperaturas a partir do estado como recebido .....	21
Figura 9: Princípio de medição. ....	22
Figura 10: Representação esquemática da bancada de testes. ....	23
Figura 11: Simulação das linhas de campo para amostras de espessura de 2 e 11 mm. ....	23
Figura 12: Campo induzido no centro e na proximidade da borda para amostras Tipo1 do Aço SAE 1045 para H de 7,43 Oe (posição 1: 6mm a esq. do centro; posição 2: centro; posição 3: 6 mm a dir. do centro). ....	24
Figura 13: Variação da permeabilidade magnética e dureza para amostras do material 425°C (a) e 475°C (b) .....	25
Figura 14: Curva da amplitude em função do campo .....	28
Figura 15: Comparativo do percentual de energia de impacto $\times$ fase sigma $\times$ densidade de fluxo magnético para AISD SAF 2205 nas temperaturas de 800°C e 900°C. 28	
Figura 16: Curva de B $\times$ H do AID SAF 2205 para a temperatura de 850°C para os tempos envelhecimento de 15, 60 e 120 minutos .....	29
Figura 17: Comparativo do percentual de energia de impacto $\times$ fase sigma $\times$ permeabilidade magnética e para AID SAF 2205 nas temperaturas de 800°C e 900°C.....	30
Figura 18: Amostras utilizadas para o estudo da geometria. ....	32
Figura 19: Bancada de ensaios não destrutíveis.. ....	33
Figura 20: Amostra tratada a 850°C por 2 horas submetidas a aplicação do limiar. As regiões pretas corresponde à fase sigma.. ....	35

Figura 21: Microestrutura da amostra como recebida atacada com o reagente Behara. a) Sem aplicação do limiar. b) Com aplicação do Limiar.....	38
Figura 22: Material tratado a 850°C por 2 horas atacado como KOH. a) Sem aplicação do limiar. b) Com aplicação do limiar.....	39
Figura 23: Microestrutura da amostra tratada com o resgaste Behara. a) Envelhecimento de ¼ h. b) Envelhecimento de 1 h e c) Envelhecimento de 2 h. ....	40
Figura 24: Variação das medidas de dureza e percentual da fase ferrita em função do tempo de envelhecimento, para amostras tratadas na temperatura de 850°C pra tempos até 2 horas.....	42
Figura 25: Variação do campo magnético induzido para amostras com diferentes espessuras e tempos de tratamento.....	43
Figura 26: Medidas de campo magnético induzido e quantidade de fase sigma, em função do tempo de tratamento.....	44
Figura 27: Resultado experimental e simulado para amostras sem tratamento e com espessuras de 2, 4, 6 e 8 mm.....	45
Figura 28: Resultado experimental e simulado para amostras tratadas com ¼ h e espessuras de 2, 4, 6 e 8 mm.....	45
Figura 29: Resultado experimental e simulado para amostras tratadas com 1 h e espessuras de 2, 4, 6 e 8 mm.....	46
Figura 30: Resultado experimental e simulado para amostras tratadas com 2 h e espessuras de 2, 4, 6 e 8 mm.....	46
Figura 31: Resultado simulado, das amostras tratadas, extrapoladas pra espessuras até 30 mm.....	47
Figura 32: Variação do campo magnético induzido em função do diâmetro do material para as condições simuladas e experimentais.....	49
Figura 33: Variação do campo magnético induzido simulado, em função do diâmetro do material.....	49

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Composição do AID UNS-S31803 como recebido, em percentual de peso. ....	31
Tabela 2: Quantidade de fase ferrita e dureza. ....	41

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AID	Aços inoxidáveis duplex
B	Campo magnético induzido / Densidade de fluxo magnético / Indução magnética
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
END	Ensaios Não Destrutíveis
GSCMat	Grupo de Simulação de Comportamento de Materiais
H	Intensidade de campo magnético
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
IFPB	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
KOH	Hidróxido de Potássio
MO	Microscopia Óptica
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SAF	<i>Sandvik Austenite Ferrite</i>
UNS	<i>Unified Numbering System</i>
$\alpha$	Fase alfa (ferrita formada abaixo de 600°C)
$\alpha'$	Fase alfa linha (ferrita rica em cromo)
$\gamma$	Fase gama (austenita)
$\gamma_2$	Fase gama dois (austenita secundária)
$\mu$	Permeabilidade magnética
$\sigma$	Fase sigma
$\delta$	Fase delta (ferrita formada acima de 600°C)

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	11
1.1. OBJETIVOS .....	12
1.1.1. Objetivo Geral .....	12
1.1.2. Objetivos Específicos .....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	13
2.1. FASE FERRITA .....	13
2.2. DETECÇÃO DA FASE FERRITA ATRAVÉS DE MEDIDAS DE FERRITOSCÓPIO.....	15
2.3. LIMITAÇÕES DAS MEDIDAS POR FERRITOSCÓPIO .....	17
2.4. ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS NA REGIÃO DE REVERSIBILIDADE DOS DOMÍNIOS.....	22
2.4.1. Acompanhamento da formação da fase $\alpha'$ .....	25
2.4.2. Acompanhamento da formação da fase $\sigma$ por medidas de campo magnético induzido .....	27
2.4.3. Permeabilidade Magnética .....	29
3. METODOLOGIA .....	31
3.1. MATERIAL.....	31
3.2. ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA E DO DIÂMETRO .....	31
3.2.1. Obtenção das Amostras .....	31
3.2.2. Caracterização Magnética .....	33
3.3. ESTUDO DA VARIAÇÃO DAS DIMENSÕES DA SECÇÃO TRANSVERSAL.....	34
3.4. DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE FASE $\delta$ .....	34
3.4.1. Metalografia .....	34
3.4.2. Determinação da quantidade de $\delta$ por tratamento de imagem.....	35
3.4.3. Ensaio de Dureza .....	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	37
4.1. ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA DO MATERIAL.....	37
4.2. ESTUDO DO EFEITO DO DIÂMETRO DO MATERIAL.....	48
5. CONCLUSÃO .....	51
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	52
REFERÊNCIAS .....	53

# 1. INTRODUÇÃO

Ensaaios não destrutivos (END) são empregados para análises de descontinuidades presentes em peças em serviço, para determinação do melhor momento para intervenção em estruturas, de modo a evitar rompimentos. Esses são considerados não destrutivos por não necessitarem de remoção de corpos de prova do material a ser estudado. Estruturas metálicas, como tubulações do setor de petróleo e gás, também podem sofrer fragilização devido à presença de fases deletérias, além da presença de descontinuidades. A formação dessas fases, devido aos ciclos térmicos, leva a mudança das propriedades mecânicas e fragilização do material. Ensaaios eletromagnéticos vêm sendo utilizados para o acompanhamento de fases que levam a danos em estruturas. Entre eles, destacam-se correntes parasitas, ruído de Barkhausen, medidas de permeabilidade magnética e de campo induzido na região de reversibilidade do material.

Os Aços Inoxidáveis Duplex são aços que possuem boas propriedades de resistência à corrosão e elevados valores de resistência mecânica, além de possuírem uma boa tenacidade. Essas características são atribuídas a sua microestrutura bifásica, composta por proporções de 50% de ferrita ( $\alpha$ ) e 50% austenita ( $\gamma$ ). Nesses materiais, em determinados processos de conformação mecânica a quente e soldagem em temperaturas superiores a 300°C, ocorrem o aparecimento de formação de fases prejudiciais às suas propriedades, onde destacamos a formação de fase  $\alpha'$  de 350°C a 550°C e fase  $\sigma$  de 600°C a 1000°C (PARDAL, 2009). Estas fases são paramagnéticas e são formadas a partir da decomposição da ferrita mudando a permeabilidade do material. O acompanhamento das transformações da ferrita é necessário para o estudo da fragilização desses aços.

O ferritoscópio é um equipamento portátil que vem sendo aplicado para acompanhamento de fase em Aços Inoxidáveis, cuja medida é baseada na permeabilidade magnética da fase ferrítica. A calibração deste equipamento é feita por meio de blocos fornecidos pelo fabricante com valores de ferrita já fixados. O sinal de leitura é proporcional ao teor da fase ferromagnética da amostra. Entretanto, o conteúdo de ferrita medido no ferritoscópio pode ser afetado pelas características geométricas e superficiais da amostra, sendo necessário empregar fatores de correção para ajustar os valores medidos (PARDAL, 2009).

A determinação de campo magnético induzido na região reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos também vem sendo aplicada para acompanhamentos

das fases do produto de decomposição da ferrita em aços inoxidáveis duplex. Medidas da interação entre campo e material nestes ensaios medem a variação da permeabilidade do material. As fases sigma e alfa linha foram estudadas por este ensaio e foi comprovado ser capaz de acompanhar a fragilização devido à transformação de fases. Contudo, as medidas podem ser afetadas por variações geométricas e correções devem ser realizadas como a técnica de permeabilidade que aplica o equipamento denominado de medidor de fase ferrita (ferritoscópio).

No presente trabalho foi feito o estudo da variação da geometria circular na interação entre campo magnético induzido e material, na região de reversibilidade do movimento dos domínios magnéticos. O estudo da decomposição da fase ferrita na região de formação da fase deletéria sigma, para um aço inoxidável AID SAF 2205 é realizado, bem como a determinação da limitação da aplicação do ensaio como não destrutivo.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo geral

Estudar o efeito da geometria na interação entre campo magnético induzido e material para a detecção de fase ferrita.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Estudar o efeito da espessura na interação entre campo magnético induzido e material para seções circulares;
- Estudar o efeito do diâmetro na interação entre campo magnético induzido e material;
- Estudar a influência da quantidade de ferrita no endurecimento de um aço inoxidável duplex;
- Analisar os resultados e documentá-los;



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. FASE FERRITA

A ferrita, também conhecida como ferro  $\alpha$ , apresenta sua estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). Esta fase é responsável pelas propriedades magnéticas dos aços por ser ferromagnética. O ferro puro também pode se apresentar com a estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). Neste caso essa fase é denominada de austenita e é paramagnética. Estas fases estão presentes nos aços e neste trabalho será estudada a fase ferrita em um aço inoxidável duplex (TAVARES et al., 2010; CALLISTER, 2007; FARGAS, 2009; FIALHO, 2015; CULLITY, 2009).

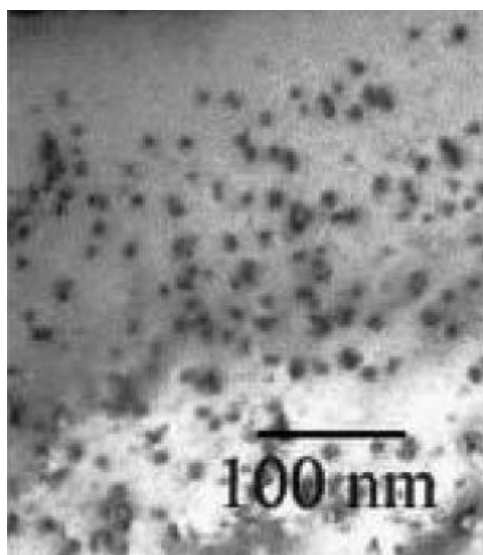
Os aços inoxidáveis duplex são formados por uma fase denominada de ferrita e outra de austenita. A primeira é ferromagnética e a segunda paramagnética. Todas as transformações que ocorrem nessa classe de material se deve somente a fase ferrita, pois a austenita não sofre transformações (TAVARES et al., 2010; SILVA et al., 2009; FARGAS et al., 2009; FIALHO, 2015).

As propriedades magnéticas dos aços inoxidáveis são influenciadas pela presença de fases prejudiciais às propriedades de resistência à corrosão e tenacidade. Entre estas fases fragilizantes destacam a fase  $\alpha'$  e a fase  $\sigma$ . A primeira é formada na faixa de temperaturas 350°C a 550°C e a segunda para temperaturas entre 600°C e 1000°C (FRANÇA NETO, 2011; LO et al., 2007; MAGNABOSCO et al., 2012). Estas fases são produtos da decomposição da fase ferrita do material que é ferromagnética. A formação dessas fases leva a mudança da permeabilidade do material devido à característica paramagnética das fases formadas (FIALHO, 2015; SILVA et al., 2016).

A Figura 1 (a) mostra o produto da decomposição da fase ferrita para temperaturas abaixo de 600°C, a fase  $\alpha'$ , que se caracteriza por ser de tamanho nanométrico e uniformemente distribuída no interior da fase  $\alpha$ . A Figura 1 (b) mostra a fase formada da decomposição da ferrita para temperaturas acima de 600°C, que é conhecida como fase sigma. Esta se forma a partir de contorno de grão da ferrita.

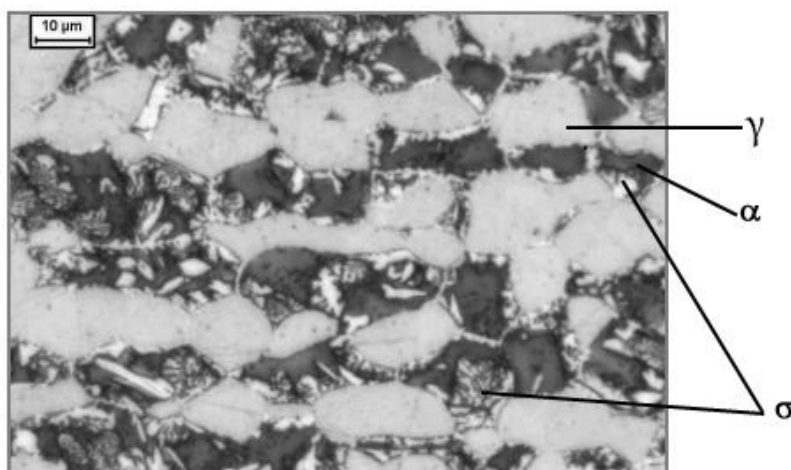
**Figura 1: Produtos da decomposição da fase ferrita. (a) Fase  $\alpha'$  formada abaixo de 600 °C. b) Microestrutura da amostra de AID 2507 envelhecida a 800°C por 1 hora.**

**a) Fase  $\alpha'$  formada abaixo de 600 °C.**



**Fonte: OTÁROLA, 2005 apud PARDAL, 2009.**

**b) Microestrutura da amostra de AID 2507 envelhecida a 800°C por 1 hora.**



**Fonte: Adaptado de ROMANA, 2009.**

## 2.2. DETECÇÃO DA FASE FERRITA ATRAVÉS DE MEDIDAS DE FERRITOSÓPIO

Diversos métodos baseados em variáveis magnéticas têm sido testados, para analisar o efeito das fases indesejáveis, como análise do ruído de Barkhausen, correntes parasitas e medidas de permeabilidade (MOHAPATRA et al., 2013; SILVA et al., 2016; NORMANDO et al., 2010; PRAXEDES, 2012). Neste trabalho é demonstrado o método de permeabilidade utilizado para acompanhar transformações da fase ferrita em um aço inoxidável duplex. O aparelho utilizado para esse fim é denominado de ferritoscópio, cuja medida é baseada na permeabilidade magnética da fase ferrita. O ferritoscópio é um aparelho que emprega um campo magnético para determinar a quantidade de ferrita (fase ferromagnética) presente no material (TAVARES, 2006 apud PARDAL, 2009). Este aparelho que é mostrado na Figura 2 e tem a vantagem de ser portátil, o que permite uma rápida leitura.

**Figura 2: Ferritoscópio desenvolvido pela Helmut Fisher.**



**Fonte: HEMULT FISHER, 2011.**

O princípio de funcionamento desse equipamento é baseado no método da indução magnética. De acordo com Tavares et al. (2010) um campo magnético gerado por uma bobina interage com as fases magnéticas da amostra, como mostrado na Figura 3. As mudanças no campo magnético induzem uma tensão de saída na segunda bobina proporcional à quantidade de fase ferromagnética da amostra. A tensão gerada é avaliada e como a fase estudada é

paramagnética, que é gerada pela fase ferrita, sua precipitação provoca uma queda no sinal de leitura da fase ferromagnética no ferritoscópio.

A leitura da medição do ferritoscópio é obtida como percentual de ferrita. A calibração é feita por meio de blocos fornecidos pelo fabricante, onde o teor de ferrita em cada um deles é conhecido, permitindo o ajuste do instrumento.

De acordo com a equação (1), o valor obtido no ferritoscópio pode ser considerado proporcional à variação de permeabilidade registrada pelo instrumento em virtude da precipitação de fase fragilizantes conforme a equação:

$$\Delta\mu \propto \left(\frac{\Delta\delta}{\delta i}\right) = \left(\frac{\delta i - \delta e}{\delta i}\right) \quad (1)$$

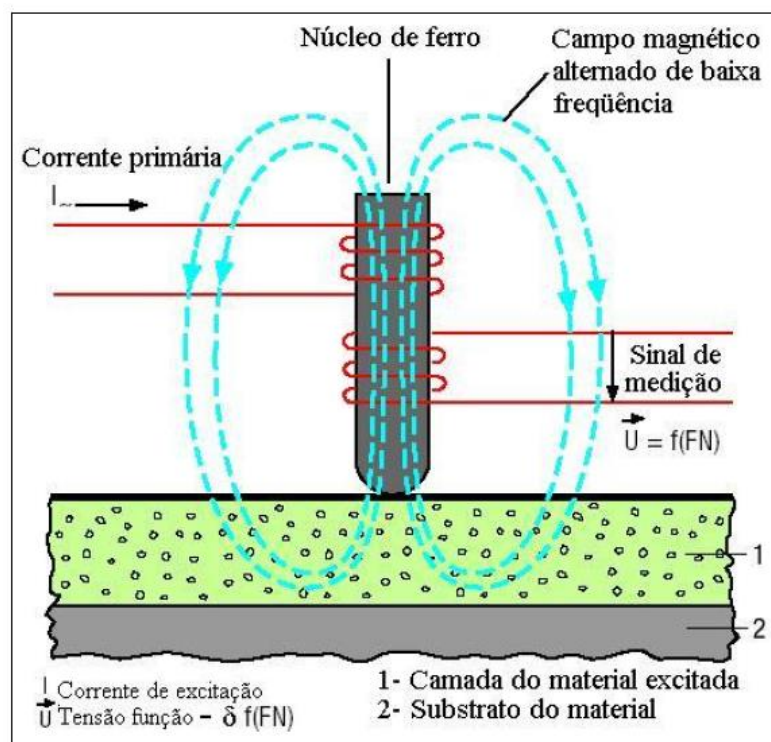
Sendo:

$\Delta\delta/\delta i$ : Variação específica da fase ferrita medida no ferritoscópio proporcional à variação de permeabilidade registrada pelo instrumento ( $\Delta\mu$ ).

$\delta i$ : Percentual de ferrita na condição inicial do material, quando não há a presença de precipitados medida pelo ferritoscópio.

$\delta e$ : Percentual de ferrita na condição de envelhecimento medida pelo ferritoscópio.

**Figura 3: Princípio de Funcionamento do Ferritoscópio.**



Fonte: PARDAL, 2009.

### 2.3. LIMITAÇÕES DAS MEDIDAS POR FERRITOSCÓPIO

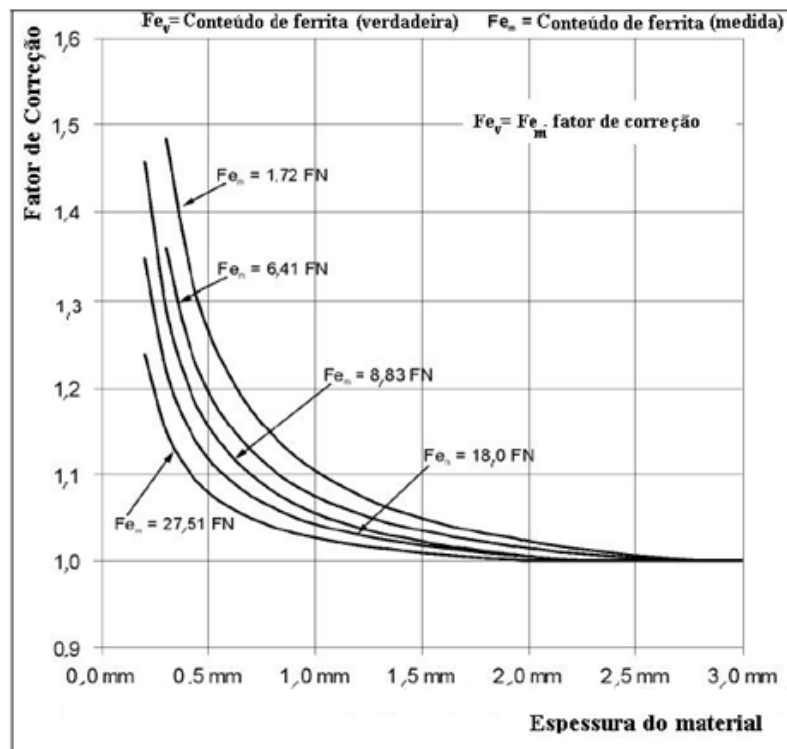
A quantidade de ferrita medida no ferritoscópio pode ser afetada pelas características geométricas e superficiais da amostra (PARDAL, 2009). Os fatores que alteram a medição da ferrita são:

- Curvatura da amostra medida;
- Espessura da amostra;
- Influência da espessura do recobrimento ou camada;
- Distância da extremidade ou borda do material ao ponto de medição.

A seguir serão apresentados os fatores que são considerados para a correção do efeito da espessura e da distância a extremidade do material, que são considerados no presente trabalho.

O gráfico da Figura 4 mostra os fatores a serem utilizados para a correção da quantidade de ferrita através da espessura da amostra (HELMUT FISHER, 2006 apud PARDAL, 2009).

**Figura 4: Fator de correção devido a espessura da amostra.**



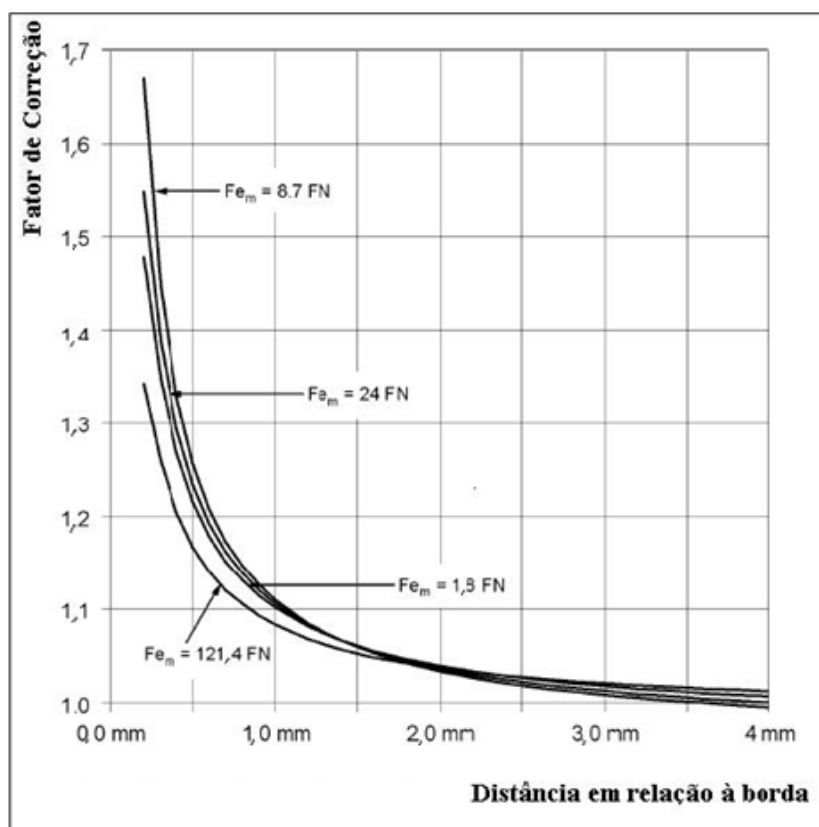
**Fonte: HELMUT FISHER, 2006 apud PARDAL, 2009.**

A leitura no ferritoscópio pode ser verificada como percentual de ferrita ou número de ferrita (ferrite – number - FN). O ferritoscópio é calibrado com padrões tendo como limite de detecção 0,1 % de ferrita. De acordo com a Figura 4, as amostras com espessuras acima de 2 mm não necessitam de correção (HELMUT FISHER, 2006 apud PARDAL, 2009).

O gráfico da Figura 5 apresenta os fatores a serem utilizados para a correção da quantidade de ferrita através da distância de medição em relação à borda da amostra, (HELMUT FISHER, 2006 apud PARDAL, 2009).

A quantidade de ferrita calculada pelo ferritoscópio também pode ser afetada com o aumento do grau de deformação. Esta diminuição da quantidade de fase ferromagnética em chapas obtidas pelo ferritoscópio pode ser devido ao fato de o princípio de funcionamento deste equipamento ser baseado na permeabilidade magnética do material. A deformação gerada acarreta mudanças na textura do material, gerando erros nas leituras (PARDAL, 2009).

**Figura 5: Fator de correção através da distância de medição em relação a borda.**



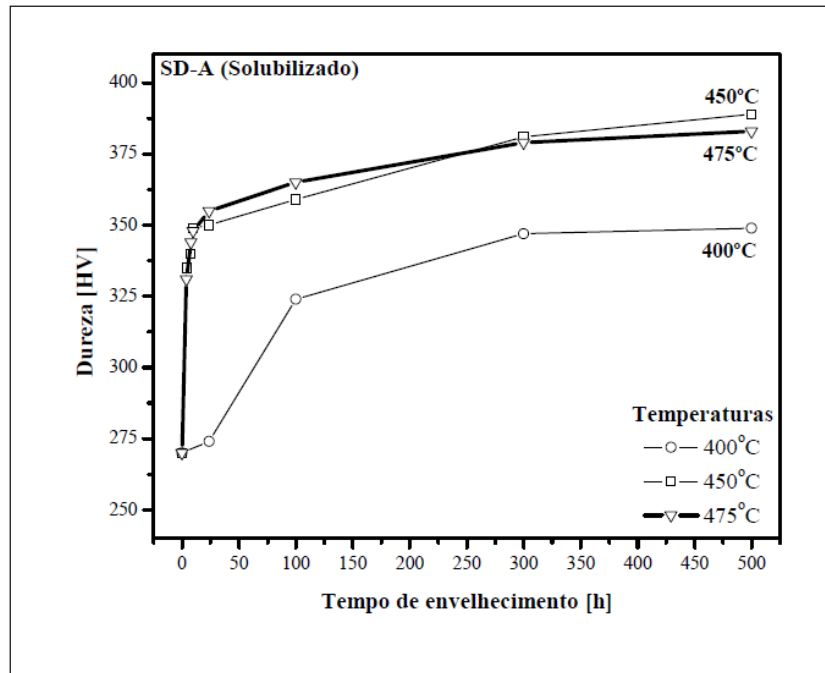
**Fonte: HELMUT FISHER, 2006 apud PARDAL, 2009.**

Pardal (2009) realizou medições com o ferritoscópio no Centro de Pesquisas da ARCELORMITTAL INOX, testando amostras do AISD UNS S32750 com formatos de tubo com costura e barra redonda nas condições solubilizadas, com tratamento abaixo e acima de 550°C que é a temperatura de recristalização, bem como nas resfriadas a partir de 1100°C com diversas taxas de resfriamento. A variação específica da fase ferrita medida no ferritoscópio, dada pelas diferenças de leituras entre a condição inicial e aquela tratada termicamente ( $\delta_i$ ) em uma determinada condição, em relação ao valor inicial no estado solubilizado da ferrita é proposta como unidade de medida nas amostras envelhecidas em baixas temperaturas. Já nas amostras em altas temperaturas foi considerado como percentual de fases deletérias ( $F_d$ ) a diferença entre a leitura da ferrita existente na condição solubilizada ( $\delta_i$ ) e a do material tratado termicamente ( $\delta_t$ ), mostrado na equação (2):

$$F_d = \delta_i - \delta_t \quad (2)$$

Pardal (2009) apresentou as curvas de envelhecimento do AISD UNS S32750 nas condições tratadas a 400°C, 450°C e 475°C, conforme a Figura 6. De acordo com Pardal (2009) era esperado que a curva de 475°C nas primeiras 24 horas apresentasse um aumento substancial na dureza devido á forte cinética de precipitação, resultante da decomposição da matriz ferrítica ( $\delta$ ). Ainda é possível observar que a taxa de aumento da dureza, diminui conforme o aumento de tempo a 475°C, após 24h de envelhecimento. A dureza obtida nesse caso foi 383HV. Analisando o tratamento a 450°C, verifica-se que os valores obtidos foram próximos aos tratados a 475°C e a dureza também foi 383HV. Durante o envelhecimento de 400°C por 500 horas, o valor da dureza foi de 349HV.

**Figura 6: Curvas de Envelhecimento do AISD S322750 a 400°C, 450°C e 475°C.**



**Fonte: PARDAL, 2009.**

Pardal (2009) fez comparações com os efeitos nos envelhecimentos das amostras tratadas termicamente a 475°C, 500°C e 550°C. Na figura 7 a curva de envelhecimento na temperatura de 500°C é semelhante à obtida a 475°C, mas os valores de dureza na temperatura de 500°C são menores do que a 450°.

Fazendo um comparativo com as últimas condições, se pressupõe que o endurecimento por precipitação  $\alpha'$  para esta liga é mais susceptível no intervalo da temperatura de 450°C a 475°C.

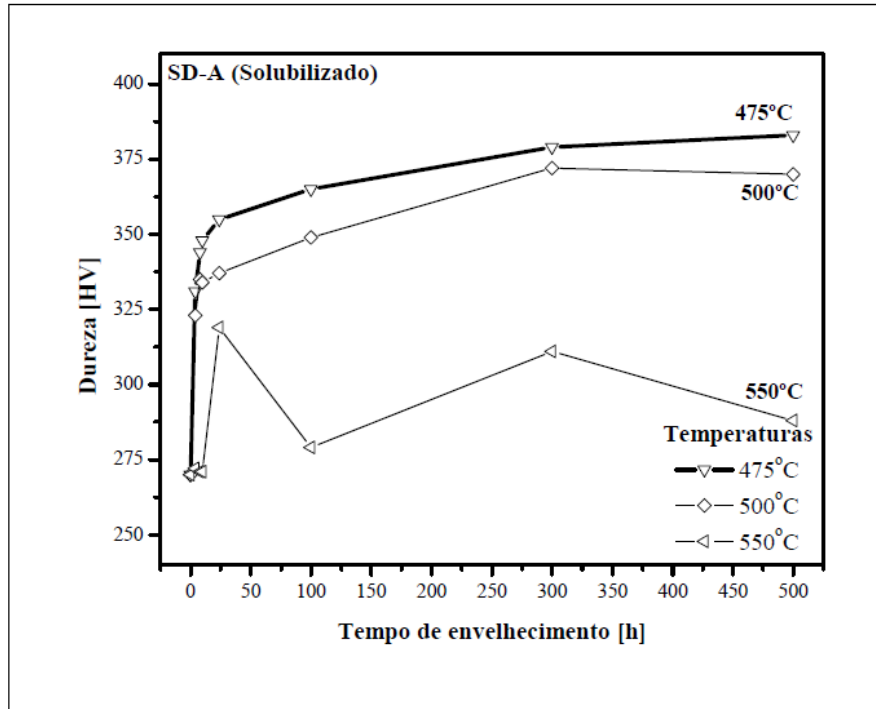
Pardal (2009) utilizou curvas levantadas com o ferritoscópio para a temperatura de envelhecimento entre 400°C e 550°C nas amostras retiradas do material como recebido do AISD UNS S32750 como mostra a Figura 8.

Estas curvas são semelhantes às anteriores em relação à dureza, com exceção a temperatura de 550°C.

Pardal (2009), concluiu que de acordo com o comportamento mostrado nas Figuras 7 e 8, o ferritoscópio pode ser usado para detectar as mudanças microestruturais que levam a fragilização e ao endurecimento nas temperaturas de 400°C e 500°C, mas observa que o equipamento detecta uma queda acentuada na permeabilidade com o aumento da temperatura e do tempo de envelhecimento no intervalo de 400°C a 500°C.

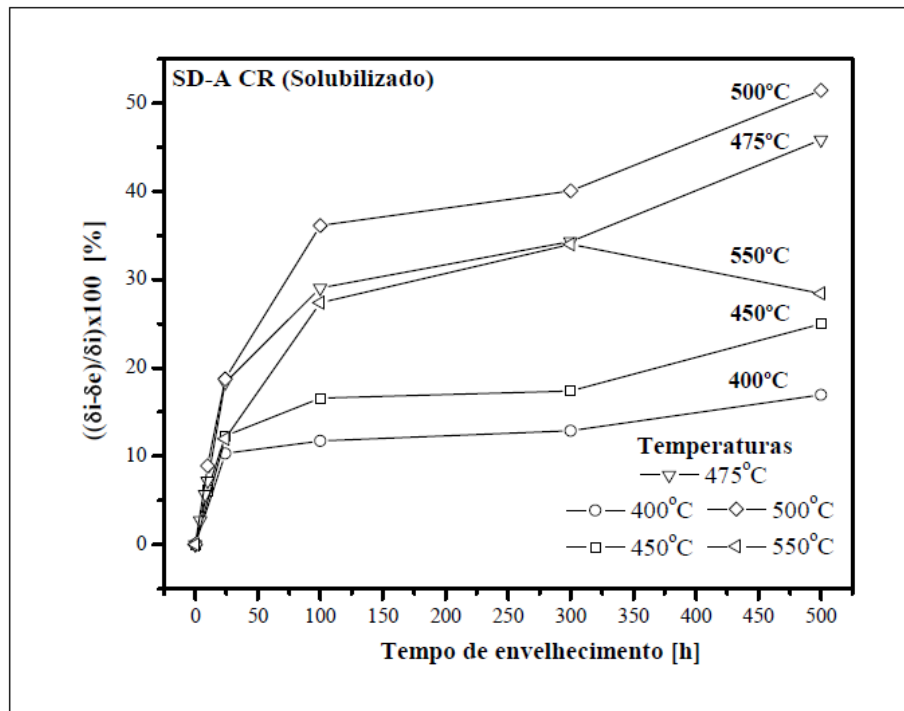


Figura 7: Curvas de Envelhecimento do AISD S322750 a 475°C, 500°C e 550°C.



Fonte: PARDAL, 2009.

Figura 8: AISD S322750 envelhecido em diversas temperaturas a partir do estado como recebido.

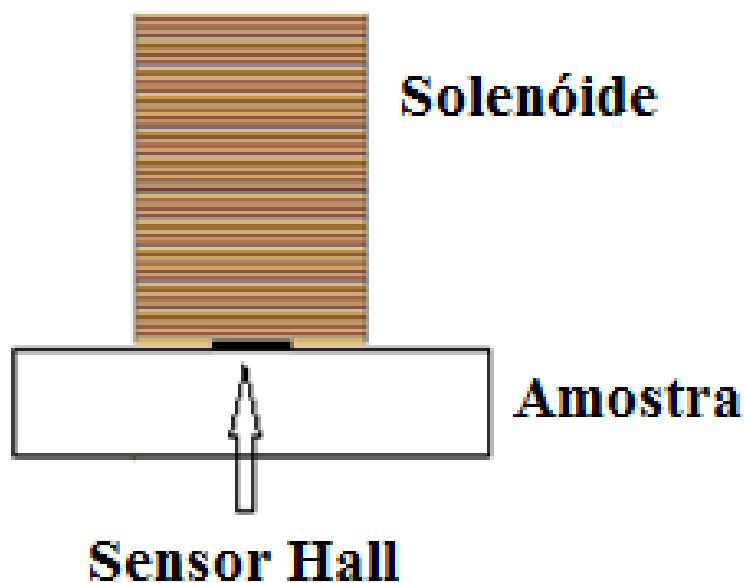


Fonte: PARDAL, 2009.

## 2.4. ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS NA REGIÃO DE REVERSIBILIDADE DOS DOMÍNIOS

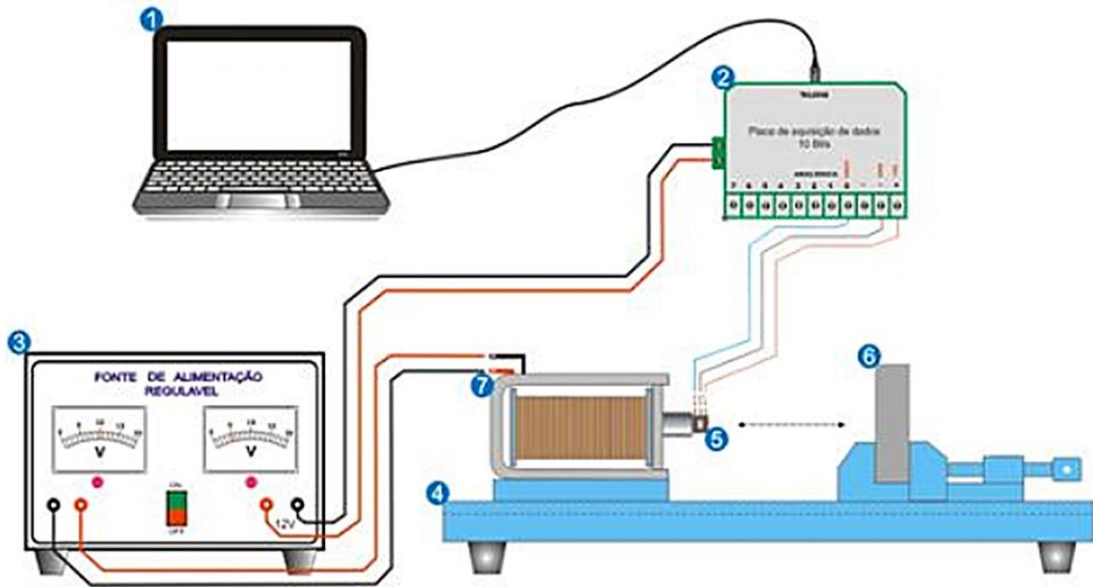
Valores de campo magnético induzido na região de reversibilidade magnética do movimento das paredes dos domínios magnéticos têm sido utilizados para acompanhamento de fases fragilizantes em aços inoxidáveis duplex e determinação da direção de fácil magnetização em aços ao carbono comum (SILVA et al., 2016; LEITE, 2014). Na Figura 9 temos o princípio de funcionamento do ensaio. Neste uma intensidade de campo magnético é gerada por um solenoide e um sensor de campo magnético é posicionado entre a amostra e o material. O sensor é responsável pela medição do campo magnético induzido da interação entre campo magnético e amostra. A Figura 10 mostra a representação esquemática da bancada experimental utilizada no ensaio. Onde se tem: (1) computador, (2) placa de aquisição, (3) fonte de alimentação, (4) base de poliacetalte, (5) sensor de efeito Hall, (6) amostra e (7) solenoide (SILVA et al., 2016).

**Figura 9: Princípio de medição.**



Fonte: SILVA et al., 2016.

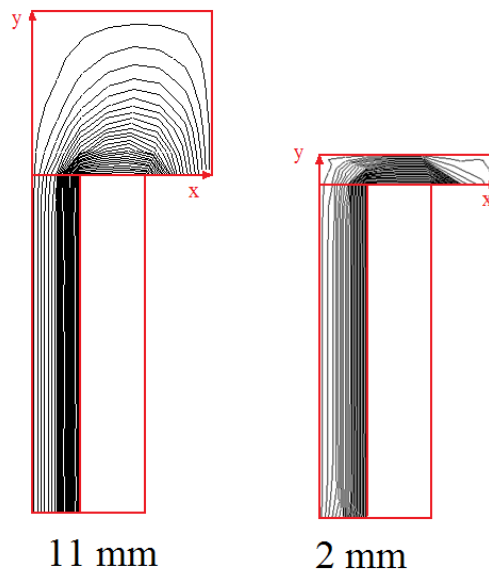
**Figura 10: Representação esquemática da bancada de testes.**



**Fonte: Adaptado de SILVA et al., 2016 apud OLIVEIRA, 2016.**

A Figura 11 mostra a simulação, por meio dos Métodos dos Elementos Finitos, das linhas de campo resultantes da interação entre a intensidade de campo magnético externo e material.

**Figura 11: Simulação das linhas de campo para amostras de espessura de 2 e 11 mm.**

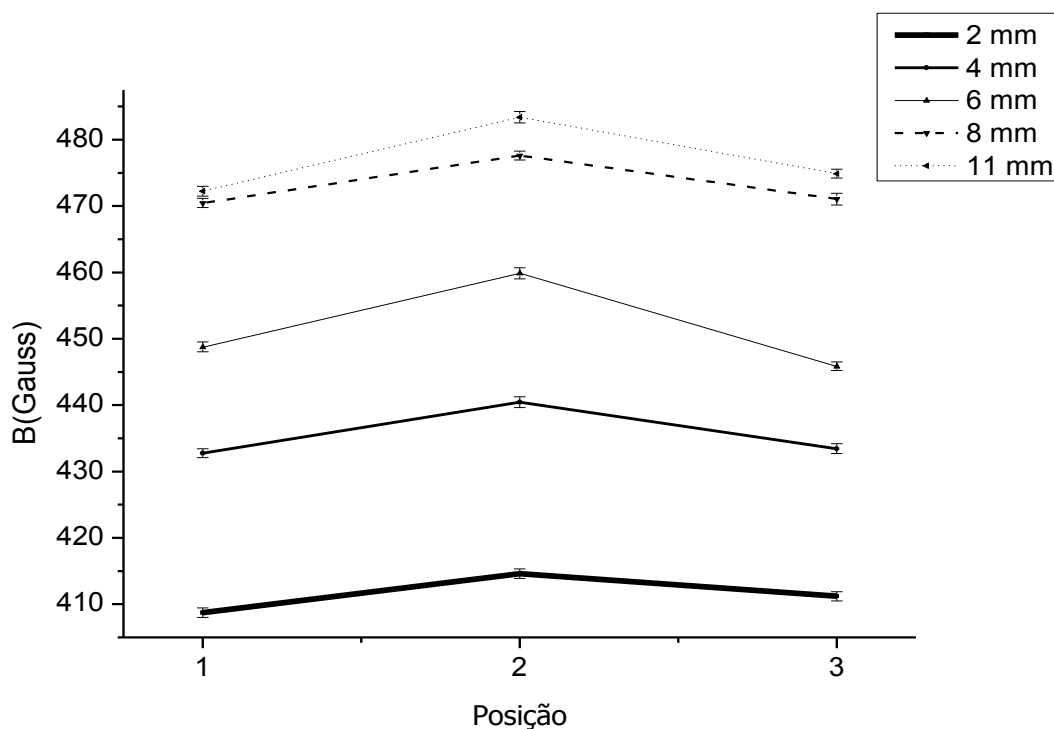


**Fonte: CAVALCANTE, 2013.**

Na Figura 11 temos a representação das linhas de campo para um material ferromagnético denominado de aço SAE 1045 (CAVALCANTE, 2013) com diâmetro de 24 mm e espessuras de 2 e 11 mm. Nota-se que com o aumento da espessura as linhas de campo passam a percorrer mais facilmente o material e são menos afetadas pelo meio externo que é o ar. Isto indica que o valor de campo magnético induzido para uma intensidade de campo magnético fixa cresce com o aumento da espessura até que o meio externo deixe de influenciar na penetração das linhas de campo.

Leite (2014) estudou o efeito da espessura e de borda em um aço SAE 1045 de diâmetro de 24 mm com espessuras de 2, 4, 6, 8 e 11 mm, ver Figura 12. Nota-se um aumento nos valores de campo magnético induzido com o aumento da espessura. Contudo, ao deslocarmos para as bordas ocorre um decréscimo. Isto ocorre devido à influência do meio externo de menor permeabilidade sobre as medidas. A Figura 12 também mostra que para medidas a partir de 8 mm as medidas se tornam semelhantes. Isto se deve ao fato que as linhas de campo penetrarem com maior facilidade no material com o aumento da espessura.

**Figura 12: Campo induzido no centro e na proximidade da borda para amostras Tipo1 do aço SAE 1045 para H de 7,43 Oe (posição 1: 6mm a esq. do centro; posição 2: centro; posição 3: 6 mm a dir. do centro).**



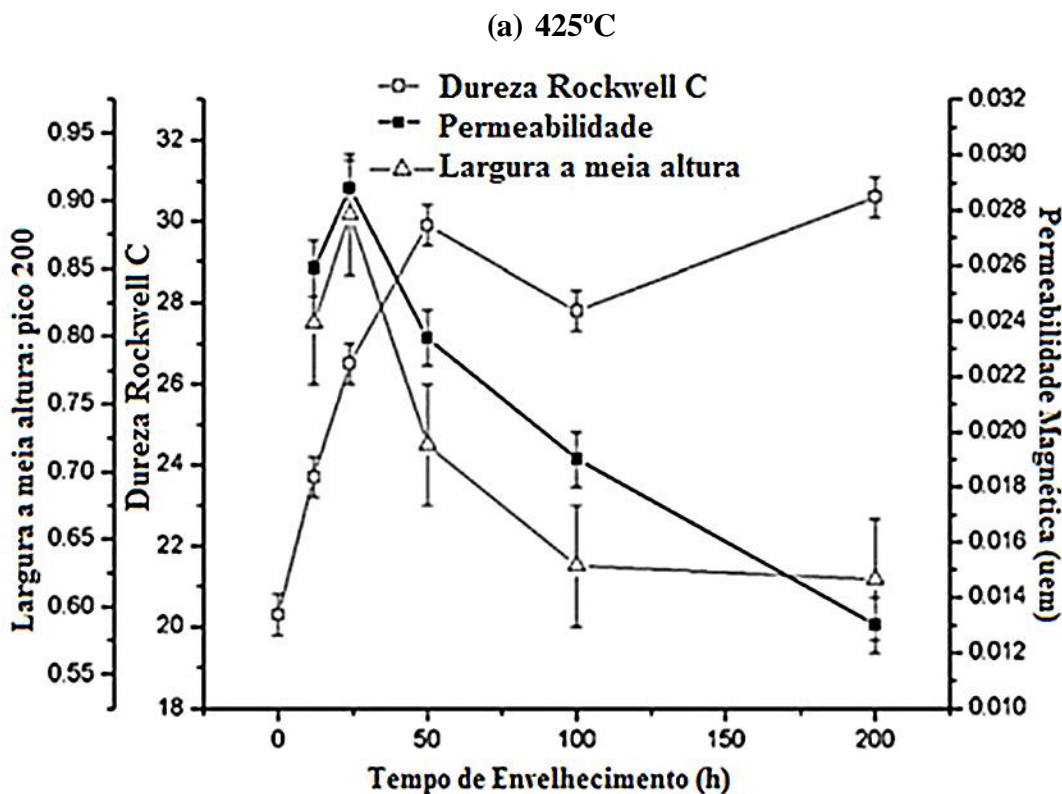
Fonte: LEITE, 2014.

### 2.4.1. Acompanhamento da formação da fase $\alpha'$

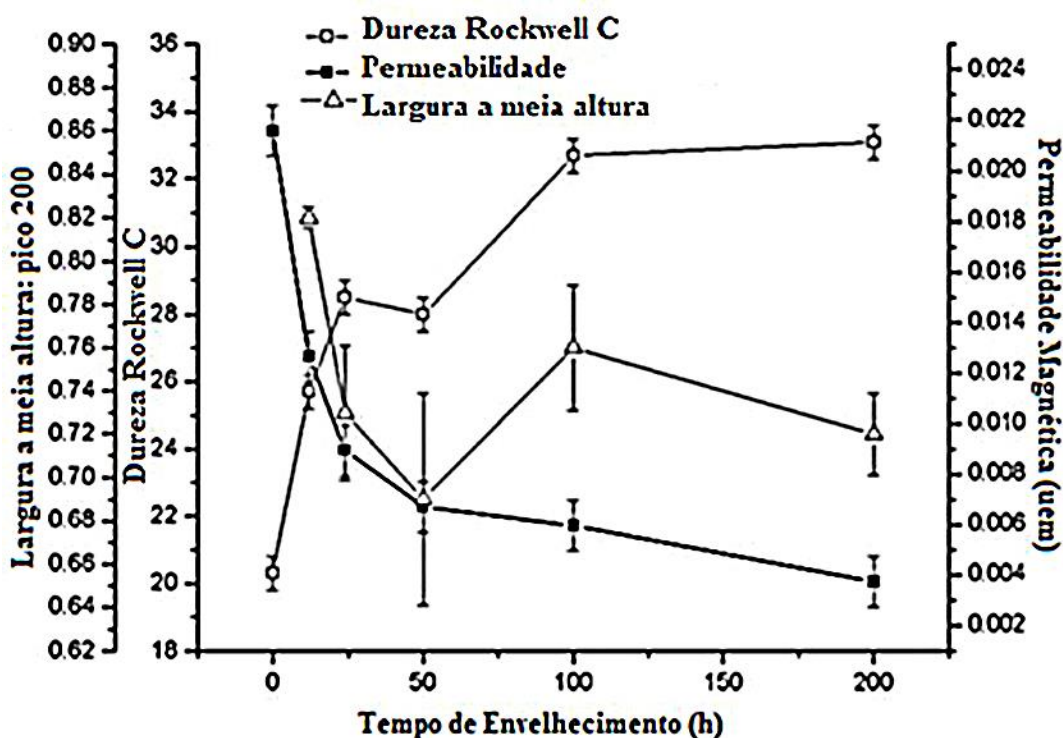
Transformações de fases encontradas no aço UNS S13803 abaixo de 550°C são resultados do seu mecanismo de decomposição. Este é formado pela decomposição espontânea da matriz de ferrita, em que regiões ricas e pobres em soluto, que originam a fase  $\alpha'$  nas regiões ricas, por meio de flutuações de decomposição. Silva et al. (2016) estudaram este processo de transformação por meio de técnicas não destrutivas. A formação da fase  $\alpha'$  em aços inoxidáveis duplex foi estudada nas temperaturas entre 425°C a 475°C em períodos de tempo até 200 h conforme as figuras 13 (a) e 13 (b).

Silva et al. (2016) observaram que as amostras envelhecidas nas temperaturas de 425 e 475°C tiveram a presença de duas regiões de endurecimento pelo que mostram os resultados de dureza, sendo cada uma com diferentes taxas. Observou-se também, que a cinética de transformação é mais lenta a 425°C e mais rápida a 475°C com períodos de início e fim, respectivamente, de 48 e 24h nas temperaturas estudadas.

Figura 13: Variação da permeabilidade magnética e dureza para amostras do material 425°C (a) e 475°C (b).



b) 475°C



Fonte: Adaptado de SILVA et al., 2016.

Medidas de largura a meia altura foram utilizadas para acompanhar transformações microestruturais causadas pela decomposição da ferrita. Essas medidas são sensíveis à formação da fase  $\alpha'$ , que é produto da decomposição da fase ferrita. Essa nova fase, por possuir uma composição química próxima a da ferrita provoca o alargamento do pico (200) do espectro de raios X do material. Essas medidas caem com a formação da nova fase.

Os resultados da permeabilidade magnética, calculados com base na tensão de saída do sensor de efeito Hall, tiveram um comportamento semelhante aos das medidas de meia altura, e foram afetados pelas variações microestruturais dos materiais em estudo. A tensão de saída do sensor é proporcional à densidade das linhas de fluxo magnético que o atinge. As curvas de permeabilidade magnética revelam redução significativa para os tempos de envelhecimento inferior a 50 h e tendência a estabilizar após este tempo de envelhecimento.

A fase  $\alpha'$  é paramagnética e se forma uniformemente distribuída no interior da ferrita. Deste modo, os valores de permeabilidade caem devido à formação da fase não ferromagnética e pela dificuldade do movimento das paredes dos domínios magnéticos causadas pela microestrutura da nova fase (SILVA et al., 2016).

## 2.4.2. Acompanhamento da formação da fase $\sigma$ por medidas de campo magnético induzido

Medidas de campo magnéticas induzidos têm sido utilizadas para acompanhamento de fases sigma em aços inoxidáveis duplex (SILVA et al., 2016; OLIVEIRA, 2016). Estas são realizadas por medidas de sensores de efeito Hall, posicionados entre uma bobina e o material a ser estudado. Uma intensidade de campo magnético é aplicada pela bobina e o campo magnético induzido na interação é detectado no sensor.

Oliveira (2016) acompanhou a formação da fase fragilizante sigma. Estas fases se formam nas temperaturas acima de 600°C e apresentam dureza em torno de 900 HV. Uma quantidade de 4% dessa transformação já é suficiente para fragilização do material (TAVARES et al., 2010). O estudo foi realizado através de medidas de campo magnético induzido em amostras submetidas a intensidades de campo magnético, na região de reversibilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos.

A Figura 14 apresenta a diferença entre os valores de campo magnético induzido em amostras com envelhecimento de 120 minutos e a amostra como recebido, fazendo assim a comparação de uma amostra com fase  $\sigma$  e outra sem fase  $\sigma$  (OLIVEIRA, 2016). Essa diferença foi denominada de amplitude de medida e foram determinadas para amostras tratadas, com esse tempo, para temperaturas variando de 700°C a 1000°C. A Figura 14 apresenta os valores das variações das amplitudes de medidas, para essa faixa de temperatura, com o objetivo de determinar a intensidade de campo magnético ideal a ser utilizada no ensaio eletromagnético desenvolvido.

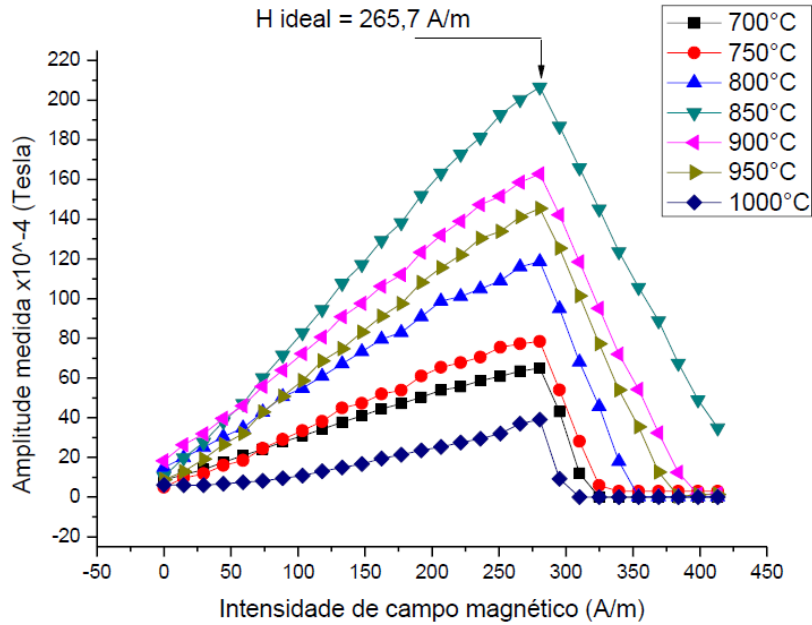
Os valores da amplitude de todas as amostras atingem um pico de valor comum para uma intensidade de campo magnético aplicado de 265,7 A/m, como mostra a figura 14. A diminuição nos valores de campo magnético induzido, após o pico, se deve a saturação do sensor Hall. Portanto, 265,7 A/m foi o valor capaz de detectar a maior amplitude e ficou sendo considerado o H ideal.

A Figura 15 mostra o comparativo entre a densidade de fluxo magnético, energia de impacto e percentual de fase  $\sigma$  a partir da aplicação do H ideal (OLIVEIRA, 2016).

Oliveira (2016) observou que o aumento do percentual de fase  $\sigma$  provoca a redução da energia de impacto e da densidade de fluxo magnético. A fase sigma se caracteriza por ser paramagnética e o aumento de sua quantidade leva a redução da permeabilidade do material

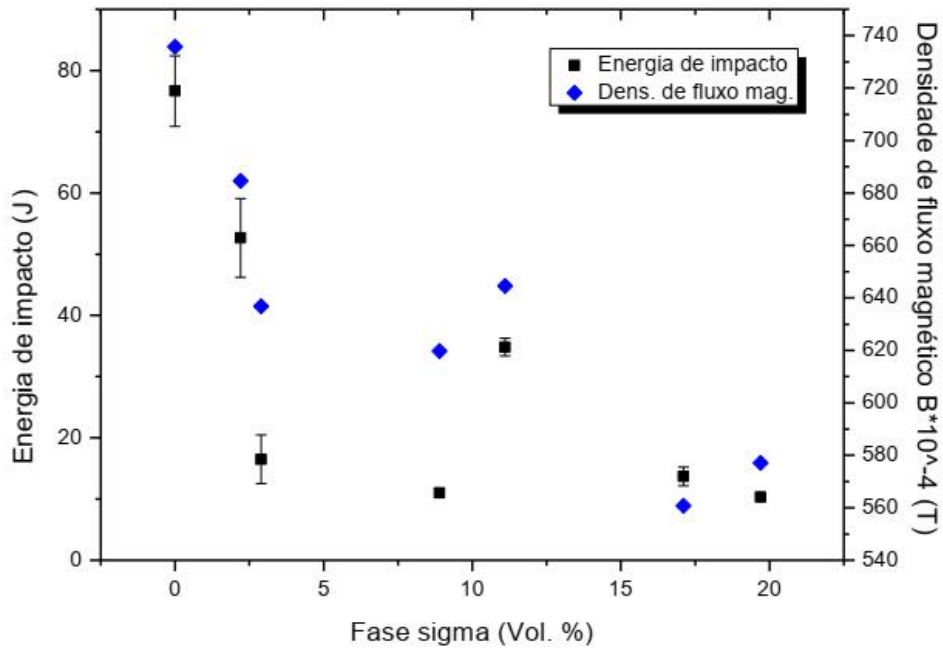
(SILVA et al., 2016). Além disso, valores superiores a 4% levam a redução da energia absorvida, pois essa fase tem elevada dureza e reduz a tenacidade do material.

**Figura 14: Curva da amplitude em função do Campo.**



Fonte: OLIVEIRA, 2016.

**Figura 15: Comparativo do percentual de energia de impacto  $\times$  Fase Sigma  $\times$  Densidade de fluxo magnético para AID SAF 2205 nas temperaturas de 800°C e 900°C.**



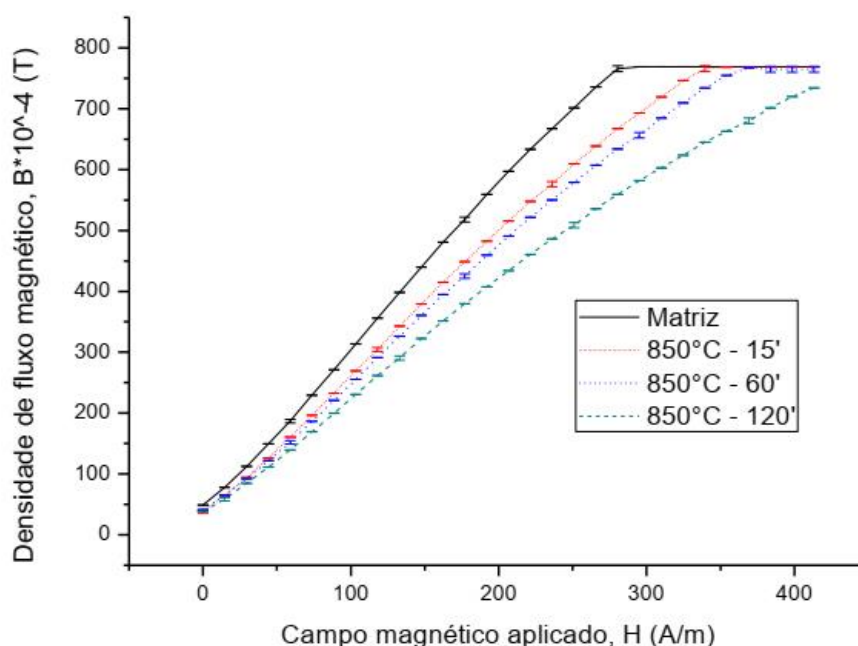
Fonte: OLIVEIRA, 2016.



### 2.4.3 Permeabilidade Magnética

A região de reversibilidade de uma curva de magnetização se caracteriza por um comportamento linear entre a intensidade de campo magnético aplicado e a densidade de fluxo magnético, como observado na Figura 16. Nesta região, a permeabilidade pode ser obtida pela medida da tangente dessa reta. Oliveira (2016) aplicando diferentes intensidades de campo magnético concluiu que o aumento no percentual da fase  $\sigma$  contribui para a redução da permeabilidade magnética ( $\mu$ ) do AID. Os resultados comprovam que amostras envelhecidas na temperatura de 850°C apresentam maior redução na inclinação. Isto se deve a maior cinética de formação dessa fase ser nesta temperatura, para o aço estudado.

**Figura 16: Curva de  $B \times H$  do AID SAF 2205 para a temperatura de 850°C para os tempos de envelhecimento de 15, 60 e 120 minutos.**



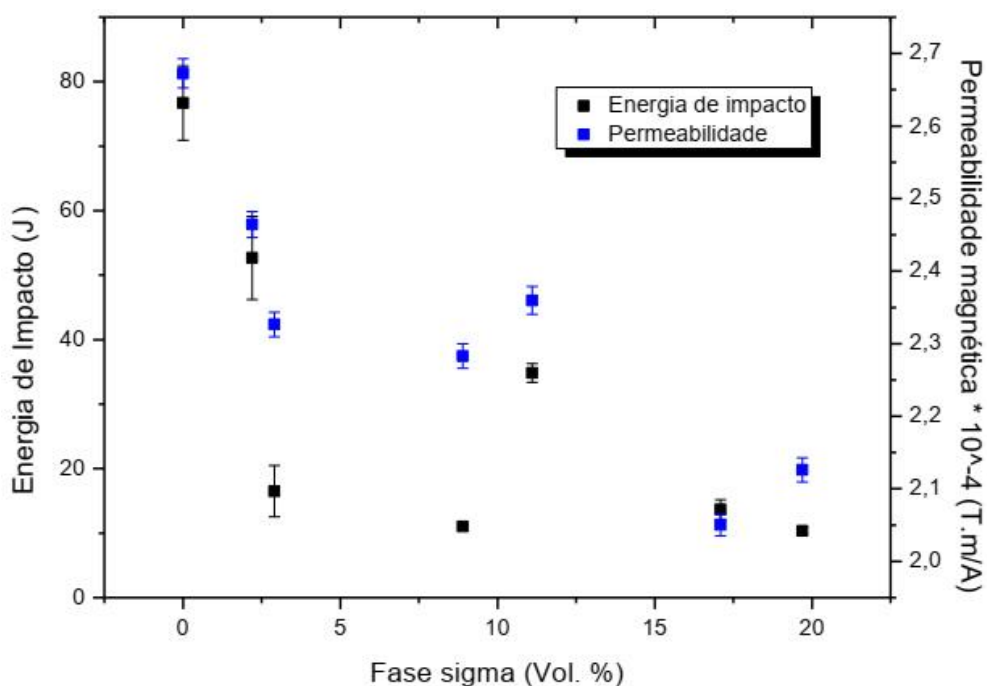
**Fonte: OLIVEIRA, 2016.**

Oliveira (2016) fez um comparativo relacionando o percentual da fase  $\sigma$ , permeabilidade magnética e energia de impacto, sendo apresentado na Figura 17. Verifica-se que à medida que ocorre o aumento do percentual de fase  $\sigma$ , os valores da energia de impacto e permeabilidade magnética apresentam comportamentos semelhantes.

Segundo Oliveira (2016), tanto as medidas de campo magnéticas induzidas realizadas com a aplicação de uma intensidade de campo magnético ideal, quanto o da permeabilidade

magnética medida da tangente da curva de magnetização, são eficazes para o acompanhamento da fase sigma no material estudado. Além disso, essas medidas são sensíveis à presença de quantidades de fases sigma inferiores a 4 %, fato estes que outros métodos não destrutivos como o de correntes parasitas e ultrassom têm limitação (ALBUQUERQUE et al., 2012; CAMERINI et al., 2015; GHANEI et al., 2014; NORMANDO et al. 2010; SILVA et al., 2009).

**Figura 17: Comparativo do percentual de energia de impacto × Fase Sigma × Permeabilidade magnética nas temperaturas de 800 e 900°C.**



Fonte: OLIVEIRA, 2016.

### 3. METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia utilizada no desenvolvimento do estudo da geometria na interação entre campo magnético induzido e material para a determinação de fase  $\delta$  (ferrita).

#### 3.1. MATERIAL

Neste trabalho foi utilizado um AID UNS- S31803 adquirido em formato de placa com espessura de 8 mm e cuja composição química é mostrada na tabela 1:

**Tabela 1: Composição do AID UNS-S31803, como recebido em % de peso.**

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>Cu</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>S</i>	<i>Fe</i>
<b>0,03</b>	1,09	0,02	0,25	22,29	4,12	5,7	-	<i>Balance</i>

**Fonte: FIALHO, 2015.**

Este material foi escolhido por ter a formação de novas fases a partir da fase ferrita. Esta se decompõe para temperaturas acima de 350°C formando fases ricas em cromo, que reduzem a resistência à corrosão e por terem alta dureza comprometem a tenacidade do material.

No presente trabalho foi realizado um estudo do efeito da geometria do material na interação entre campo magnético induzido e material, aplicado na região de reversibilidade dos domínios magnéticos.

#### 3.2. ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA E DO DIÂMETRO

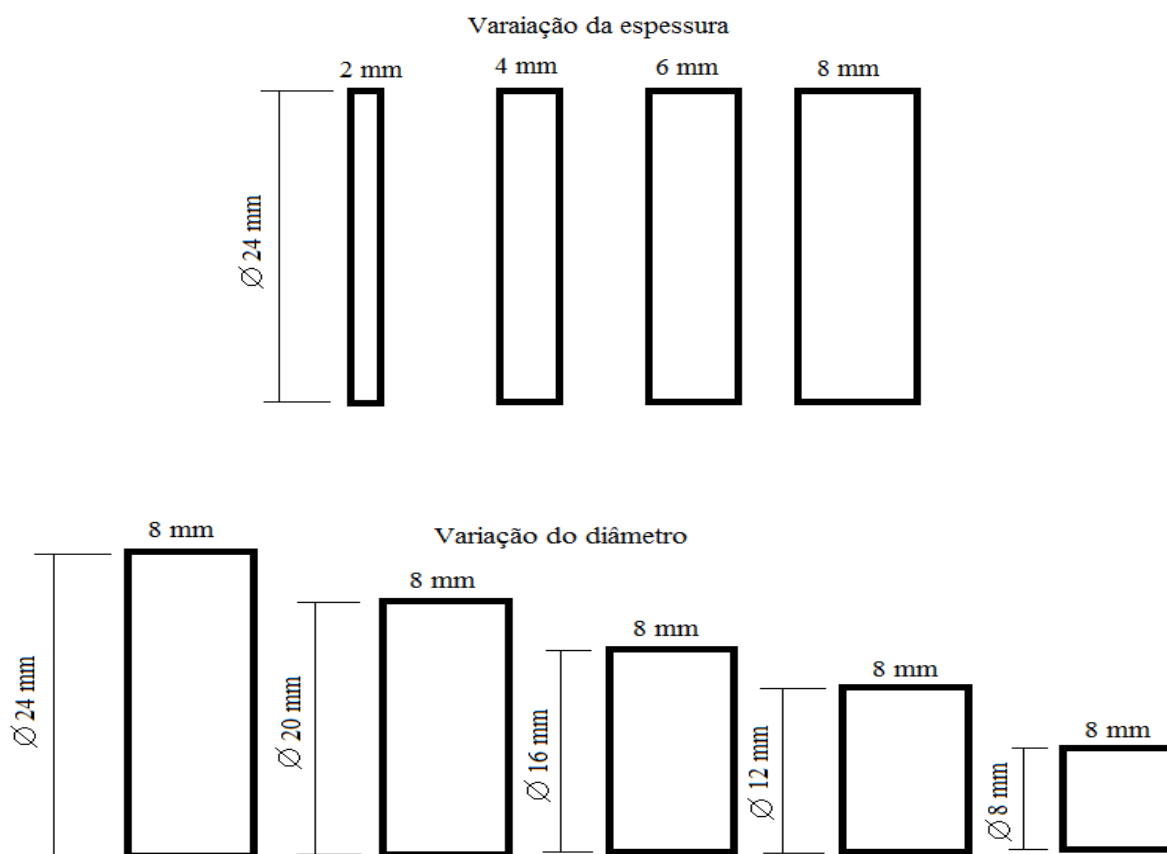
##### 3.2.1. Obtenção das Amostras

Dois tipos de amostras foram utilizados para o estudo. Uma com diâmetro de 24 mm e espessuras de 2, 4, 6 e 8 mm. A segunda com espessura fixa de 8 mm e diâmetro de 8, 12, 16, 20 e 24 mm.

Amostras com 24 mm de diâmetro e espessuras de 2, 4, 6, e 8 mm foram cortadas por eletroerosão a frio e submetidas a envelhecimentos na temperatura de 850°C para obtenção de

diferentes quantidades de fase ferrita e amostras com diferentes espessuras. Essa temperatura é a de maior cinética de decomposição da fase ferrita, de modo a obtermos quantidades de ferrita variando na faixa de 23 a 47 %. Os tempos de envelhecimento foram de 30, 60 e 120 minutos. A Figura 18 apresenta os tipos de amostras utilizadas para o estudo da geometria.

**Figura 18: Amostras utilizadas para o estudo da geometria.**



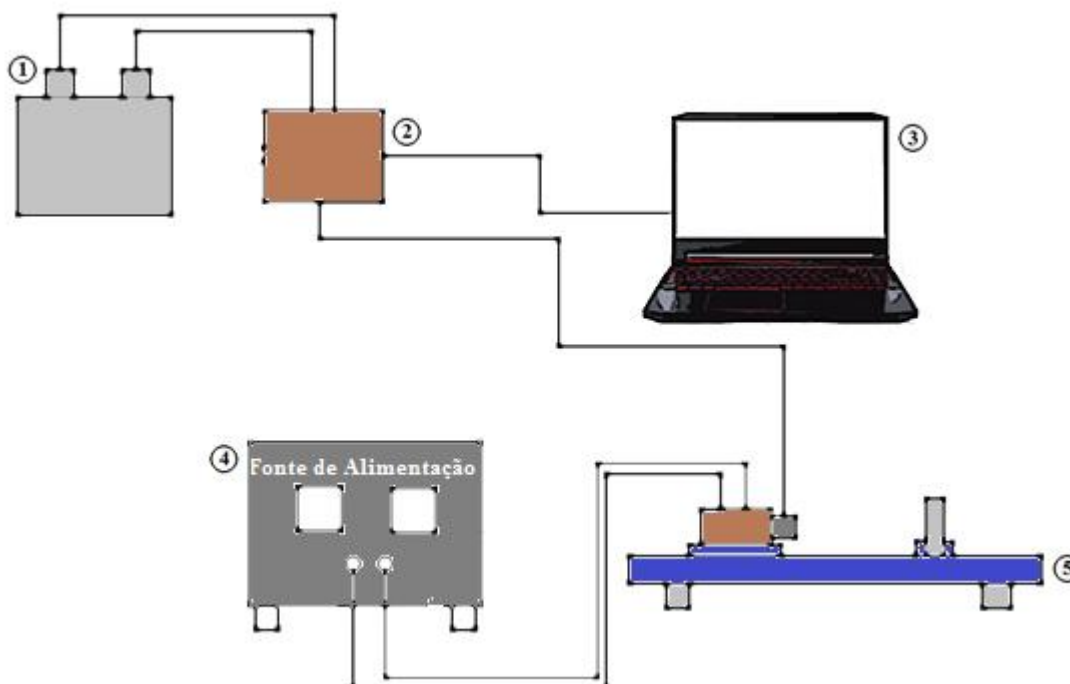
**Fonte: AUTOR.**

O tratamento térmico foi realizado em forno do tipo mufla jung no laboratório do Grupo de Simulação de Comportamento de Materiais (GSCMat) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) - Campus João Pessoa - PB. As amostras tratadas a 850°C foram analisadas na condição inicial (ST), envelhecimento de 30 minutos (E30), envelhecimento de 60 minutos (E60) e envelhecimento 120 minutos (E120).

### 3.2.2. Caracterização Magnética

A Figura 19 mostra a bancada de testes utilizada para os experimentos, os quais foram desenvolvidos no laboratório do GSCMat do IFPB – Campus João Pessoa.

**Figura 19: Bancada de ensaios não destrutíveis**



**Fonte: AUTOR.**

A Figura 19 mostra: (1) Bateria; (2) placa de aquisição de dados; (3) computador; (4) Fonte de Alimentação e (5) Bancada com solenoide, sensor de efeito Hall e suporte para a amostra.

Uma bateria capaz de fornecer uma tensão contínua de 12V e corrente até 55A alimenta o equipamento. A tensão utilizada nos experimentos para alimentar o sensor de efeito Hall é fixada em 5 V. Desta forma, buscou-se identificar respostas de campo magnético induzido em materiais de diferentes permeabilidades em função de um campo magnético aplicado.

Uma amostra é colocada após o sensor Hall e causa uma variação no campo magnético induzido originalmente. O sensor Hall capta essas variações, onde o sinal gerado pelo sensor Hall, analógico (sinal de tensão), é captado por uma placa de aquisição que o converte em sinal digital (bits) e envia a um computador que utiliza o software hiperterminal.

O estudo do efeito da espessura foi realizado com as amostras de diâmetro de 24 mm para cada espessura de 2, 4, 6 e 8 mm do AID UNS-S31803 e diferentes quantidades de fases ferrita. O estudo foi feito aplicando valores de H até a saturação do Sensor Hall instalado no equipamento para verificar o comportamento da magnetização nas curvas B x H e determinou-se a influência da variação da espessura na permeabilidade magnética do material.

Obtendo-se a variação nas curvas B x H, pode-se desenvolver uma equação para variar B em função dos valores de espessuras diferentes e quantidade de ferrita. As medições foram realizadas no centro de cada amostra. 500 medidas foram realizadas e um intervalo de confiança de 95% será considerado.

### 3.3. ESTUDO DA VARIAÇÃO DAS DIMENSÕES DA SECÇÃO TRANSVERSAL

As amostras do AID UNS-S31803 com os diâmetros de 8, 12, 16, 20 e 24 mm serão submetidos às mesmas condições dos ensaios anteriores de modo a determinarmos o menor tamanho de amostra a ser utilizado pela técnica.

### 3.4. DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE FASE $\delta$

#### 3.4.1. Metalografia

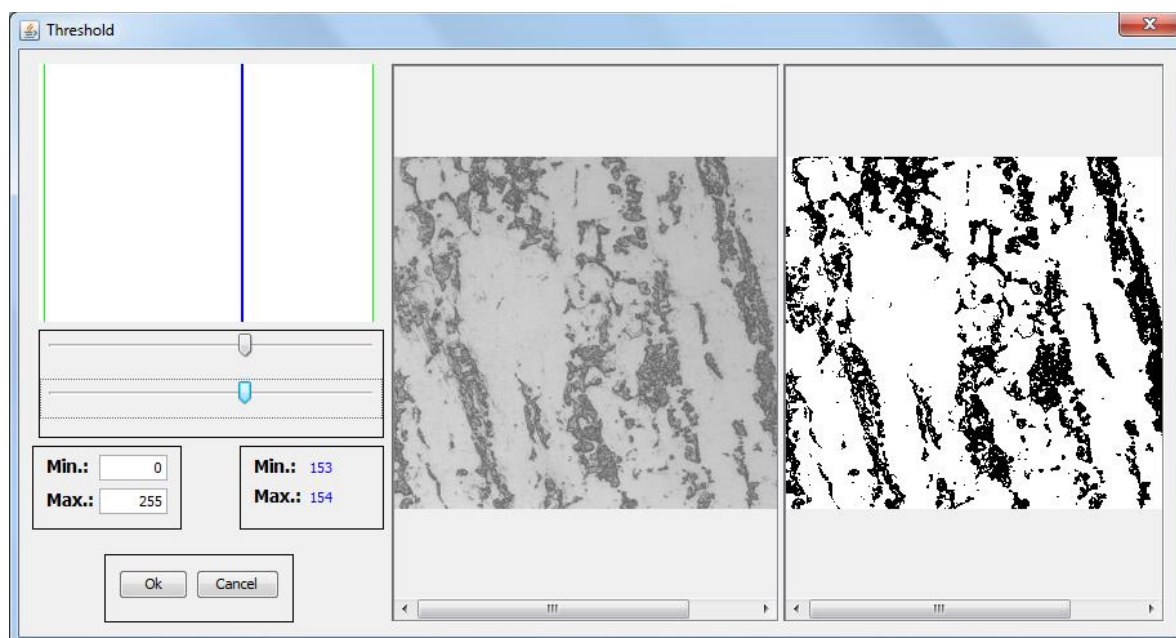
As amostras foram submetidas ao processo de metalografia, passando por etapas de lixamento e polimento para em seguida realizar ataque químico e revelação da microestrutura. As amostras foram preparadas no laboratório de metalografia do IFPB, e em seguida submetidas a ataque químico com solução eletrolítica de 10% de hidróxido de potássio (KOH) diluído em 70 ml de água destilada. Dois eletrodos foram conectados a uma fonte de tensão regulada em 3 volts, em que o positivo fica na peça e o negativo na mistura, permanecendo a solução por 30 segundos para atacar preferencialmente a fase  $\sigma$  facilitando a visualização. As amostras na condição inicial foram atacadas com o reagente Behara, que revela preferencialmente a fase ferrita e austenita.

### 3.4.2. Determinação da quantidade de $\delta$ por tratamento de imagem

A determinação da quantidade de fase  $\delta$  foi realizada por microscopia óptica (MO) utilizando um microscópio NIKON FX 35XD com câmera acoplada. Para cada amostra, foram obtidas 20 imagens. Estas foram capturadas e tratadas por um *software* de aquisição de imagem desenvolvido no GSCMat do IFPB. A quantidade de fase ferrita foi determinada pela diferença entre a quantidade dessas na condição como recebido e as quantidades de sigma nas amostras tratadas.

As imagens capturadas foram segmentadas, ou seja, transformadas em tons de preto e branco, por um programa de tratamento de imagens desenvolvido no Laboratório de Simulação de Comportamento de Materiais do Instituto Federal da Paraíba. A fração da área selecionada é a razão entre as áreas pretas e brancas. A Figura 20 mostra a análise realizada em uma imagem, onde temos esta com e sem aplicação do limiar.

**Figura 20: Amostras tratada a 850°C por 2 horas submetida a aplicação do limiar. As regiões pretas correspondem a fase sigma.**



Fonte: AUTOR.

### **3.4.3. Ensaios de dureza**

A amostra sem tratamento térmico e as envelhecidas, em todas as condições de tratamento, foram submetidas a ensaios de dureza Rockwell C de acordo com a norma NBR 6672. O equipamento utilizado foi o Durômetro da Mitutoyo, modelo Durotwin 963-102, de aplicação universal e leitura analógica para medições Rockwell, no Laboratório de ensaios do IFPB – Campus João Pessoa.

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.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção apresenta os resultados e discussões dos efeitos da espessura e diâmetro na interação entre campo magnético induzido e material, bem como a extrapolação dos resultados através de ajustes de curvas dos resultados.

### 4.1. ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA DO MATERIAL

O presente trabalho faz um estudo do efeito da espessura sobre a interação entre campo magnético induzido e material, para acompanhamento da quantidade da fase ferrita em um aço inoxidável duplex. Este material se caracteriza pela decomposição da fase ferrita de acordo com a equação (3) (MAGNABOSCO, 2001).



Onde:  $\delta$  é a fase ferrita;  $\sigma$  é a fase sigma e  $\gamma_2$  representa a austenita secundária.

Dos produtos de decomposição da fase ferrita temos que para temperatura acima de 600°C, nos aços inoxidáveis duplex, a fase sigma é formada e uma quantidade de 4% desta formação já é suficiente tornar o material frágil (TAVARES et al., 2010).

O reagente 10% de KOH é utilizado para revelar o produto da decomposição da reação 1 e assim, pode-se determinar a quantidade de fase ferrita que foi decomposta (TAVARES et al., 2010). Deste modo, ao sabermos a quantidade de fase antes da decomposição, a diferença, em relação à tratada, representará a porcentagem presente no material.

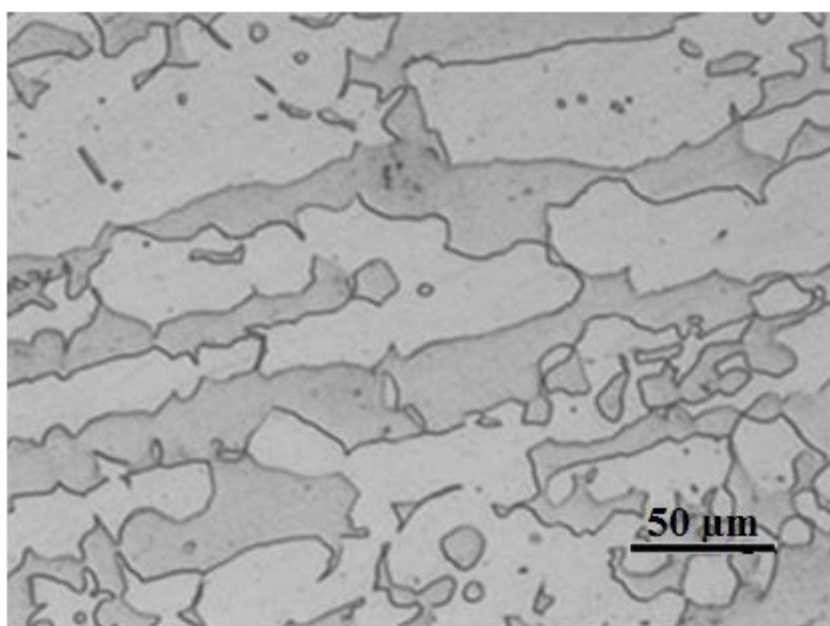
A quantidade de fase ferrita antes do tratamento pode ser revelada com o reagente denominado de Behara que revela preferencialmente as fases ferrita e austenita (TAVARES et al., 2010; SILVA et al., 2009; BABAKR et al, 2008). As Figuras 21 (a) e 21 (b) mostram o material atacado com o reagente Behara e o mesmo submetido à segmentação com limiar, respectivamente. Nas Figuras 22 (a) e 22 (b) temos um material tratado a 850°C, que foi atacado com o reagente KOH, para revelar o produto de decomposição da fase ferrita.

A Figura 21 (a) mostra a presença da matriz ferrita com ilhas de austenita e a Figura 21 (b) a mesma imagem submetida ao processo de segmentação pelo filtro limiar. A quantidade de fase ferrita nesta condição foi determinada como sendo 49,6%. A Figura 22 (a)

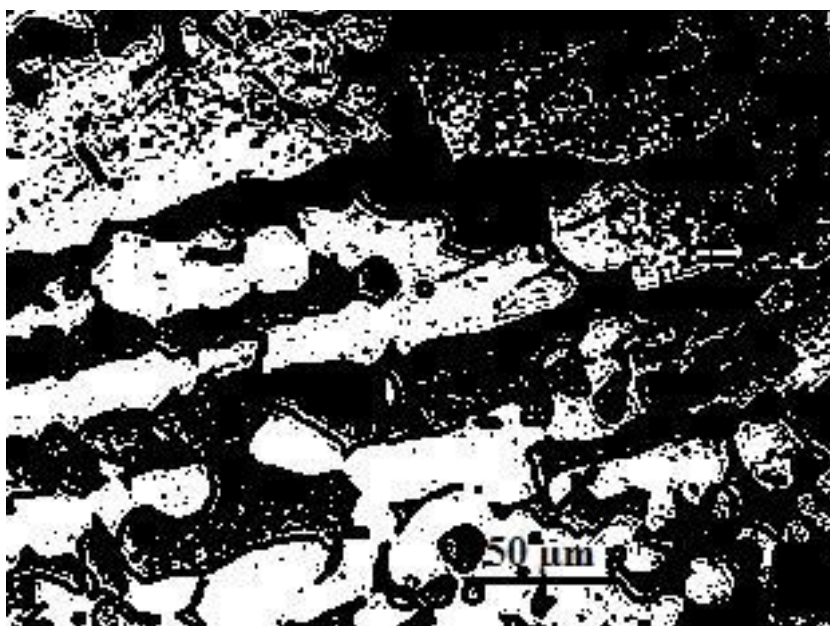
mostra o produto de decomposição da ferrita em uma amostra tratada na temperatura de 850°C por duas horas. Na Figura 22 (b) tem-se a aplicação do filtro limiar para a segmentação da imagem. Tanto na Figura 21 (b) quanto na figura 22 (b) a porcentagem de fase foi obtida pela razão entre a quantidade de pixels preto e branco. A amostra da Figura 22 (a) teve um valor de fase ferrita de 23,85%, que corresponde à diferença entre os valores das amostras das Figuras 21 (b) e 22 (b).

**Figura 21. Microestrutura da amostra como recebida atacada com o reagente Behara. a) Sem aplicação do limiar. b) Com aplicação do limiar.**

**a) Sem aplicação do limiar**

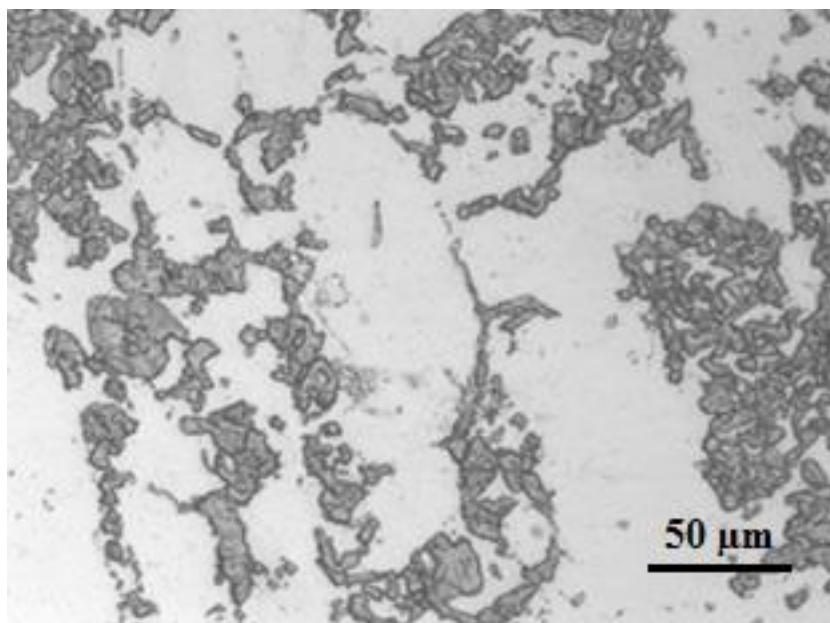


**a) Com aplicação do limiar**

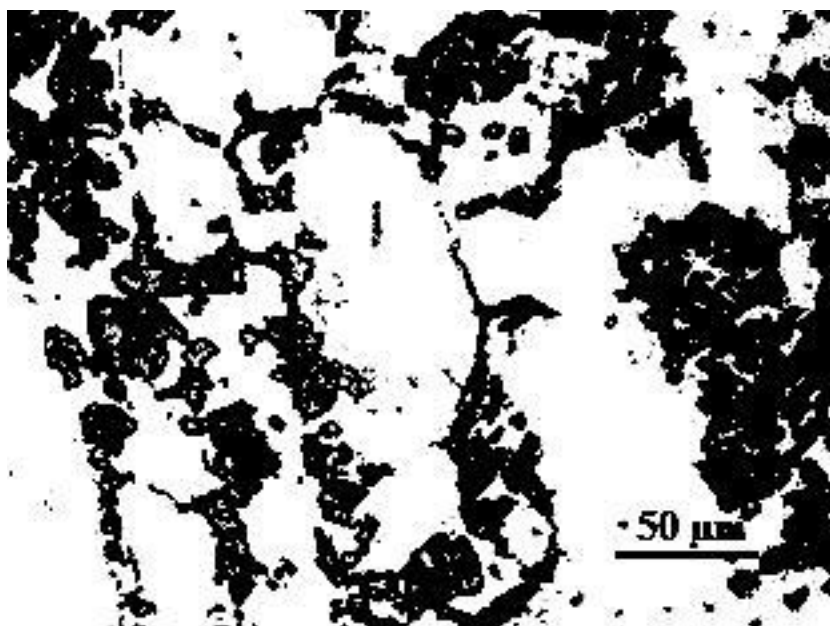


**Figura 22: Material tratado a 850°C por 2 horas atacado como recebido KOH. a) Sem aplicação do limiar. b) Com aplicação do limiar.**

**a) Sem aplicação do limiar**



**b) Com aplicação do limiar**

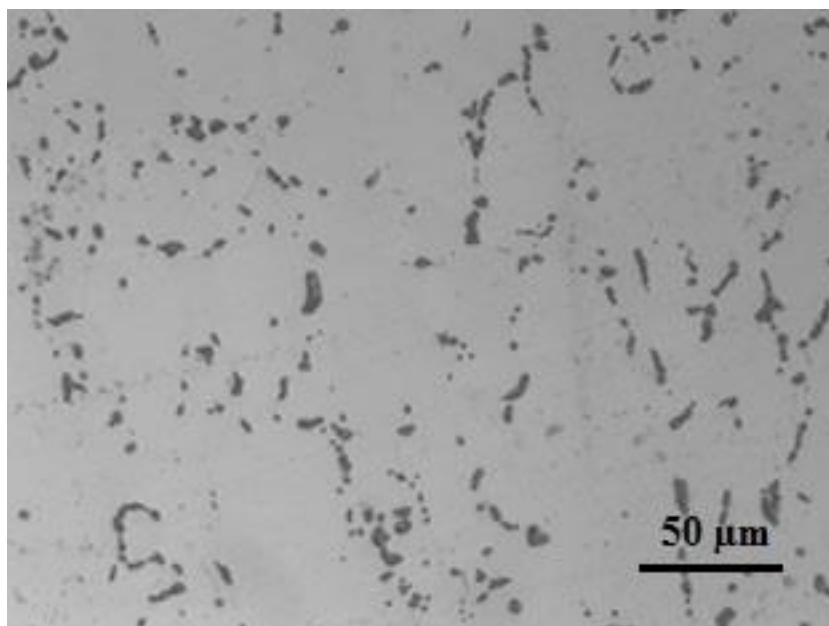


A fim de obtermos diferentes quantidades de fases ferrita, amostras foram tratadas na temperatura de 850° por diferentes tempos. Esta temperatura corresponde a de maior cinética de transformação (OLIVEIRA, 2016; SIEURIN et al., 2007). As figuras 23 (a), 23 (b) e 23 (c)

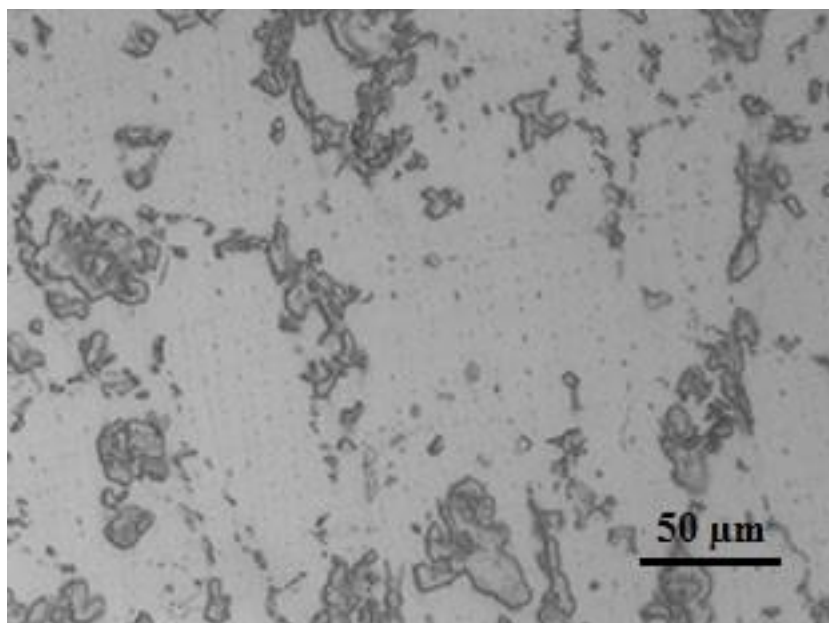
mostram o aumento do produto de decomposição da fase ferrita com o tempo de tratamento. A quantidade de fase ferrita para as condições estudadas é apresentada na tabela 2.

**Figura 23: Microestrutura da amostra tratada e atacada com o reagente KOH. (a) Envelhecimento de ¼ h . (b) Envelhecimento de 1h e (c) Envelhecimento de 2h.**

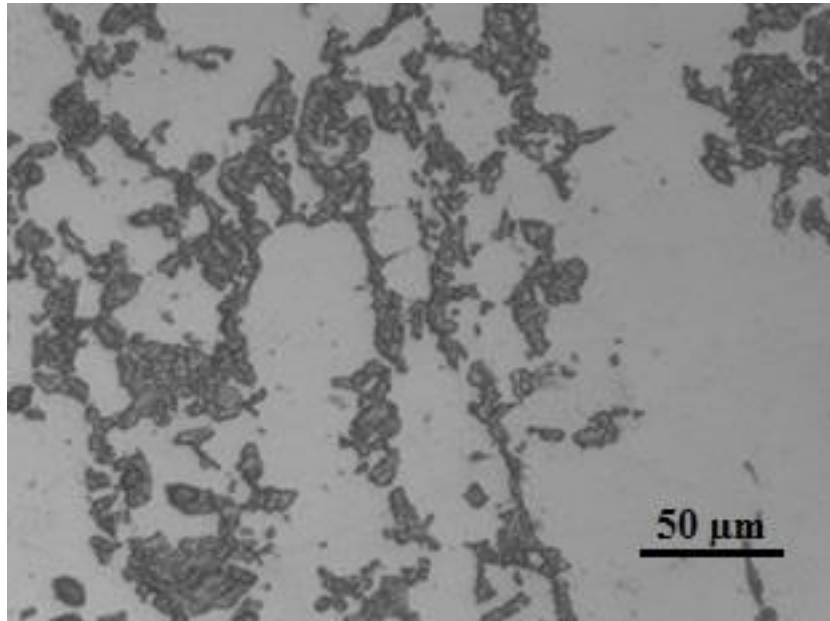
a) ¼ h



b) 1 h



c) 2 h



A ferrita se decompõe formando  $\delta - \sigma + \gamma_2$ . O ataque com KOH revela ( $\sigma + \gamma_2$ ), que são fases deletéricas. A quantidade de precipitados aumenta com o tempo de tratamento (TAVARES et al., 2010, SILVA et al., 2016). A tabela 2 mostra os valores de dureza para diferentes quantidades de fase ferrita para amostras envelhecidas na temperatura de 850 °C para os tempos de 1/4 h, 1h e 2 h. Nesta temperatura temos a maior cinética de decomposição da fase ferrita, de modo, a obtermos amostras com diferentes quantidades da fase estudada sem a necessidade de tratamentos prolongados (TAVARES et al., 2010).

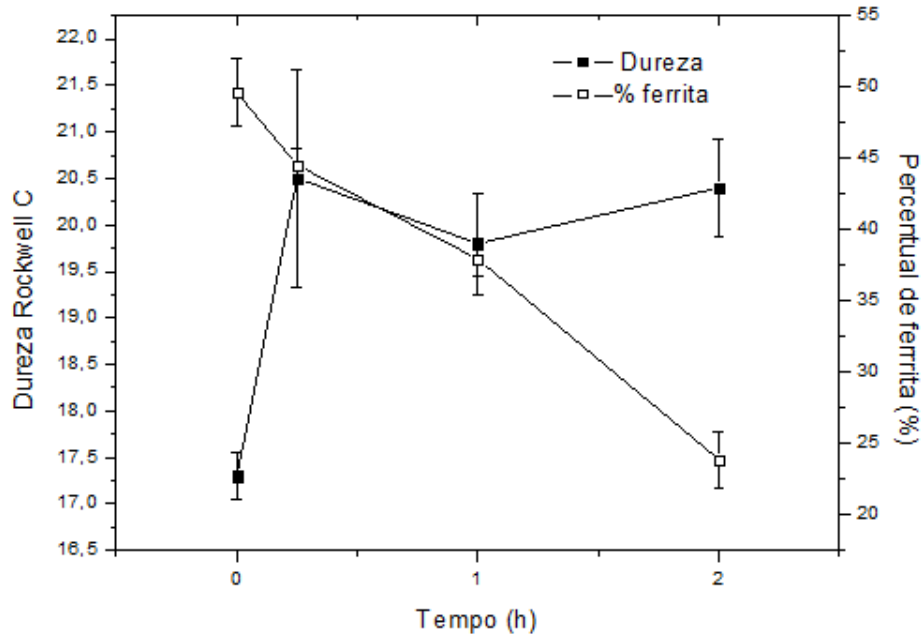
A tabela 2 apresenta a quantidade de fase ferrita para cada tempo de envelhecimento, bem como os valores de dureza Rockwell C.

**Tabela 2: Quantidade Fase Ferrita e Dureza.**

Tempo	0	¼ h	1 h	2 h
% $\delta$	49,60%	44,52%	37,93%	23,85%
Dureza HRC	17,5	20,5	19,8	20,4

A Figura 24 mostra o gráfico das variações das medidas de dureza e quantidade de fase sigma para amostras dos dados da tabela 2. Nota-se um aumento inicial das medidas de dureza para tempos até ¼ h, seguido de uma estabilização até 2 horas de tratamento.

**Figura 24: Variação das medidas de dureza e percentual de fase ferrita em função do tempo de envelhecimento, para amostras tratadas na temperatura de 850 °C pro tempos até 2 horas.**



O aumento inicial se deve a formação de pelo menos 5% de fase sigma, que reduz a quantidade de fase ferrita (NORMANDO et al., 2010). Esta fase se decompõe formando uma fase sigma mais uma austenita secundária. Este último constituinte não sofre transformações nos aços inoxidáveis duplex (PARDAL, 2009) e é responsável pela estabilização dos resultados para os tempos entre ¼ h e 2 horas na Figura 24.

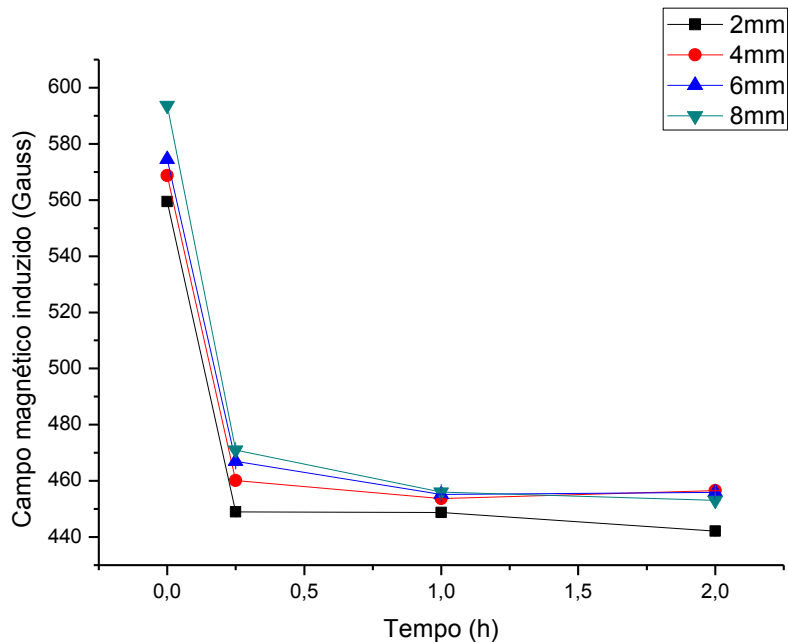
A Figura 25 mostra a variação do campo magnético induzido, em função do tempo de tratamento na temperatura de 850°C, para amostras com diferentes espessuras. Nota-se que os valores de campo magnético induzidos tornam iguais para tempos a partir de 1 hora para as espessuras de 4, 6 e 8 mm. Para a espessura de 2 mm tem-se uma redução nesses valores, devido a influência do meio externo. Nota-se também da Figura 25, uma queda nos valores seguidos de uma estabilização para todas as espessuras. A queda até os quinze minutos deve-se à decomposição da fase ferrita e formação da fase sigma. Esta fase é paramagnética e sua formação reduz o ferromagnetismo do material (TAVARES et al., 2010).

O efeito da espessura para amostras com diferentes quantidades de fase ferrita também foi estudado pelos dados da Figura 25. Amostras sem decomposição da fase ferrita, que corresponde ao tempo zero de tratamento e 49,6% de ferrita, apresentam uma maior variação do campo magnético induzido com a espessura. Isto se deve ao maior ferromagnetismo das amostras sem tratamentos. Contudo, o aumento do tempo de tratamento reduz a

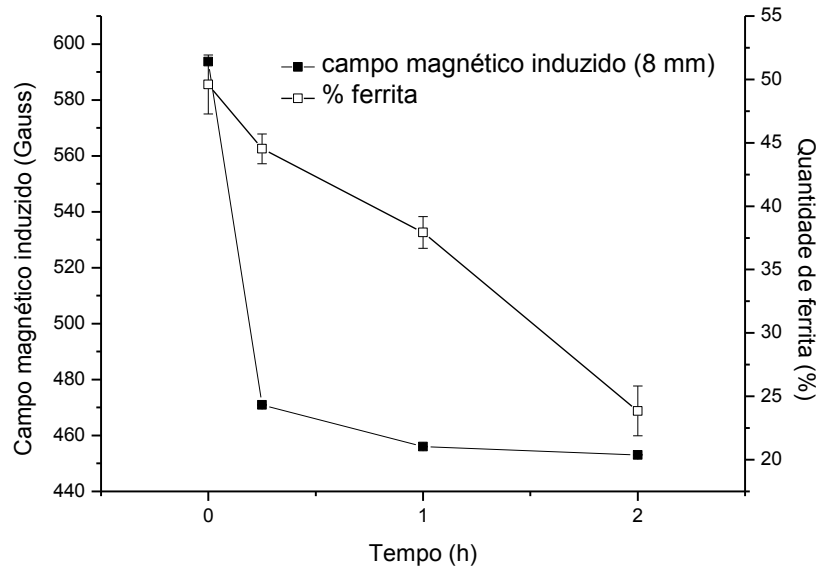
permeabilidade magnética das amostras e as diferenças dos valores entre eles reduzem. Pode-se observar também, que a amostra de 2 mm submetida ao tempo de tratamento de 2 horas apresentou uma redução em relação aos demais valores da mesma espessura. Segundo Leite (2014), a redução na permeabilidade do material reduz o ângulo de entrada das linhas de campo no sensor Hall e assim a tensão medida, que é diretamente proporcional ao campo magnético induzido no material. Isto foi observado nas amostras de 2 mm submetidas a tratamentos, indicando uma limitação para essa espessura. Os resultados da Figura 25 indicam que independentemente da espessura, as medidas de campo magnético induzido são capazes de acompanhar a variação da quantidade de fase ferrita em um aço inoxidável duplex.

Na Figura 26 temos as medidas de campo magnético induzido e quantidade de fase ferrita para amostras com diferentes tempos de tratamento. A quantidade de fase ferrita reduz com o tempo de tratamento e as medidas de campo magnético induzido seguem esse comportamento.

**Figura 25: Variação do campo magnético induzido para amostras com diferentes espessuras e tempos de tratamento.**



**Figura 26: Medidas de campo magnético induzido e quantidade de fase ferrita, em função do tempo de tratamento.**



As Figuras 27 a 30 mostram os resultados experimentais e simulados das amostras tratadas com tempos de 0 h, ¼ h, 1 h e 2h, para amostras com espessuras de 2,4, 6 e 8 mm. Para cada tempo de envelhecimento foi determinada a melhor curva exponencial representativa do comportamento. Os valores  $R^2$  de ajuste das curvas foram obtidos, através do programa origin, para cada condição e observou-se que o único que distanciou da unidade foi o do tratamento realizado com 2 horas.

O comportamento diferente das amostras tratadas com 2 horas se deve ao fato que esse tratamento possui uma maior quantidade de fase paramagnética sigma, que reduz a permeabilidade do material e que segundo Leite (2014) ocorre à redução do campo magnético induzido. Nesse caso, o ajuste exponencial para essa condição não é muito representativo. Contudo, foi mantido a fim de comparação com os demais tempos de envelhecimentos.



Figura 27: Resultado experimental e simulado para amostras sem tratamento e com espessuras de 2, 4, 6 e 8 mm.

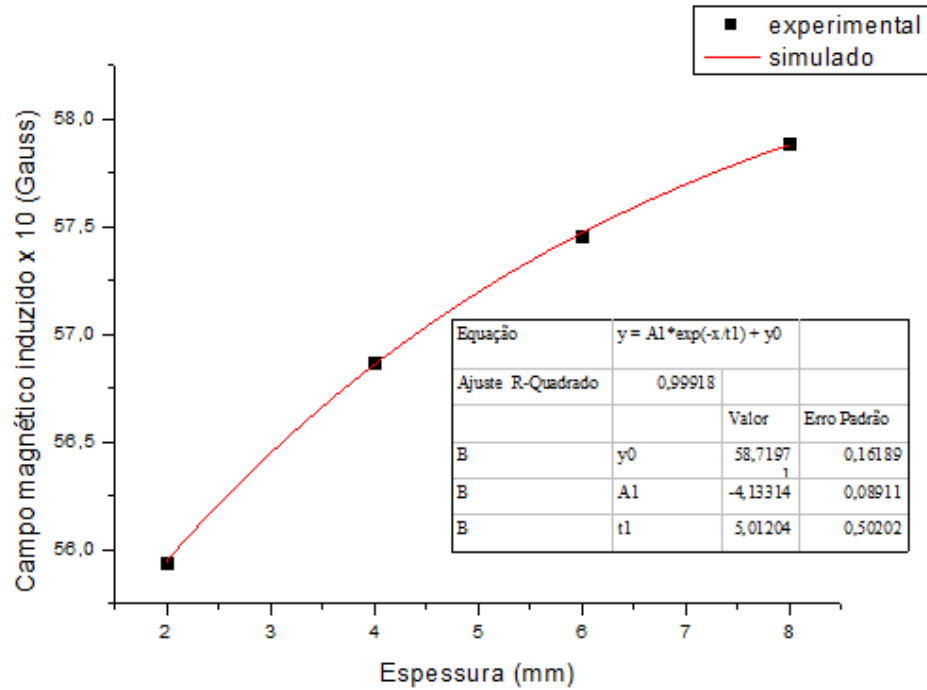


Figura 28: Resultado experimental e simulado para amostras tratadas com ¼ h e espessuras de 2, 4, 6 e 8 mm.

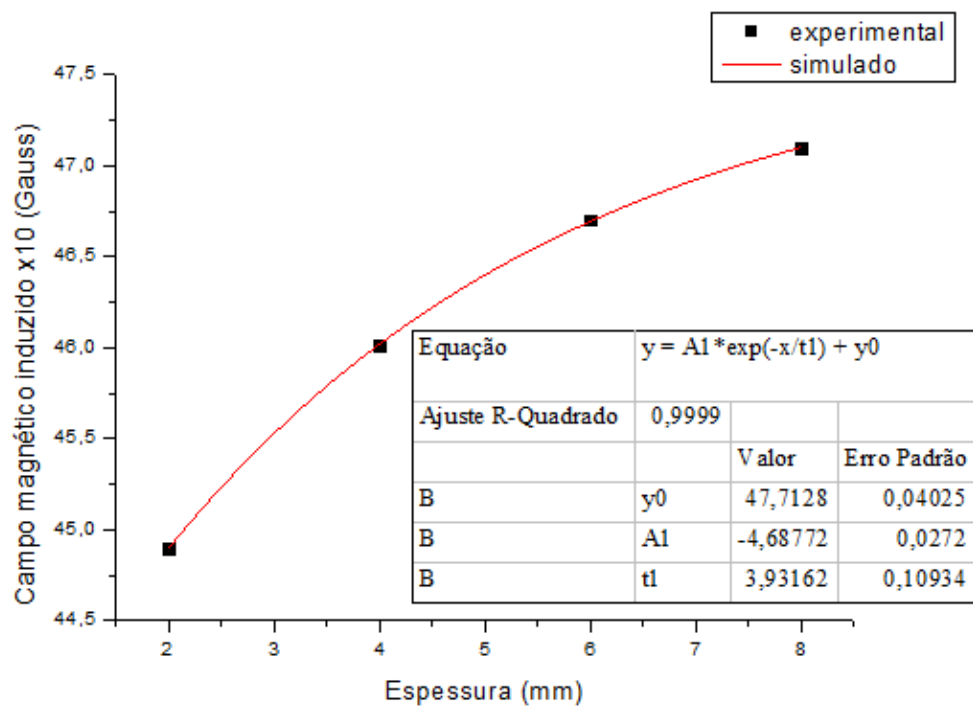


Figura 29: Resultado experimental e simulado para amostras tratadas com 1 h e espessuras de 2, 4, 6 e 8 mm.

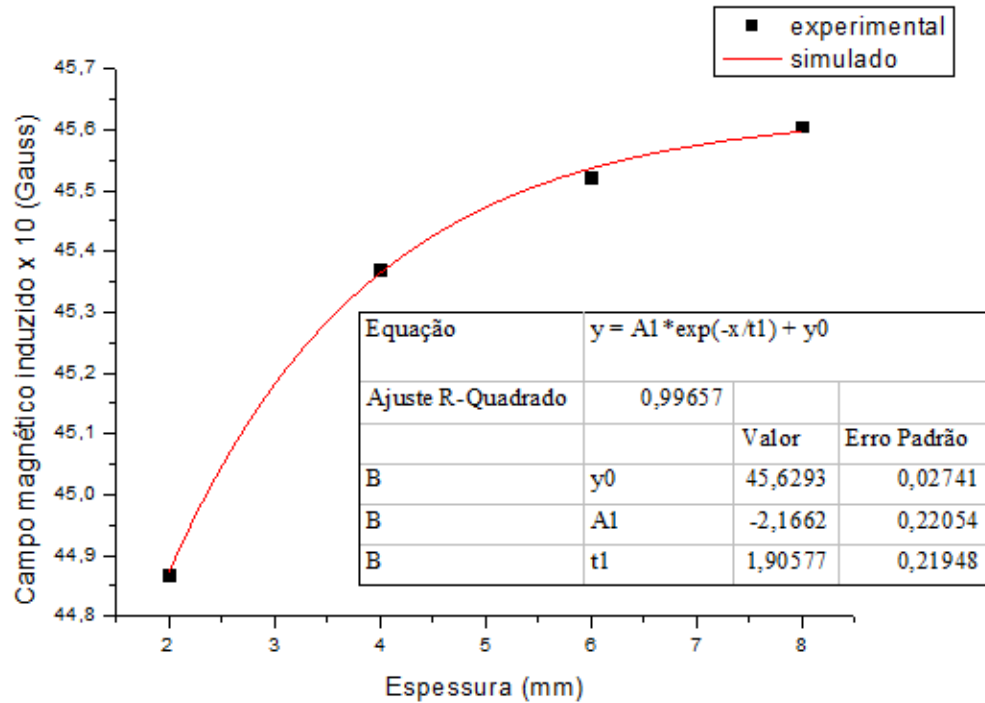
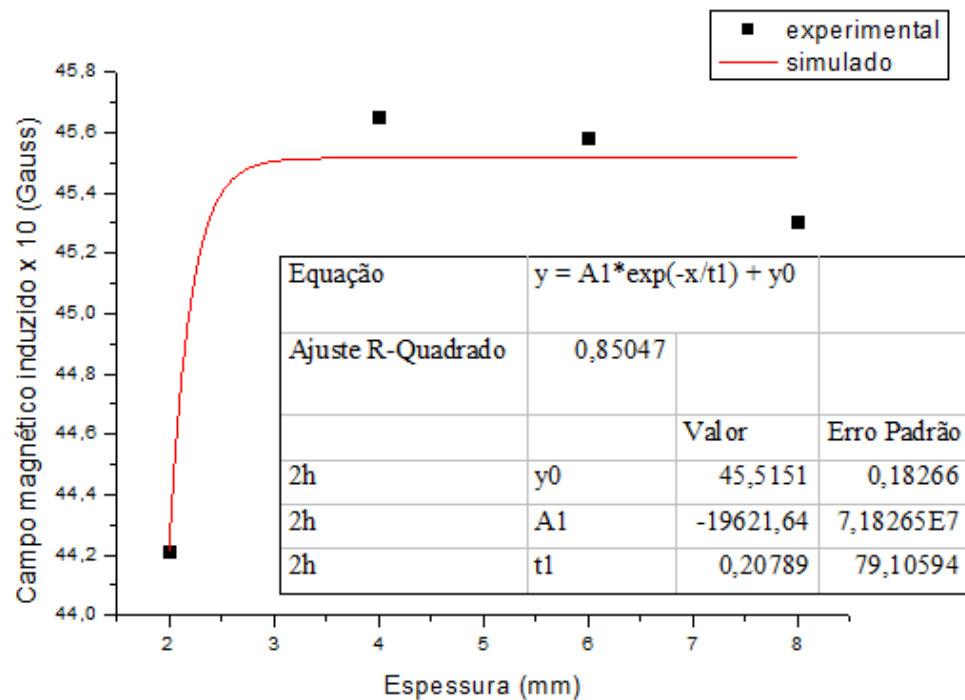
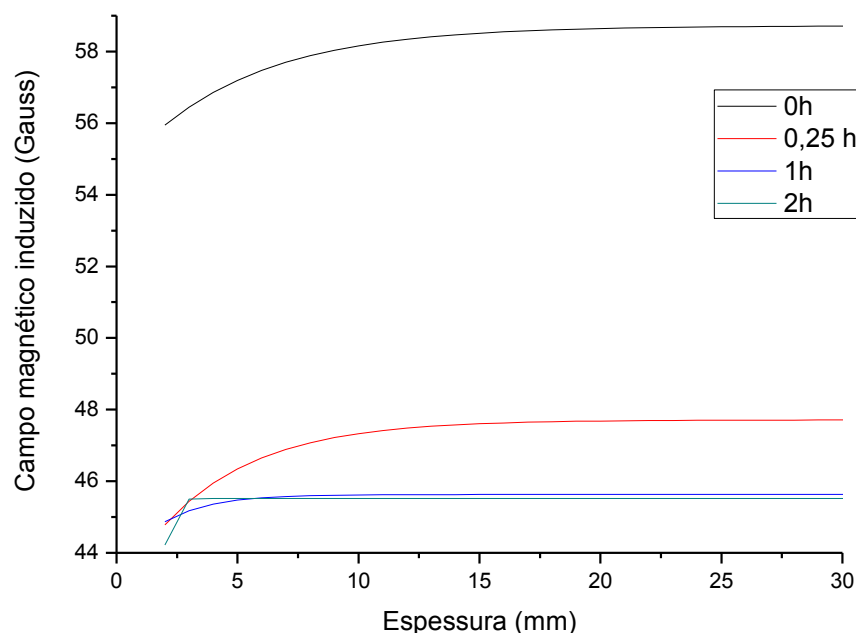


Figura 30: Resultado experimental e simulado para amostras tratadas com 2 h e espessuras de 2, 4, 6 e 8 mm.



A Figura 31 mostra a variação do campo magnético induzido para amostras simuladas para espessuras até 30 mm. Nota-se que as medidas tornam-se independentes da espessura para medidas a partir de 10 mm. Além disso, observa-se uma queda nos valores de campo magnético induzido, da ordem de 20 %, entre a condição sem precipitação e a de ¼ h de tratamento. Para este tempo ocorre uma redução de 5 % da fase ferrita devido à formação da fase deletérica sigma. Esta quantidade já é suficiente para fragilização do material em estudo (SILVA et al., 2016; TAVARES et al., 2010). Essa região, da Figura 31, corresponde a de interesse para monitoramento da fase sigma, pois para valores de fase sigma acima desse, a estrutura feita desse material deve ser substituída. Ensaio eletromagnéticos têm sido propostos para acompanhamento dessa fase fragilizante, mas com sensibilidade somente para valores a partir de 5%, sendo imprecisos para prever o momento certo para manutenção (ALBUQUERQUE et al., 2012; CAMERINI et al., 2015; GHANEI et al., 2014; NORMANDO et al., 2010; SILVA et al., 2009).

**Figura 31: Resultado simulado, das amostras tratadas, e extrapolados para espessuras até 30 mm.**

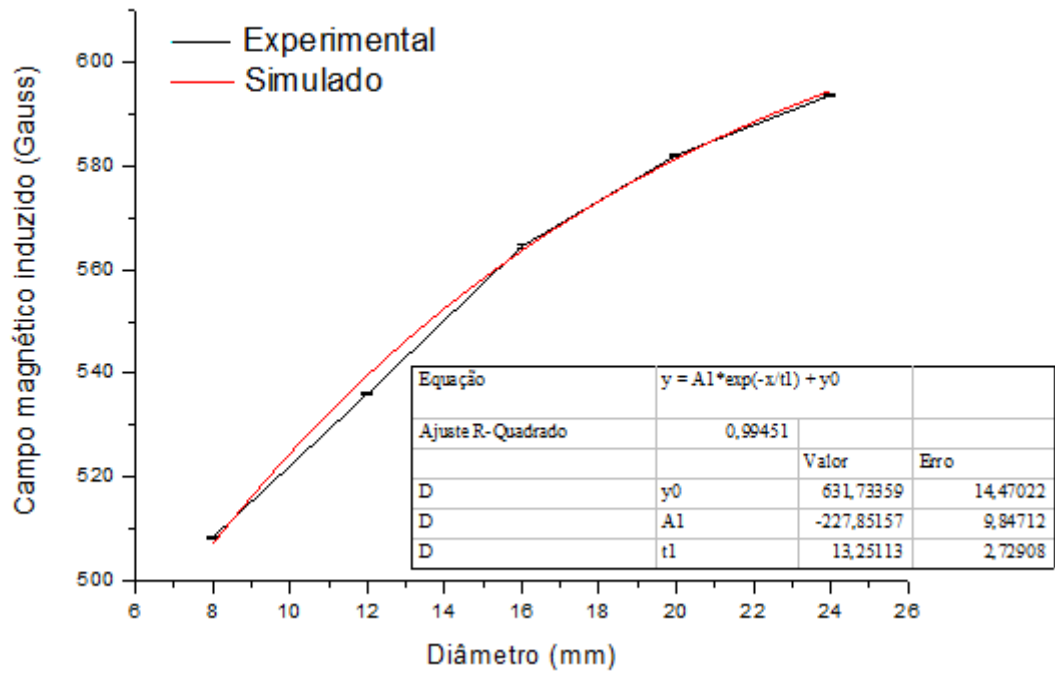


## 4.2. ESTUDO DO EFEITO DO DIÂMETRO DO MATERIAL

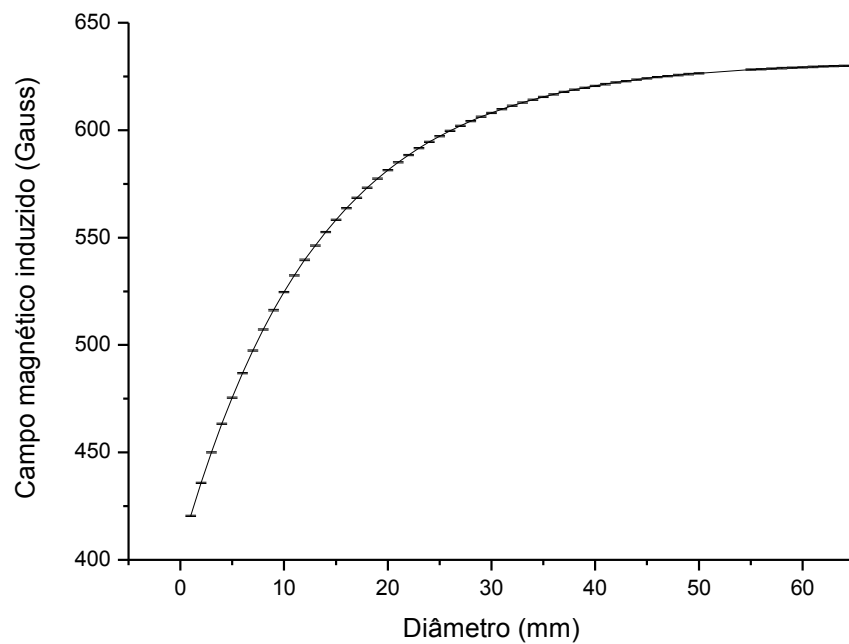
Amostras sem tratamento com diferentes diâmetros foram utilizadas para estudo da influência desses nas medidas de campo magnéticos induzidos. O ajuste da melhor curva que representava os resultados foi realizado e uma correlação de  $R^2$  de 0,99451 foi encontrada e os resultados obtidos foram apresentados na Figura 32. Nota-se desta figura uma boa correlação entre os resultados.

A equação da Figura 32 foi utilizada para realização da extrapolação nas medidas para diâmetros superiores ao estudado. A Figura 33 mostra o gráfico dos resultados extrapolados e neles a representação da maior faixa de erro encontrada nos experimentos. O objetivo era determinar o valor em que o campo magnético induzido passaria a ser independente do diâmetro do material estudado. A Figura 33 mostra que essas se tornam independente para diâmetros acima de 4 cm, ou seja, uma área de ensaio de 12,56 cm<sup>2</sup>. Ensaio para medidas de propriedades magnéticas de aços como o quadro de Epstein e o de amostra única usam amostras com áreas que variam de 84 a 93 cm<sup>2</sup>, e de 25 cm<sup>2</sup> a 1296 cm<sup>2</sup>, respectivamente e são considerados destrutivos (LANDGRAF et al., 1999; GALLAUGHER et al., 2015; YONAMINE et al., 2004; PALTANEA et al., 2015). Outras técnicas utilizam medidas baseadas na análise do ruído de Barkhausen e usam amostras com dimensões de 50,4 cm<sup>2</sup> a 100 cm<sup>2</sup> (BÜKKI-DEME et al., 2010; MORGAN et al., 2012; PÉREZ-BENITEZ et al., 2007). A equação da Figura 33 pode ser então empregada para correlação de medidas com as amostra com diâmetros abaixo de 4 cm.

**Figura 32: Variação do campo magnético induzido em função do diâmetro do material com espessura de 8 mm, para as condições simuladas e experimentais.**



**Figura 33: Variação do campo magnético induzido simulado, em função do diâmetro do material.**



O estudo do efeito da geometria mostrou ser capaz de acompanhar a variação da quantidade de fase ferrita no material estudado. Além disso, apresentou ter precisão na região de fragilização estudada, que corresponde a de necessidade de monitoramento devido a fase sigma.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho fez um estudo da geometria circular, na interação entre campo magnético induzido e material, chegando às seguintes conclusões:

- As medidas de campos magnéticos induzidos foram capazes de acompanhar a decomposição da fase ferrita independente das espessuras dos materiais estudados;
- As medidas de campos magnéticos induzidos mostram ser eficientes na região de formação de fase sigma até a quantidade de 5%, que corresponde a de fragilização do material em estudo e a de interesse para monitoramento desse material;
- As medidas de campo magnéticos induzidos mostram ser independentes para diâmetros superiores a 4 cm, necessitando uma área de estudo com dimensões inferiores das utilizadas em outros métodos;
- As curvas de correlação entre espessuras e diâmetro obtiveram um índice de correlação próximo a um, indicando que os resultados podem ser extrapolados para outros diâmetros e espessuras.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Simulação pelo Método dos Elementos Finitos da interação campo magnético e material, para correlação dos resultados com outras geometrias;
- Realizar o estudo da geometria para regiões de tratamento abaixo de 600°C;
- Aplicar o método de estudo a outros tipos de materiais que tem como base a fase ferrita.



## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, V. H. C.; SILVA, C. C.; NORMANDO, P. G.; MOURA, E. P.; TAVARES, J. M. R. S. Thermal aging effects on the microstructure of Nb-bearing Nickel based Superalloy weld overlays using ultrasound techniques, **Materials and Design**, v. 36, p. 337–347, 2012.
- BABAKR, A. M.; AL-AHMARI, A.; AL-JUMAYIAH, K.; HABIBY, F. Sigma Phase Formation and Embrittlement of Cast Iron-ChromiumNickel (Fe-Cr-Ni) Alloys, **Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering**, v. 7, p. 127-145, 2008.
- BÜKKI-DEME, A.; SZABÓ, I.A.; CSERHÁTI, C. Effect of anisotropic microstructure on magnetic Barkhausen noise in cold rolled low carbon steel, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 322, p. 1748–1751, 2010.
- CALLISTER JR, W. D. **Materials science and engineering an introduction**. 7° ed. John Wiley & Sons, 2007.
- CAMERINI, C.; SACRAMENTO, R.; AREIZA, M. C.; ROCHA, A.; SANTOS, R.; REBELLO, J. M.; PEREIRA, G. Eddy Current Techniques for Super Duplex Stainless Steel Characterizacion, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 388, p. 96-100, 2015.
- CAVALCANTE, D. C. M. **Estudo da interação das linhas de campo sobre uma amostra de aço SAE 1020 por meio de medidas de tensão Hall**. 2013. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB, Brasil, 2013.
- CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- FARGAS, G.; ANGLADA, M.; MATEO, A. Effect of the annealing temperature on the mechanical properties, formability and corrosion resistance of hot-rolled duplex stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 1770-1782, 2009.

FIALHO, W. M. L. **Ensaio Não Destrutivo baseado em medidas de campo magnético para acompanhamento da fase sigma em um aço inoxidável duplex**, 2015. 129 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, PB, Brasil, 2015.

FRANÇA NETO, F. A. **Estudo de uma nova técnica não destrutiva, baseada em medidas de permeabilidade magnética, para acompanhamento da fragilização de um aço inoxidável duplex**. 2011. 105 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Paraíba, PB, Brasil, 2011.

GALLAUGHER, M.; GHOSH, P.; KNIGHT, A.M.; CHROMIK, R.R. The effect of easy axis misorientation on the low induction hysteresis properties of non-oriented electrical steels. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 382, p. 124–133, 2015.

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.

HELMUT FISCHER. *Measurement of the ferrite content in austenitic and duplex steel*. Helmut Fischer – Germany. Catálogo do Feritscope® FMP30. Disponível em: < [http://www.helmut-fischer.com.br/fileadmin/documents/broc/EN/BROC\\_FMP30\\_FERITSCOPE\\_902-039\\_en.pdf/](http://www.helmut-fischer.com.br/fileadmin/documents/broc/EN/BROC_FMP30_FERITSCOPE_902-039_en.pdf/) >. Acesso em 25 de outubro de 2016.

LANDGRAF, F.J.G.; EMURA, M.; TEIXEIRA, J.C.; DE CAMPOS, M.F.; MURANAKA, C.S. Anisotropy of the magnetic losses components in semi-processed electrical steels. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 196, p. 380–381, 1999.

LEITE, J, P. **Técnica não destrutiva para análise da interação de linhas de campo magnético e material**. 2014. 151 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, PB, Brasil, 2014.

LO, K.H.; LAI, J.K.L.; SHEK, C.H.; LI, D.J. Magnetic and transformation behavior of duplex stainless steel under non-isothermal conditions and temperature-fluctuation monitoring. **Material Science and Engineering**, v. 452, p. 149-160, 2007.

MAGNABOSCO, R. **Influência da microestrutura no comportamento eletroquímico do aço inoxidável UNS S31803 (SAF 2205)**. 2001. 181p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil, 2001.

MAGNABOSCO, R.; SANTOS, D. C. Intermetallic Phases Formation During Short Aging between 850°C and 950°C of a Superduplex Stainless Steel. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 1, p. 71-74, 2012.

MOHAPATRA, J. N.; KAMADA, Y.; MURAKAMI, T.; ECHIGOYA, J.; KIKUCHI, H.; KOBAYASHI, S. Magnetic hysteresis loop technique as a tool for the evaluation of  $\sigma$  phase embrittlement in Fe-Cr alloys. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 327, p. 71-75, 2013.

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

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

OLIVEIRA, A. V. G. **Ensaio eletromagnético para detecção de fase sigma em aços inoxidáveis duplex**. 2016. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), João Pessoa, PB, Brasil, 2016.

PALTANEA, V.M.; PALTANEA, G.; GAVRILA, H.; DUMITRU, L. **Experimental Analysis of Magnetic Anisotropy in Silicon Iron Steels using the Single Strip Tester**. In: 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). Bucharest, Romênia, 2015. p. 456–459.

PARDAL, J.M., **Efeitos dos tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas, magnéticas e na resistência à corrosão de aços inoxidáveis supeduplex**, 2009. 411 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, RJ, Brasil, 2009.

PÉREZ-BENITEZ, J. A.; CAPÓ-SÁNCHEZ, J.; PADOVESE, L.R. **Characterization of angular dependence of macroscopic magnetic properties in ASTM 36 steel using magnetic Barkhausen noise**. NDT E Int, v. 40, p. 284–288, 2007.

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**. 2010. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE, Brasil, 2012.

ROMANA, R. **Cinética de formação de fase sigma entre 700°C e 900°C no aço inoxidável superdúplex UNS S32750 (SAF 2507)**. 2009. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário da Fundação Educacional Inaciana (FEI), São Bernardo do Campo, SP, Brasil, 2009.

SIEURIN, H.; SANDSTRÖM, R. **Sigma phase precipitation in duplex stainless steel 2205**, *Materials Science and Engineering*, v. 444, p. 271–276, 2007.

SILVA, E. M.; ALBUQUERQUE, V. H. C.; LEITE, J. P.; VARELA, A. C. G.; MOURA, E. P.; TAVARES, J. M. R. S. **Phase transformations evaluation on a UNS S31803 duplex stainless steel based on nondestructive testing**. *Materials Science and Engineering A*, v. 516, p. 126-130, 2009.

SILVA, E. M.; 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. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 44, p. 1-6, 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.

YONAMINE, T.; LANDGRAF, F. J. V. Correlation between magnetic properties and crystallographic texture of silicon steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 272, p. 565-566, 2004.