



DETECÇÃO DE TRINCAS EM AÇO DO GRAU HP POR CORRENTES  
PARASITAS

Lucas Kling e Silva

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Rio de Janeiro

Maio de 2018

DETECÇÃO DE TRINCAS EM AÇO DO GRAU HP POR CORRENTES  
PARASITAS

Lucas Kling e Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:

---

Prof<sup>a</sup>. Gabriela Ribeiro Pereira, Dsc.

---

Prof<sup>o</sup>. Luiz Henrique de Almeida, Dsc.

---

Prof<sup>o</sup>. Juan Manuel Pardal, Dsc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO DE 2018

Silva, Lucas Kling e

Detecção de trincas em aço do grau HP por correntes parasitas / Lucas Kling e Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XVII, 99 p.: il.; 29,7cm

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 91-96.

1. Aço Austenítico HP. 2. Estados de envelhecimento.  
3. Caracterização Magnética. 4. Detecção de Defeitos.  
I. Pereira, Gabriela Ribeiro. II Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

*“No meio da dificuldade  
Encontra-se a oportunidade”  
Albert Einstein*

*Dedico este trabalho aos meus  
queridos pais e a minha amada noiva que  
são os pilares e a motivação da minha vida.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por serem meus maiores exemplos. Em especial a minha mãe que desde minha mais tenra idade, ensinou-me, através do amor, que a perseverança é a maior aliada para se atingir o sucesso, independente das dificuldades que possam vir a surgir;

À minha amada Isabelle Cornelsen, meu porto seguro. Presente em todos os momentos, minha companheira de alegrias e desesperos, de noites em claro, de brincadeiras, de sonhos, me ensinando sempre a perseverar e sendo exemplo de uma força de vontade inabalável, tornando assim, minha vida sempre mais colorida e esperançosa;

À professora Gabriela Ribeiro Pereira pela orientação, pelas oportunidades e confiança, pela ajuda, apoio e suporte nos momentos de dificuldade, pela compreensão, pela amizade e por estar sempre presente;

À professora Renata Antoun Simão pelos seus conselhos, carinho, amizade e apoio desde meu ingresso na UFRJ;

Ao amigo Sérgio Zanetti pelos já 12 anos de amizade incondicional, presente em minha vida sempre se mostrando solícito e gerando boas risadas.

A todos os professores e colaboradores do PEMM que foram imprescindíveis na jornada percorrida;

A todos os amigos da querida “Metalmat” por sempre estarem presentes ao longo desta jornada;

Aos amigos Hércio Mosciaro, Marcus Souza e Daniel Adolpho que surgiram durante o tempo de mestrado e contribuíram de formas diferentes durante esta trajetória;

À toda equipe do LNDC por se mostrarem sempre solícitos, pela compreensão, apoio técnico, científico, amizade e conhecimentos transmitidos. Em especial à Mônica Arenas não apenas pelo grande compartilhamento de informações e ensinamentos técnicos, mas também por sua amizade e apoio.

Ao Fábio Queiroz pela pelo auxílio com as amostras e ensinamentos quanto ao material;

À PETROBRAS, em especial aos engenheiros Carlos Bruno Eckstein e

Laudomiro Nogueira Júnior, pela disponibilização de amostras e pelo apoio técnico.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à Fundação COPPETEC pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DETECÇÃO DE TRINCAS EM AÇO DO GRAU HP POR CORRENTES  
PARASITAS

Lucas Kling e Silva

Maio/2018

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Os fornos de reforma à vapor, onde é produzido hidrogênio a partir de hidrocarbonetos, são fundamentais para o refino da produção da indústria do petróleo. Estes fornos são compostos por colunas constituídas de segmentos de tubos de aço austenítico HP, onde ocorrem reações endotérmicas do processo de refino. Entretanto falhas prematuras podem ocorrer através de danos de fluência levando assim a perdas de produção e paradas de manutenção não programadas. Desta forma, o desafio de detectar, monitorar e avaliar previamente estados de dano e defeitos neste material se faz necessário. Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia, de ensaios não destrutivos, para detecção de trincas em diferentes estados de envelhecimento do aço austenítico HP. Através do desenvolvimento de sondas de correntes parasitas junto a calibração e processo de inspeção orientados à resultados foi detectada trinca em amostra de operação de um segmento de tubo HP, validando assim a metodologia desenvolvida.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## DETECTION OF STEEL HP CREEPS BY PARASITE CURRENTS

Lucas Kling e Silva

May/2018

Advisor: Gabriela Ribeiro Pereira

Department: Metallurgical and Materials Engineering

Steam reforming furnaces, where hydrogen is produced from hydrocarbons, are key to refining the production of the petroleum industry. These furnaces are composed of columns consisting of segments of HP austenitic steel tubes, where endothermic reactions of the refining process occur. However, premature failure can occur through creep damages leading to loss of production and unscheduled maintenance shutdowns. In this way, the challenge of detecting, monitoring and evaluating damage states and defects in this material is necessary. In this work, a non destructive test methodology was developed to detect cracks in different aging stages of HP austenitic steel. Through the development of probes of parasitic currents together with calibration and results-oriented inspection process, a sample was detected in the operating sample of an HP tube segment, thus validating the methodology developed.

## Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Forno de Reforma	3
2.1.1	Aço Inoxidável Austenítico	4
2.1.2	Aço inoxidável grau HP	4
2.1.3	Processo de Fabricação de Fundição por Centrifugação	6
2.1.4	Envelhecimento do aço HP modificado ao nióbio	7
2.1.5	Dano por fluência do aço HP	10
2.	Correntes parasitas	14
2.2.	Princípio Físico	15
2.2.2	Plano de impedância	17
2.2.3	Profundidade de penetração	20
2.2.4	Fatores que influenciam as correntes parasitas	21
2.2.5	Saturação magnética parcial (SMP)	24
2.2.6	Sondas	25
2.3	Caracterização magnética e microestrutural	33
2.3.1	Magnetômetro de amostra vibrante	33
2.3.2	Ferrofluido	34
2.4	Simulação computacional de correntes parasitas	36
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	Material	38
3.2	Preparação metalográfica e caracterização microestrutural	42
3.2.1	Preparação metalográfica	42
3.2.2	Microscopia óptica	43
3.2.3	Microscopia Eletrônica de Varredura	43
3.2.4	Informação magnética microestrutural	43
3.3	Magnetômetro de amostra vibrante – VSM	43
3.4	Simulação computacional	44
3.5	Correntes parasitas	45
3.5.1	Sondas absolutas de correntes parasitas	46
3.5.2	Aprimoramento das sondas absolutas de correntes parasitas	47
3.5.3	Correntes parasitas com saturação magnética parcial	48

3.5.4	Metodologia de ensaio	49
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	Caracterização Microestrutural	52
4.1.1	Amostra HP-I-A	52
4.1.2	Amostra HP-S-B	54
4.2	Magnetômetro de amostra vibrante (VSM)	56
4.3	Simulação Computacional	57
4.4	Correntes Parasitas	59
4.4.1	Sonda ST1 – Calibração segundo (MORAES, 2016) – Amostra HP-I-A	59
4.4.2	Sonda ST1 – Calibração proposta – Amostra HP-I-A	68
4.4.3	Sonda ST2 – Calibração proposta – Amostra HP-I-A	78
4.4.4	Sonda ST2 – Calibração proposta – SMP – Amostra HP-S-B	86
5.	CONCLUSÕES	89
6.	TRABALHOS FUTUROS	90
7.	REFERÊNCIAS	91
	ANEXO A	97

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2. 1: Ilustração de um tipo de forno de reforma. Adaptado de (QUEIROZ, 2012).</i>	3
<i>Figura 2. 2: Esquema da produção de tubos de aços por fundição por centrifugação. Adaptado de (BEELEY, 2001).</i>	7
<i>Figura 2. 3: Liga HP modificada ao Nióbio sem titânio na condição as-cast (a) micrografia ótica, (b) micrografia por MEV com matriz austenítica e rede de carbeto interdendríticos do tipo M7C3 (escuro) e NbC (claro). Adaptado de (LE MAY, 2003).</i>	7
<i>Figura 2. 4: Micrografias da morfologia dos estados de envelhecimento, sendo: (a) estado de envelhecimento I; (b) estado de envelhecimento II; (c) estado de envelhecimento III; (d) estado de envelhecimento IV; (e) estado de envelhecimento V; (f) estado de envelhecimento VI. Adaptado de (QUEIROZ, 2017).</i>	9
<i>Figura 2. 5: Curva típica da evolução da fluência em função do tempo e a evolução microestrutural durante um serviço de um aço de uma planta nuclear. Adaptado de (NAGY, 2010).</i>	11
<i>Figura 2. 6: Influência da tensão, temperatura e do mecanismo de deformação predominante na forma da curva de fluência. Adaptado de (MORAES, 2014).</i>	12
<i>Figura 2. 7: Critério de avaliação de dano acumulado por fluência em tubos de reforma. Adaptado de (SILVEIRA, 2006).</i>	13
<i>Figura 2. 8: Evolução microestrutural dos aços HP-Nb com o tempo de exposição ao serviço nos estados (a) “as-cast”, (b) no início do serviço com estado de envelhecimento I e (c) no final do tempo de serviço com estado de envelhecimento VI. Adaptado de (SHI, 2008).</i>	14
<i>Figura 2. 9: Representação do princípio do ensaio por correntes parasitas e detecção de trinca. (a) Campo magnético primário gerado por uma corrente alternada ao passar por uma bobina, (b) Correntes parasitas geradas pela aproximação do campo magnético primário, (c) campo magnético secundário gerado na peça. Adaptado de (OLYMPUS, 2017).</i>	16
<i>Figura 2. 10: Orientação das trincas para serem detectadas. Adaptado de (NDT, 2017).</i>	17
<i>Figura 2. 11: Plano de Impedância. Adaptado de (NDT, 2017).</i>	18
<i>Figura 2. 12: Plano de impedância com diferentes respostas de correntes parasitas em situações diferentes. Adaptado de (NDT, 2017).</i>	19
<i>Figura 2. 13: Esquema da queda de densidade de correntes parasitas com o aumento da profundidade. Adaptado de (HANSEN, 2004).</i>	21
<i>Figura 2. 14: Efeito da espessura do material no ensaio de correntes parasitas. a) material espesso e b) Material fino. Adaptado de (HANSEN, 2004).</i>	23
<i>Figura 2. 15: Configuração básica de uma sonda de SMP. Adaptado de (CAMERINI, 2015).</i>	24
<i>Figura 2. 16: Modelo de resposta de SMP para dois diferentes tipos de defeito. Adaptado de (INNOSPECTION, 2017).</i>	25
<i>Figura 2. 17: Diferentes tamanhos de sondas de correntes parasitas (EXTENDE, 2017).</i>	25

<i>Figura 2. 18: Sonda de bobina de tipo “pancake” e fluxo de correntes parasitas. Adaptado de (SHAO, 2004).</i> .....	26
<i>Figura 2. 19: (a) Sonda de bobina única de função dupla. (b) Sonda de função separada diferencia. Adaptado de (LOPES, 2009).</i> .....	27
<i>Figura 2. 20: (a) Exemplo de configuração de bobina para sondas absolutas (NDT, 2017) e (b) Sinal absoluto da sonda de bobina circundante absoluta não compensada quando uma barra quebrada é testada. Adaptado de (MARTIN, 2011).</i> .....	28
<i>Figura 2. 21: Ilustração de sinais gerados por uma sonda diferencial. Adaptado de (MARTIN, 2011).</i> .....	28
<i>Figura 2. 22: Esquema das dimensões geométricas da trinca detectada (<math>X_d</math>, <math>Y_d</math> e <math>Z_d</math>) e sua profundidade (<math>d</math>) utilizada na Tabela 3.3. Adaptado de (WEISE, 2016).</i> .....	31
<i>Figura 2. 23: Esquema de um VSM. 1) Transdutor lineal; 2) Suporte; 3) Canudo; 4) Amostra de referência; 5) Amostra; 6) Bobinas de referência.;7) Bobinas; 8) Pólos magnéticos; 9) Caixa metálica. Adaptado de (FONER, 1959).</i> .....	34
<i>Figura 2. 24: Ilustração de (a) uma região que contém vários domínios e (b) uma região que contém um único domínio. Adaptado de (SILVA, 2015).</i> .....	35
<i>Figura 3. 1: Esquema de retirada das amostras, sendo (a) a amostra HP-I-A e (b) a amostra HP-S-B. Eixo vertical representa a altura de retirada das amostras em milímetros.</i> .....	40
<i>Figura 3. 2: Anel de onde foram retiradas as amostras para caracterização.</i> .....	41
<i>Figura 3. 3: (a) Desenho do corpo de prova HP-I-A com a distribuição dos oito entalhes ao longo de seu comprimento. (b) Vista frontal.</i> .....	42
<i>Figura 3. 4: Ilustração do equipamento VSM e disposição da amostra no mesmo. Adaptado de (CORREA, 2013).</i> .....	44
<i>Figura 3. 5: Processo de calibração do OmniScan. Adaptado de (CORREA, 2013).</i> .....	45
<i>Figura 3. 6: Desenho com cotas do carretel onde foi enrolada a bobina de cobre.</i> .....	46
<i>Figura 3. 7: (a) Carretel impresso. (b) Carretel enrolado com 1200 voltas de fio de cobre AWG36, formando a bobina. (c) Protótipo de sonda absoluta para realização dos testes.</i> .....	47
<i>Figura 3. 8: Desenho com cotas do carretel da sonda ST2 onde foi enrolada a bobina de cobre.</i> .....	48
<i>Figura 3. 9: Desenho esquemático do sistema de saturação magnética parcial com cotas em milímetros. Sonda, “yoke” e ímãs.</i> .....	49
<i>Figura 3. 10: Esquema de mapeamento das amostras para realizar o mapa de resposta magnética. Cada número representa três medidas de amplitude e fase a serem adquiridas.</i> .....	49
<i>Figura 3. 11: (a) Adquire-se três medidas na região longitudinal anterior ao entalhe. (b) Adquire-se três medidas na região do entalhe. (c) Adquire-se três medidas na região longitudinal posterior ao entalhe.</i> .....	50
<i>Figura 3. 12: (a) Adquire-se três medidas na região radial anterior ao entalhe. (b) Adquire-se três medidas na região do entalhe. (c) Adquire-se três medidas na região radial posterior ao entalhe.</i> .....	51
<i>Figura 3. 13: Etapas do desenvolvimento da metodologia de inspeção desenvolvida neste trabalho.</i> .....	51

<i>Figura 4. 1: Microestrutura da amostra HP-I-A por microscopia ótica.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4. 2: Em (a) micrografia revelada por microscopia ótica e (b)micrografia por MEV da amostra HP-I-A. ....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4. 3: Microscopia ótica, informação magnética da amostra HP-I-A revelada através de aplicação de ferrofluido.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4. 4: Microestrutura da amostra HP-I-A por microscopia ótica.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4. 5: Em (a) micrografia revelada por microscopia ótica e (b) micrografia por MEV da amostra HP-I-A. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4. 6: Microscopia ótica, informação magnética da amostra HP-I-A revelada através de aplicação de ferrofluido.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4. 7: Curvas de magnetização para a amostra HP-I-A em (a) e para a amostra HP-S-B em (b). ....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4. 8: (a) Imagem em perspectiva da simulação da sonda ST1, onde pode ser observada a profundidade de penetração das correntes parasitas em uma espessura de 12 mm de material. (b) Vista de topo, onde pode ser observada a área de atuação das correntes parasitas da sonda ST1.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4. 9: (a) Imagem em perspectiva da simulação da sonda ST2, onde pode ser observada a profundidade de penetração das correntes parasitas em uma espessura de 12 mm de material. (b) Vista de topo, onde pode ser observada a área de atuação das correntes parasitas da sonda ST2.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4. 10: Profundidade de penetração ST1xST2. ....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4. 11: Para a calibração segundo (MORAES, 2016), têm-se (a) mapeamento da amplitude de resposta de correntes para a amostra HP-I-A, (b) mapeamento da fase de resposta de correntes parasitas para HP-I-A e (c) Desenho do corpo de prova HP-I-A com a distribuição dos oito entalhes ao longo de seu comprimento. ....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4. 12: a) Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas, segundo procedimento IB. (b) Gráfico de fase por entalhes, por correntes parasitas, segundo procedimento IB. (c) Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas, segundo metodologia IA. (d) Gráfico de fase por correntes parasitas, entalhes segundo metodologia IA. ....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4. 13: Para a calibração segundo (MORAES, 2016), tem-se (a) mapeamento da amplitude de resposta de correntes parasitas com SMP para a amostra HP-I-A, (b) mapeamento da fase de resposta de correntes parasitas com SMP para a amostra HP-I-A e (c) desenho do corpo de prova HP-I-A com a distribuição dos oito entalhes ao longo de seu comprimento. ....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4. 14: Para a amostra HP-I-A tem-se (a) gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo procedimento IB. (b) Gráfico de fase por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo procedimento IB. (c) Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo metodologia IA. (d) Gráfico de fase por correntes parasitas com SMP, entalhe segundo metodologia II. ....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 4. 15: Para amostra HP-I-A e segundo a calibração de (MORAES, 2016) têm-se (a) resposta no plano de impedância do procedimento IB, com correntes parasitas com SMP, para o entalhe E8. (b)</i>	

<i>Resposta no plano de impedância do procedimento IA, com correntes parasitas com SMP, para o entalhe E7.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4. 16: Para a calibração proposta têm-se (a) mapeamento da amplitude de resposta de correntes para a amostra HP-I-A, (b) mapeamento da fase de resposta de correntes parasitas para HP-I-A e (c) desenho do corpo de prova HP-I-A com a distribuição dos oito entalhes ao longo de seu comprimento..</i>	<i>71</i>
<i>Figura 4. 17: Para a calibração proposta nos ensaios da amostra HP-I-A têm-se (a) Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas, segundo procedimento IB. (b) Gráfico de fase por entalhes, por correntes parasitas, segundo procedimento IB. (c) Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas, segundo metodologia IA. (d) Gráfico de fase por correntes parasitas, entalhes segundo metodologia IA. ....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 4. 18: Para a calibração proposta têm-se(a) Mapeamento da amplitude de resposta de correntes parasitas como SMP para a amostra HP-I-A, (b) Mapeamento da fase de resposta de correntes parasitas com SMP para a amostra HP-I-A e (c) desenho do corpo de prova HP-I-A com a distribuição dos oito entalhes ao longo de seu comprimento. ....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 4. 19: Para a calibração proposta têm-se (a) gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo procedimento IB. (b) Gráfico de fase por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo procedimento IB. (c) Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo metodologia IA. (d) Gráfico de fase por correntes parasitas com SMP, entalhe segundo metodologia II. ....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4. 20: Para a calibração proposta têm-se (a) mapeamento da amplitude de resposta de correntes para a amostra HP-I-A, (b) mapeamento da fase de resposta de correntes parasitas para HP-I-A e (c) desenho do corpo de prova HP-I-A com a distribuição dos oito entalhes ao longo de seu comprimento..</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4. 21: Para a calibração proposta nos ensaios da amostra HP-I-A têm-se a)Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas, segundo procedimento IB. (b) Gráfico de fase por entalhes, por correntes parasitas, segundo procedimento IB. (c) Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas, segundo metodologia IA. (d) Gráfico de fase por correntes parasitas, entalhes segundo metodologia IA. ....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 4. 22: Para a calibração proposta têm-se (a) Mapeamento da amplitude de resposta de correntes parasitas como SMP para a amostra HP-I-A, (b) Mapeamento da fase de resposta de correntes parasitas com SMP para a amostra HP-I-A e (c) desenho do corpo de prova HP-I-A com a distribuição dos oito entalhes ao longo de seu comprimento. ....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4. 23: Para a calibração proposta têm-se (a) gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo procedimento IB. (b) Gráfico de fase por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo procedimento IB. (c) Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo metodologia IA. (d) Gráfico de fase por correntes parasitas com SMP, entalhe segundo metodologia II. ....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 4. 24: Radiografia parede simples, vista simples da amostra HP-S-B contendo trinca real de fluência. ....</i>	<i>87</i>

*Figura 4. 25: Para a calibração proposta têm-se o mapeamento da amplitude de resposta de correntes parasitas como SMP para a amostra HP-S-B. ....88*

*Figura A. 1: (a) Resultado do ensaio com a calibração na horizontal para o entalhe oito E8, e (b) Resultado do ensaio com a calibração na horizontal para região fora do entalhe. ....98*

*Figura A. 2: (a) Resultado do ensaio com a calibração proposta para o entalhe oito E8, e (b) Resultado do ensaio com a calibração proposta para região fora do entalhe. ....99*

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2. 1: Composição química dos aços inoxidáveis fundidos resistentes ao calor, adaptada de (ASM, 2015b).</i> .....	5
<i>Tabela 2. 2: Estudos sobre correntes parasitas usando diferentes sensores de campo magnético para detecção de trincas na subsuperfície. Extraído e adaptado de (WEISE, 2016; MOOK, 2006; ALMEIDA, 2013; CARLSTEDT, 2014; DOGARU, 2001; SIKORA, 2003; TSUKADA, 2006; YAMADA, 2006; WINCHESKI, 2010; HAMIA, 2010; CACCIOLA, 2010; ROSELL, 2012; LU, 2012; BOHACOVA, 2013; KIM, 2012 e DIRAISON, 2009).....</i>	32
<i>Tabela 3. 1: Tempo de operação, diâmetro externo e espessura das amostras recebidas dos fornos de reforma.....</i>	39
<i>Tabela 3. 2: Composição química das amostras estudadas (% em peso).....</i>	39
<i>Tabela 3. 3: Comprimento, largura e profundidade dos entalhes distribuídos uniformemente ao longo do corpo de prova.....</i>	41
<i>Tabela 3. 4: Parâmetros utilizados por (MORAES, 2016). .....</i>	47
<i>Tabela 4. 1: Parâmetros para calibração proposta para sonda ST1. ....</i>	69
<i>Tabela 4. 2: Parâmetros para calibração proposta para sonda ST2. ....</i>	78
<i>Tabela 4. 3: Parâmetros para calibração da amostra HP-S-B anulando componente resistiva.....</i>	87

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

- $R$  – Resistência (ohms)  
 $X_L$  – Reatância indutiva (ohms)  
 $\Phi$  – Ângulo de fase  
 $Z$  – Impedância (ohms)  
 $V$  – Diferença de potencial (Volts)  
 $I$  – Corrente – (Ampères)  
 $f$  – Frequência (Hertz)  
 $\delta$  – Profundidade de penetração  
 $\rho$  – Resistividade elétrica  
 $\mu_r$  – Permeabilidade magnética  
 $E(\theta)$  – Energia de anisotropia magnética  
 $EB$  – Barreira de energia  
 $f(\theta)$  – função do ângulo  
 $E_t$  – Energia Térmica  
 $K_B$  – Constante de Boltzman  
 $T_a$  – Temperatura absoluta  
 $\vec{E}$  – Energia térmica  
 $\vec{H}$  – Campo magnético  
 $\vec{B}$  – Densidade do fluxo magnético  
 $\vec{D}$  – Densidade do fluxo elétrico  
 $\vec{J}$  – Densidade de corrente

## 1. INTRODUÇÃO

Para que se possam atender os atuais requisitos das agências reguladoras para a produção de combustíveis menos poluente, a indústria petrolífera adapta-se a novos procedimentos de processamento do petróleo, como por exemplo, o hidrotratamento. Este novo procedimento na rota de refino serve para a melhoria da qualidade dos produtos finais, como uma etapa para a preparação de cargas para o processo de refino. Os fornos de reforma a vapor são utilizados para produzir hidrogênio necessário a partir de hidrocarbonetos e vapor d'água, em temperaturas elevadas e na presença de catalisador (CRUZ, 2010), sendo a reforma de metano a vapor o método mais empregado para produção de hidrogênio. Esta metodologia consiste em reações entre o metano e o vapor de água, que ocorrem simultaneamente resultando em um processo altamente exotérmico gerando hidrogênio, monóxido e dióxido de carbono (JORGE, 2005). Na prática, estas reações ocorrem continuamente em fornos de reforma, a temperaturas superiores a 900°C, dentro de colunas constituídas de segmentos de tubos soldados, preenchidos com material catalisador.

Devido às condições severas, como por exemplo, a pressão e a temperatura, em que operam, as colunas são os componentes críticos dos fornos. Os tubos de aços inoxidáveis austeníticos resistentes ao calor do grau HP, fundidos por centrifugação, são atualmente utilizados para a confecção destas colunas. Além de possuírem custos competitivos, este material apresenta uma elevada resistência à fluência e à corrosão. Segundo as recomendações da “American Petroleum Institute” API STD 530 (API 530), as colunas são projetadas para uma vida útil superior a 100.000 h, em uma temperatura de trabalho de 900°C e a pressões internas de 1 a 4 atm.

No entanto, falhas prematuras podem ocorrer oriundos de mecanismos metalúrgicos e químicos, como carburização, oxidação, choque térmico e superaquecimento localizado acidental, porém o fenômeno da fluência é o mecanismo de falha mais significativo (ALVINO, 2010). Intercorrências durante a operação tais como falhas no abastecimento dos tubos, podem levar à interrupção da reação catalítica, que mantém as colunas operando na faixa de temperatura para as quais são projetadas. O superaquecimento decorrente dessa situação, denominado surto de temperatura, pode gerar situações extremas como empenamentos e até mesmo trincamento dos tubos (SILVEIRA, 1992).

Desta forma, os aços do grau HP, formadores das colunas dos fornos de reforma, mostram-se como um insumo de direto e alto impacto na economia do país, tendo em vista que são peças fundamentais para a indústria petrolífera, esta que terá de atender a crescente produção brasileira de petróleo e gás (BALL, 2009).

É necessário o desenvolvimento de uma metodologia capaz de detectar, monitorar e avaliar previamente, estados de dano e defeitos, de forma não destrutiva e eficiente. É reportado na literatura (FIRTH, 2013) que inspeções não destrutivas por correntes parasitas foram realizadas em tubos de fornos de reforma a vapor em operação que sofreram surto de temperatura, de modo que, estas inspeções indicaram possíveis trincas em nível de dano. Assim, estes tubos foram retirados de operação e levados para análise laboratorial, onde se constatou que, na verdade, não havia trincas, entretanto, a resposta que se obteve por correntes parasitas foi decorrente de prováveis mudanças microestruturais que aconteceram durante operação e/ou surto de temperatura (FIRTH, 2013). Desta forma, percebe-se que a detecção destes tipos de defeitos nestes materiais, de forma não destrutiva, ainda permanece sendo um grande desafio a ser superado pela área de inspeção não destrutiva.

Esse trabalho, então, teve por objetivo desenvolver uma metodologia de ensaio não destrutiva utilizando correntes parasitas para detectar entalhes e trincas no aço austenítico HP modificado ao nióbio. E está apresentado neste trabalho o desenvolvimento de uma metodologia que permitiu avaliar sondas projetadas para a detecção dos defeitos, utilizando-se não apenas a caracterização magnética do material, de modo a conhecer suas propriedades, mas também a avaliação por meios experimentais e computacionais.

Foram analisadas duas amostras de tubos de grau HP que estiveram em operação de fornos de reforma. Foram desenvolvidos sensores e procedimento de inspeção por correntes parasitas de modo a detectar trincas. Cada uma destas amostras provém de dois diferentes fabricantes, sendo uma em estado de envelhecimento I (SILVEIRA, 2006) e a outra após ter sofrido surto de temperatura e posterior envelhecimento.

Com os resultados dessa tese foi apresentada ao mercado uma metodologia de inspeção por correntes parasitas em aços HP para detecção de trincas de maneira confiável e com elevada resolução.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Forno de Reforma

No forno de reforma utilizam-se altas temperaturas e pressão dentro de tubos, os quais devem suportar estas condições de trabalho para que ocorra a catálise do hidrogênio. Os aços austeníticos de grau HP são os mais indicados para a fabricação dos tubos de reforma, por apresentarem propriedades como alta resistência ao calor, fluência e corrosão a preços competitivos (BONACCORSI, 2014 e RAY, 2016).

No processo da síntese de hidrogênio, primeiramente ocorre à remoção do enxofre e do cloro dos hidrocarbonetos. Após isto, ocorre a transformação dos hidrocarbonetos e do vapor de água em hidrogênio, dióxido de carbono e monóxido de carbono. Com a adição da monoetanolamina, tem a separação do hidrogênio e do dióxido de carbono, e com adição de mais vapor e do monóxido de carbono tem produção de mais hidrogênio (GARY, 2001). Todo esse processo ocorre dentro de tubos de aços e recebem calor externo para que atinjam altas temperaturas para que as reações ocorram.

Na ilustração, Figura 2.1, do modelo de um forno de reforma possui tubos verticais chamados de colunas de reforma, preenchidos com catalisadores, queimadores no teto do forno, coletores de entrada e de saída, pigtails e contra-pesos. Os tubos possuem comprimento de 10 a 15m e diâmetro de 2” a 8”, vida nominal útil de 100.000h e por serem fabricados por fundição por centrifugação com comprimento de 1 a 7m, os tubos precisam ser unidos por soldagem (QUEIROZ, 2012 e LIU, 2011).

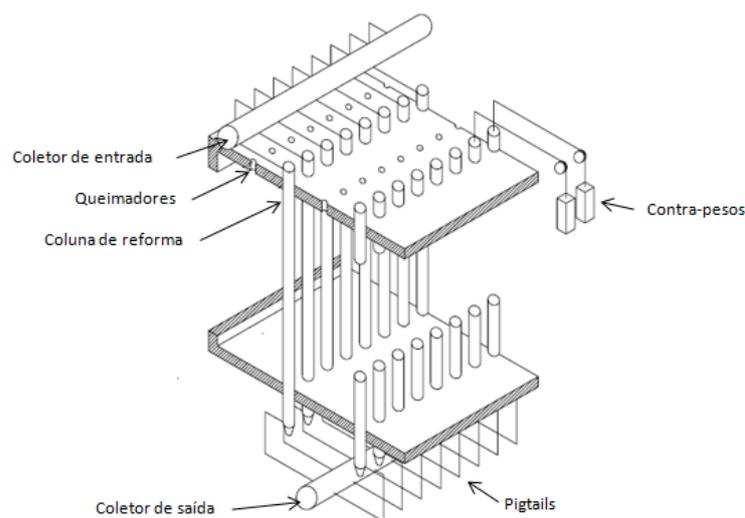


Figura 2. 1: Ilustração de um tipo de forno de reforma. Adaptado de (QUEIROZ, 2012).

Falhas nos tubos podem causar paradas não planejadas e até perda na produção de hidrogênio podendo ser extremamente custosas. A principal causa da falha dos tubos usados em fornos de reforma é a fluência (QUEIROZ, 2012).

### 2.1.1 Aço Inoxidável Austenítico

Os aços inoxidáveis austeníticos são usualmente os mais comuns dentre as ligas metálicas inoxidáveis, representando cerca de 67% da produção mundial (COLPAERT, 2008). Sua composição química possui como principal característica, além da presença do cromo, a presença de níquel, podendo ainda possuir três outros elementos, como manganês, molibdênio e nióbio. O níquel é classificado como um elemento gamagêneo, possibilitando a maior estabilidade da fase austenítica à temperatura ambiente. Em ligas comerciais aplicadas aos fornos de reforma, neste caso o aço do grau HP, o cromo varia de 16% a 26% da composição em peso, enquanto o níquel varia de 6% a 22% (ASTM, 2006).

### 2.1.2 Aço inoxidável grau HP

Devido às severas condições de serviço em fornos de reforma a vapor, os aços inoxidáveis austeníticos fundidos tornam-se susceptíveis a falhas por fluência, a descarbonetação, a corrosão e a fadiga térmica, portanto suas propriedades mecânicas estão sendo aprimoradas através de modificações na sua composição química (ASTM, 2006).

Os aços inoxidáveis fundidos podem ser classificados em duas classes: aços do tipo C que apresentam alto teor de carbono, alterando sua microestrutura de acordo com a temperatura do serviço, porém mantêm sua resistência mecânica. Essa classe apresenta boa propriedade mecânica e resistência a danos causados pelo serviço para aplicação em ambientes aquosos corrosivos, com uma temperatura máxima de 650°C. A segunda classe, dos aços do tipo H, é utilizada a altas temperaturas, acima de 650°C (RIBEIRO, 1986).

A própria nomenclatura dos aços do grau H fornece as informações sobre qual temperatura é indicado para uso, representado pela primeira letra, e qual a relação dos elementos níquel-cromo, representada pela segunda letra. A segunda letra varia de A a Z, onde A representa a menor quantidade de Ni e Z representa a maior quantidade de

Ni. Por exemplo, o aço HP é indicado para usos a altas temperaturas e possui de 24-28% de Cr e 33-37% de Ni, como pode ser visto na Tabela 2.1 (ASM, 2015b).

Tabela 2. 1: Composição química dos aços inoxidáveis fundidos resistentes ao calor, adaptada de (ASM, 2015b).

Classe do Aço	Composição Química (wt%)		
	C	Cr	Ni
HA	0,20 máx	8 – 10	---
HC	0,50 máx	26 – 30	4 máx
HD	0,50 máx	26 – 30	4 – 7
HE	0,20 – 0,50	26 – 30	8 – 11
HF	0,20 – 0,40	19 – 23	9 – 12
HH	0,20 – 0,50	24 – 28	11 – 14
HI	0,20 – 0,50	26 – 30	14 – 18
HK	0,20 – 0,60	28 – 28	18 – 22
HK 30	0,25 – 0,35	23 – 27	19 – 22
HK 40	0,35 – 0,45	23 – 27	19 – 22
HL	0,20 – 0,60	28 – 32	18 – 22
HN	0,20 – 0,60	19 – 23	23 – 27
HP	0,35 – 0,75	24 – 28	33 – 37
HP 50 WZ	0,45 – 0,55	24 – 28	33 – 37
HT	0,35 – 0,75	13 – 17	33 – 37
HT 30	0,25 – 0,35	13 – 17	33 – 37
HU	0,35 – 0,75	17 – 21	37 – 41
HW	0,35 – 0,75	10 – 14	58 – 62
HX	0,35 – 0,75	15 – 19	64 – 68

As propriedades mecânicas dos aços HP podem ser melhoradas, através de modificações das suas microestruturas, com a adição de elementos químicos como nióbio, titânio, zircônio, ítrio e tungstênio (ASTM, 2006).

Além disso, estudos quanto às informações magnéticas do aço HP também é reportada na literatura por (SILVEIRA, 2017). Nesse estudo foi mostrado a caracterização da superfície externa dos tubos HP, retirados de diferentes unidades de

refino, relacionando suas características com o estado de envelhecimento de cada tubo e, também, com a sua resposta magnética. A análise em Microscopia de Força Magnética (do inglês *Magnetic Force Microscopy*) mostrou que a resposta magnética da superfície externa ocorreu devido ao óxido mais externo rico em Fe e Ni, que apresenta comportamento ferromagnético, e também devido à camada transformada, a qual sofreu empobrecimento de cromo na matriz, mas diz que não é possível dizer qual resposta magnética é preponderante. Também realizou análise através de susceptômetro magnético de varredura e mostrou que a superfície externa não apresenta um comportamento homogêneo. Entretanto, o campo magnético induzido possui uma tendência na intensidade que é diretamente relacionada à altura da coluna de reforma (que define a temperatura e o estado de envelhecimento característico em cada região), uma vez que a resposta magnética aumenta com a espessura da camada transformada e da camada de óxido. Porém, mesmo uma superfície externa maior pode ter menor resposta magnética devido a possível menor quantidade de óxidos magnéticos (SILVEIRA, 2017).

### 2.1.3 Processo de Fabricação de Fundição por Centrifugação

O processo de fabricação de fundição por centrifugação consiste em um molde refrigerado pela parede externa em alta rotação onde um metal líquido é adicionado. Devido à força centrífuga, o metal líquido direciona-se para a parede do molde e solidifica da parede externa para o centro do molde, como pode ser visto na Figura 2.2. Durante a solidificação, dependendo da composição da liga e do resfriamento, há formação de grãos colunares e equiaxiais e apresenta menos poros e defeitos proporcionando uma maior resistência à fluência. A eliminação dos defeitos se dá através do controle do diâmetro interno na usinagem. O processo de fundição por centrifugação pode ser dividido em centrifugação vertical e horizontal, sendo o último o mais comumente utilizado na fabricação dos tubos em questão (BEELEY, 2001).

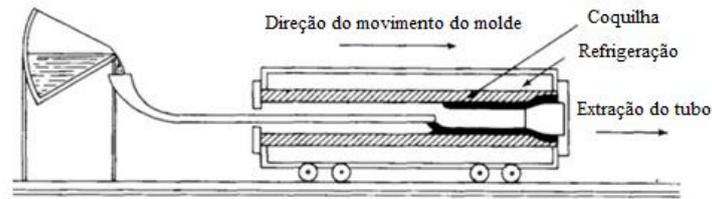


Figura 2. 2: Esquema da produção de tubos de aços por fundição por centrifugação. Adaptado de (BEELEY, 2001).

A presença de elevados teores de carbono prevalece à formação de austenita no processo, porém o excesso de carbono provoca a saturação de austenita ocasionando o aparecimento de uma rede de carbeto eutéticos com uma precipitação fina, em forma de ilhas isoladas nas regiões interdendríticas, por exemplo, durante o resfriamento (ASM, 2015b e SHI, 2008). Esta rede assume uma estrutura chamada de escrita chinesa, sendo uma característica dos aços HP modificado ao Nb (SHI, 2008 e ASM, 2015b). Na micrografia ótica e de microscopia eletrônica de varredura da Figura 2.3, pode-se observar a microestrutura das ligas HP modificado ao Nióbio.

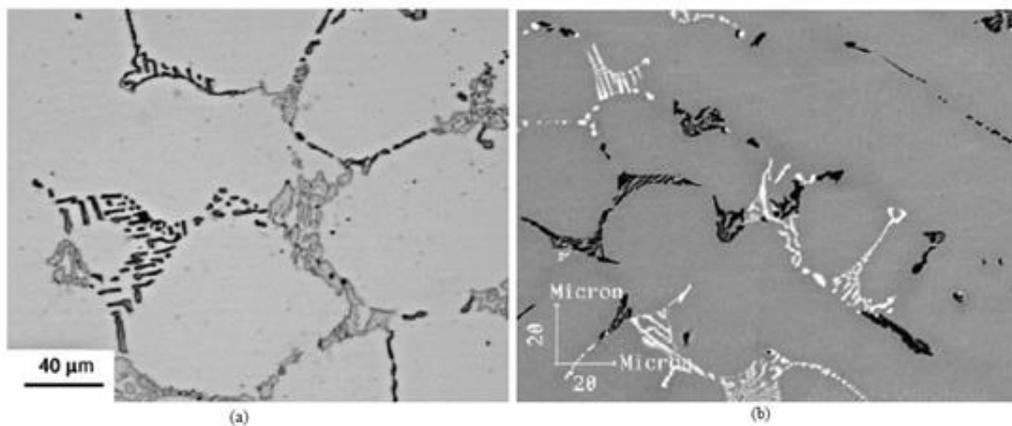


Figura 2. 3: Liga HP modificada ao Nióbio sem titânio na condição as-cast (a) micrografia ótica, (b) micrografia por MEV com matriz austenítica e rede de carbeto interdendrítico do tipo M7C3 (escuro) e NbC (claro). Adaptado de (ALMEIDA, 2003).

#### 2.1.4 Envelhecimento do aço HP modificado ao nióbio

As altas temperaturas de operação e serviço prolongado nos tubos em fornos de reforma promovem a evolução microestrutural onde muitas vezes é interpretada como uma degradação metalúrgica. O nível de envelhecimento não é o mesmo ao longo do

tubo devido a, como por exemplo, as reações endotérmicas que acontecem no interior do tubo. (SILVEIRA, 2006).

A temperatura e a composição do material influenciam as alterações microestruturais que ocorrem durante o envelhecimento. Nesse processo, os precipitados primários ( $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$  e NbC) na estrutura são parcialmente transformados em precipitados secundários do tipo ( $M_{23}C_6$  e fase-G). A adição de nióbio diminui o crescimento de precipitados, diminui a precipitação de carbeto secundários e fragmenta os carbeto primários. Em determinadas condições de envelhecimento, os carbeto de nióbio se transforma na fase-G por ser instável nessas condições (QUEIROZ, 2017).

De acordo com (SILVEIRA, 2006), as transformações microestruturais dos aços HP são semelhantes aos dos aços HK, que já se encontra na literatura, levando a criação de curvas características para os tubos usados em fornos de reforma classificando o estado de envelhecimento e o dano por fluência. Existem seis estados de envelhecimento e cinco níveis de dano por fluência, que serão discutidos a seguir.

O estado de envelhecimento I ocorre em temperaturas menores de 600°C. O tubo não apresenta mudanças microestruturais aparentes, possui aparência de novo, e não possui carbeto secundários aparentes. Nos contornos das dendritas, os carbeto possuem forma de plaquetas.

O estado de envelhecimento II ocorre em temperaturas entre 600 e 700°C. Os carbeto primários deixam de ter uma configuração de plaquetas para uma configuração de blocos compactos e ocorre nucleação de carbeto secundários no interior da matriz de austenita precipitando, primeiro, nos braços das dendritas.

O estado de envelhecimento III ocorre em temperaturas entre 700 e 800°C. Tem a transformação completa dos carbeto primários na forma de blocos compactos e dispersão de finos carbeto secundários pela matriz.

O estado de envelhecimento IV ocorre em temperaturas entre 800 e 900°C. Estabilização da morfologia dos carbeto primários, coalescimento dos carbeto secundários e perda de carbeto secundários ao longo dos limites dendríticos devido à difusão do carbono para os carbeto primários.

O estado de envelhecimento V ocorre em temperaturas entre 900 e 1000°C. A região que envolve os carbeto primários não possui carbeto secundários e ocorre

coalescimento dos carbetos secundários estando em um menor número do que em temperaturas menores.

O estado de envelhecimento VI ocorre em temperaturas superiores a 1000°C. Tem um coalescimento dos carbetos secundários mais intensos, evolução das condições do estado de envelhecimento V e engrossamento dos contornos.

Os seis estados de envelhecimento podem ser visualizados na Figura 2.4.

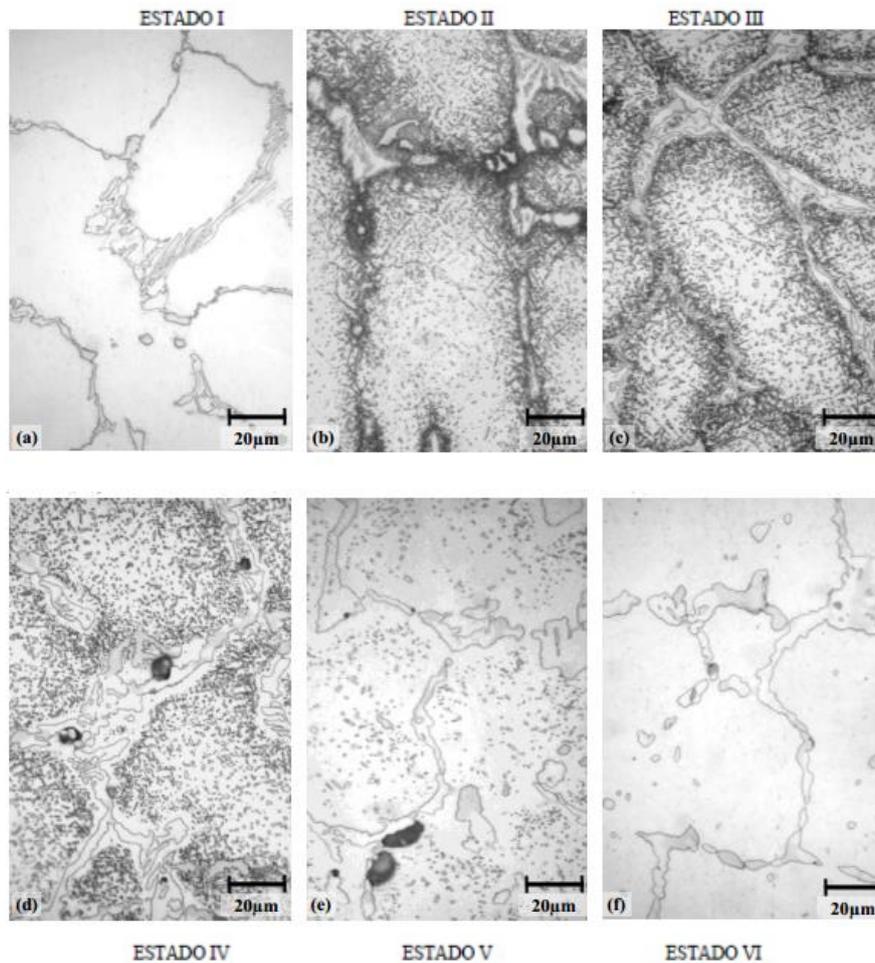


Figura 2. 4: Micrografias da morfologia dos estados de envelhecimento, sendo: (a) estado de envelhecimento I; (b) estado de envelhecimento II; (c) estado de envelhecimento III; (d) estado de envelhecimento IV; (e) estado de envelhecimento V; (f) estado de envelhecimento VI. Adaptado de (QUEIROZ, 2017).

O envelhecimento dos aços HP-Nb e HP-NiTi foram analisados por (QUEIROZ, 2017) se podem ser baseados segundo os critérios de (SILVEIRA, 2006). Foi proposta uma ampliação dos critérios de classificação considerando a morfologia da escrita

chinesa para os carbeto primários no estado de envelhecimento I, a precipitação secundária acicular para o estado de envelhecimento II e o refinamento dos precipitados secundários no estado de envelhecimento IV. Conclui que o critério de classificação dos estados de envelhecimento para os aços HP modificados pode ser baseado na proposição original de (LE MAY, 1994). A instabilidade do NbC, frente a formação de silicetos, não apresentou características morfológicas que possam ser consideradas para ampliar ou refinar o critério de classificação do estado de envelhecimento dos aços HP modificados. Levando em conta os aspectos construtivos do forno, a região do tubo de mudança do estado de envelhecimento I para o estado de envelhecimento IV varia entre os tubos e pode ser bem estreita ao longo do comprimento do tubo (SILVEIRA, 2006 e QUEIROZ, 2017).

#### 2.1.5 Dano por fluência do aço HP

Fluência pode ser definida como a deformação de um material sob tensão ou carregamento constante e é dependente do tempo. Os aços a temperaturas superiores a 370°C apresentam danos por fluência, mas somente a partir de  $0,5T_F$ , sendo  $T_F$  a temperatura de fusão absoluta, esse tipo de dano ganha importância (ASM, 2015b).

Os ensaios de fluência analisam o comportamento de um material em fluência através da deformação de um corpo de prova em função do tempo sob uma temperatura e tensão constante. O primeiro estágio de fluência, ou fluência primária, possui uma taxa de fluência decrescente onde a sua própria deformação aumenta a resistência à fluência (SANTOS, 2011 e DIETER, 1988). O segundo estágio, ou fluência secundária, apresenta uma taxa de fluência praticamente constante, causado por um processo competitivo entre mecanismos de encruamento e recuperação (DIETER, 1988). O terceiro estágio de fluência, ou fluência terciária, ocorre um súbito aumento da taxa de fluência seguido de fratura. Nesse estágio há acúmulo de danos e desenvolvimento de vazios e microtrincas nos contornos de grãos devido a uma diminuição da seção resistente (SANTOS, 2011; DIETER, 1988 e NAGY, 2010). Na Figura 2.5 podem-se observar esses três estágios.

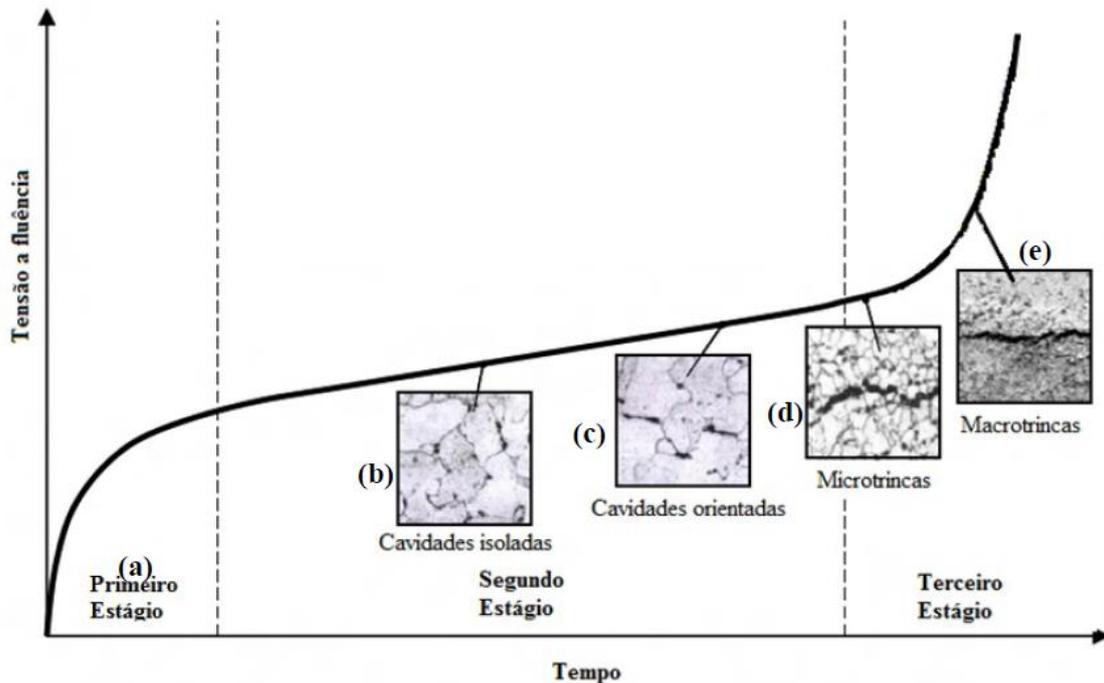


Figura 2. 5: Curva típica da evolução da fluência em função do tempo e a evolução microestrutural durante um serviço de um aço de uma planta nuclear. Adaptado de (NAGY, 2010).

O tamanho de grão, as propriedades intrínsecas do material, a temperatura e o estado de tensões são os fatores que exercem grande influência sobre os mecanismos de deformação por fluência. Na Figura 2.6 podem-se observar três condições que influenciam o mecanismo de deformação por fluência. Na Figura 2.6 na curva A, onde a tensão é alta, o mecanismo predominante é a fluência por movimentação das discordâncias. A escalagem e o deslizamento cruzado são processos ativados termicamente que permitem que as discordâncias superem as barreiras (átomos absolutos, degrau de discordância e precipitados coerentes). Na curva C da Figura 2.6, tem baixa tensão e o mecanismo de deformação por fluência predominante é por difusão. Ocorre a difusão de lacunas e átomos intersticiais ao longo do eixo de carga diminuindo a área específica. O mecanismo por fluência por Coble ocorre em temperaturas mais brandas onde o fluxo da difusão das lacunas com os átomos intersticiais ocorre através dos contornos de grão. Com temperaturas bem altas, o mecanismo por fluência de Nabarro-Herring tem a difusão no interior do grão. Ainda há outro mecanismo, um intermediário aos mecanismos citados anteriormente, chamado de mecanismo de fluência por deslizamento de contornos que ocorre quando coexiste movimentação de contornos e difusão, Figura 2.6 na curva B. Nesse mecanismo os

grãos formam trincas ao deslocarem entre si formando então os danos por fluência (MORAES, 2014).

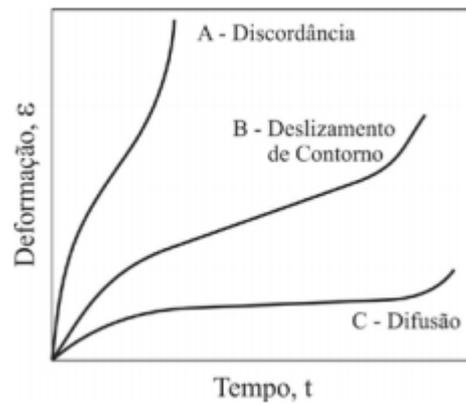


Figura 2. 6: Influência da tensão, temperatura e do mecanismo de deformação predominante na forma da curva de fluência. Adaptado de (MORAES, 2014).

Os níveis dos danos por fluência dos tubos podem ser classificados em cinco estados, como pode ser observado no esquema na Figura 2.7. As microtrincas resultantes das interligações de vazios de formato lenticular avançam da parede interna do tubo para a parede externa (ZHU, 1990). O primeiro estado, com 0% de vida consumida apresenta ausência de vazios do tipo lenticular. Com 25% de vida consumida há vazios com distribuição aleatória sem alinhamento. Com 50% de vida consumida os vazios se alinham sem interligação. Com 75% de vida consumida o tubo apresenta trincas de interligações dos vazios alinhados. Essas trincas começam na parede interna do tubo e não passa da metade da espessura do tubo. Quando as trincas alcançam 2/3 da espessura do tubo, é considerada com vida útil extinta e deve ser trocada (SILVEIRA, 2006).



Figura 2. 7: Critério de avaliação de dano acumulado por fluência em tubos de reforma. Adaptado de (SILVEIRA, 2006).

Embora as peças fundidas de aço inoxidável austeníticos resistentes ao calor sejam projetadas para uso em temperaturas elevadas, o envelhecimento pode ocorrer após exposição prolongada ao calor. A perda de ductilidade está associada a uma mudança na natureza dos precipitados nas regiões interdendríticas da estrutura do elenco durante o serviço. Isso geralmente resulta em maior resistência, mas também causa uma perda de ductilidade à temperatura ambiente, levando a possíveis problemas de reparo durante o desligamento (SHI, 2008).

O estudo da evolução da microestrutura de aços HP-Nb foi realizado por (SHI, 2008) após tempos de serviço de até 12 h com o objetivo de desenvolver técnicas de teste que quantifiquem o grau de envelhecimento. Na condição “*as-cast*”, para aços com teor de nióbio os carbonetos primários NbC rico em Cr e carbetos secundários de  $M_{23}C_6$  bem pequenos foram observados. Quando o tubo entra em serviço o carbeto NbC começa a se transformar em siliceto de Ni-Nb e o carbeto  $M_7C_3$  se transforma de uma forma rápida em  $M_{23}C_6$  rico em Cr. Também observaram que a quantidade de carbetos ricos em Cr começou a superar a fase rica em Nb. Os carbetos NbC e  $M_7C_3$  do tubo em serviço se transformaram completamente em silicato de Ni-Nb e  $M_{23}C_6$ , respectivamente, tendo um volume final maior para carbetos secundários  $M_{23}C_6$ . Na Figura 2.8 estão ilustradas as principais microestruturas da liga HP-Nb com ao longo do tempo de serviço em altas temperaturas (SHI, 2008).

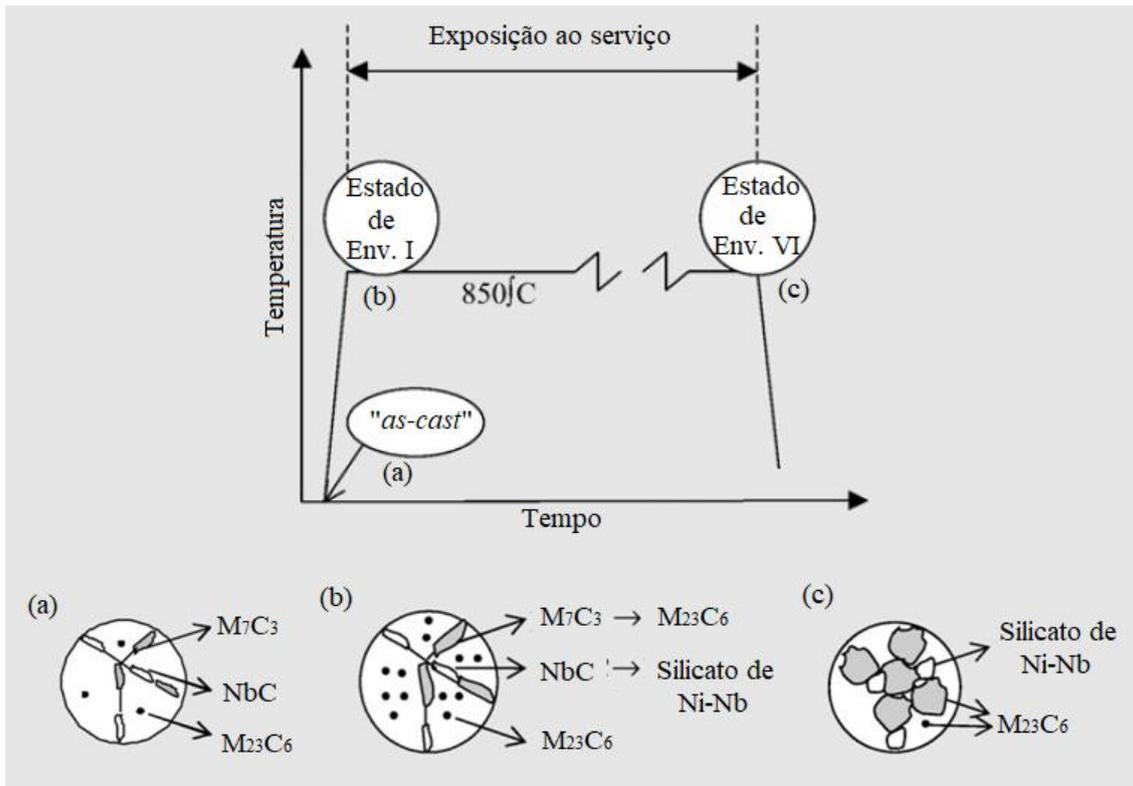


Figura 2. 8: Evolução microestrutural dos aços HP-Nb com o tempo de exposição ao serviço nos estados (a) “as-cast”, (b) no início do serviço com estado de envelhecimento I e (c) no final do tempo de serviço com estado de envelhecimento VI. Adaptado de (SHI, 2008).

## 2.2 Correntes parasitas

A técnica de inspeção de materiais condutores elétricos por correntes parasitas (do inglês “*eddy current testing*”) é um ensaio não destrutivo baseado no princípio da indução eletromagnética podendo ser usado para detecção de trincas, medição de espessura de materiais e de revestimentos, medição de condutividade elétrica, como forma de identificação do material e das transformações microestruturais que eventualmente possam ter alterado sua condutividade e/ou permeabilidade. Esta técnica também é bastante usada na indústria petroquímica e na aeronáutica (NDT, 2017).

Essa técnica permite detecção de trincas em uma grande variedade de materiais condutores, tanto ferromagnéticos quanto não-ferromagnéticos o que outras técnicas não destrutivas, como o método de partículas magnéticas, são limitadas a materiais ferromagnéticos. Uma grande variedade de medidas e inspeções pode ser realizada com testes de correntes parasitas como distinguir entre materiais puros e sua composição e medir espessuras de camadas condutivas ou não. (MERCIER, 2006 e PEDERSEN, 2000).

Para reduzir a frequência da remoção de tubos de forno de reforma para avaliação baseada em condições de dano e para melhorar a confiabilidade geral da vida do tubo, o uso de técnicas não-destrutivas se torna vantajosa. O tubo pode ser inspecionado a partir das respostas de uma sonda, de modo a classificar seu estado de envelhecimento. Como qualquer outra técnica existe certos limites na detectabilidade, dimensionamento e caracterização de falhas que são fortemente dependentes das características gerais do sistema de teste, composta pelo meio ambiente, instrumentação, sensor, material em teste e o operador. Dessa forma o projeto da bobina no teste de correntes parasitas é importante para obter uma sensibilidade adequada e uma boa relação sinal/ruído. (MATESA, 2008).

### 2.2.1 Princípio Físico

Um campo magnético primário é gerado ao passar uma corrente alternada em uma bobina. Ao aproximar essa bobina de um material condutor, esse campo magnético primário penetra no material gerando uma corrente induzida segundo a Lei de Lenz, também chamada de correntes parasitas. As correntes parasitas geram um campo magnético secundário com a mesma direção do campo primário, mas com sentido oposto fazendo assim com que haja uma alteração na indutância da bobina, Figura 2.9. A resistência ao fluxo das correntes parasitas pode ser aumentada se existir algum fator, como as trincas, acarretando uma mudança na impedância da bobina. Essas mudanças são monitoradas durante todo o experimento fornecendo informações do material (NDT, 2017 E MARTIN, 2011).

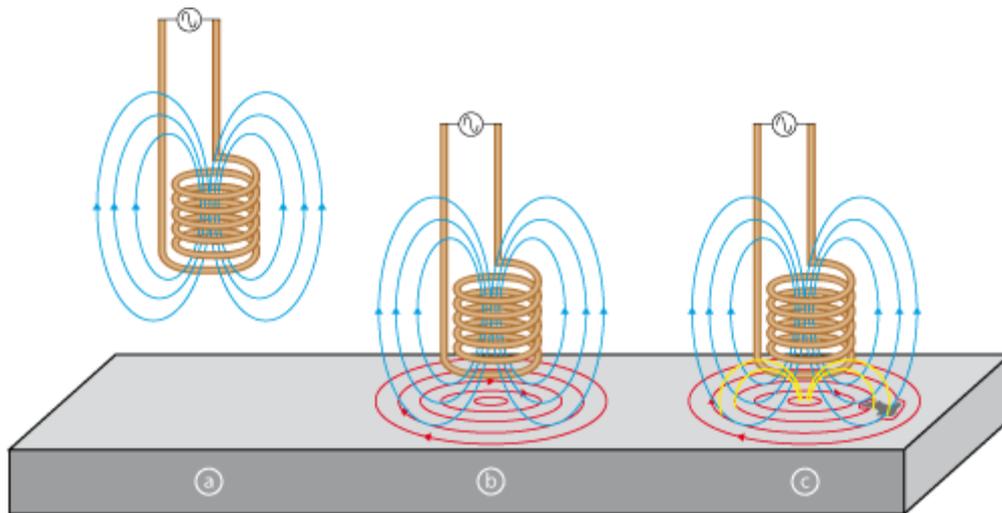


Figura 2. 9: Representação do princípio do ensaio por correntes parasitas e detecção de trinca. (a) Campo magnético primário gerado por uma corrente alternada ao passar por uma bobina, (b) Correntes parasitas geradas pela aproximação do campo magnético primário, (c) campo magnético secundário gerado na peça. Adaptado de (OLYMPUS, 2017).

O uso da técnica de correntes parasitas possui vantagens em relação a outras técnicas não destrutivas por ter grande sensibilidade a pequenas trincas e defeitos na superfície e na subsuperfície. O material a ser analisado precisa de pouca ou nenhuma preparação. Além de o equipamento ser portátil, não precisa estar em contato com o material e ainda é capaz de inspecionar materiais com geometrias complexas e de vários tamanhos. Apesar de suas vantagens essa técnica possui limitações como: o material precisa ser condutor, é preciso mais habilidade para utilizar essa técnica, a rugosidade pode causar interferência, precisa de referência para calibração, a profundidade de penetração é limitada e a localização da descontinuidade, a trinca, deve estar em um sentido que interrompa o fluxo das correntes parasitas, ou seja, não pode estar paralela a correntes parasitas, Figura 2.10 (NDT, 2017).

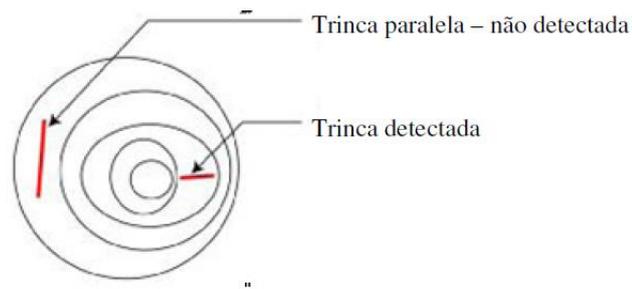


Figura 2. 10: Orientação das trincas para serem detectadas. Adaptado de (NDT, 2017).

Sendo o foco do presente trabalho a utilização de correntes parasitas em aços do grau HP, constatou-se a viabilidade de aplicação da técnica, apesar de seus desafios, dado que (FIRTH, 2013) mostra que tubos de reforma analisados por testes de correntes parasitas indicaram que a maioria dos tubos estavam em um estado crítico de trincas. Com análises laboratoriais, observaram que os tubos não apresentavam nenhuma trinca e as respostas obtidas pelo teste de correntes parasitas eram devido às mudanças microestruturais que ocorreram durante o superaquecimento.

### 2.2.2 Plano de impedância

Quando uma bobina é excitada por uma corrente elétrica alternada, a corrente é interferida pela resistência elétrica ( $R$ ), definida como oposição do material ao fluxo de corrente elétrica, e pela reatância indutiva ( $X_L$ ), definida como a oposição a mudanças de corrente alternada que fluem no material. O plano de impedância é usado como ferramenta de visualização no teste de correntes parasitas onde a reatância indutiva está no eixo  $y$  e a componente resistiva no eixo  $x$ , formando o ângulo de fase ( $\phi$ ) pelas componentes indutiva e resistiva, como podemos ver na Figura 2.11. A impedância elétrica ( $Z$ ) é caracterizada pela oposição à corrente alternada em um circuito elétrico, é medida em Ohms ( $\Omega$ ), é dada pela soma vetorial entre os dois componentes, indutiva e resistiva, e permite fácil interpretação dos resultados de inspeção e o efeito de diferentes fontes de perturbação (ASM, 2015a e HANSEN, 2004).

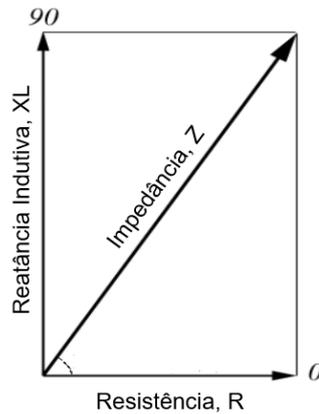


Figura 2. 11: Plano de Impedância. Adaptado de (NDT, 2017).

A impedância pode ser calculada pela Equação 1, a resistência pela Equação 2, a indutância pela Equação 3 e o ângulo da fase pela Equação 4 (ASM, 2015a e HANSEN, 2004).

$$Z = \sqrt{R^2 + XL^2} \quad \text{Equação 1}$$

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{Equação 2}$$

$$XL = 2f\pi L \quad \text{Equação 3}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{XL}{R} \quad \text{Equação 4}$$

Sendo “V” a diferença de potencial em volts, “I” a corrente em ampères e “f” a frequência da corrente alternada em hertz.

O diagrama do plano de impedância exhibe os dados de inspeção de correntes parasitas de uma forma simples e útil, variando de diferentes formas dependendo da situação. Na Figura 2.12 podemos ver como é o diagrama de impedância para um material magnético, como o aço, e um material não magnético, como o alumínio (NDT, 2017). Nos dois casos, existe um mesmo ponto inicial, chamado de ponto de equilíbrio, que indica quando a sonda está no ar, tendo atuação somente no campo magnético primário.

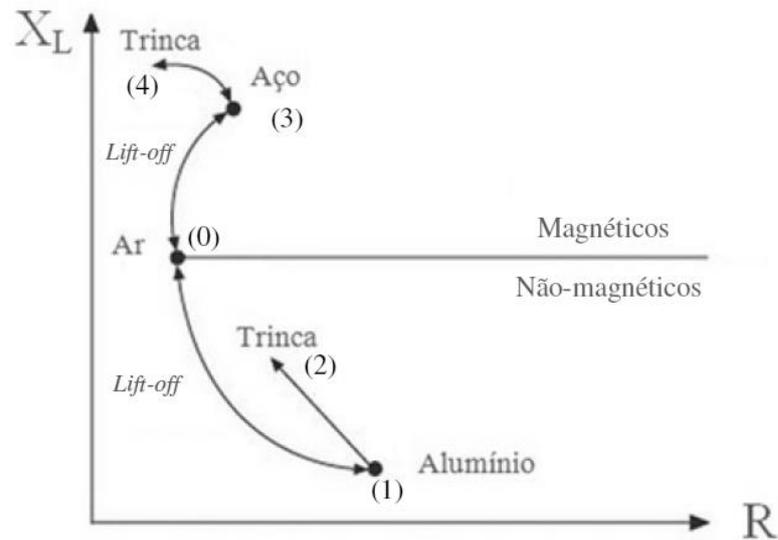


Figura 2. 12: Plano de impedância com diferentes respostas de correntes parasitas em situações diferentes. Adaptado de (NDT, 2017).

É necessário conhecer o comportamento da impedância elétrica para a interpretação do ensaio de correntes parasitas. A Figura 2.12 relaciona, de forma ilustrativa, os pontos de maior importância do plano de impedância. Nesta ilustração, verifica-se que ao aproximar a sonda de um material não magnético, como por exemplo, o alumínio, (do ponto 0 ao ponto 1), ocorre o aumento na resistência da bobina. Isto acontece porque correntes elétricas são geradas no metal, o que retira energia da bobina e faz sua resistência aumentar. A reatância indutiva por sua vez diminui, já que as correntes parasitas produzem um campo secundário que se opõe ao primário, resultando em um campo magnético menor para gerar indutância. Na presença de trincas, (do ponto 1 para o ponto 2) haverá queda na resistência e aumento na reatância já que a intensidade de correntes parasitas é menor.

Entretanto, ao aproximar a sonda de uma amostra magnética, como por exemplo, um aço ferrítico (do ponto 0 ao ponto 3), a resistência aumenta pois as correntes geradas retiram energia da bobina. A reatância indutiva ( $X_L$ ), ao contrário do caso anterior, irá se elevar. O motivo para isto é devido à alta permeabilidade magnética do aço, que faz com que o campo magnético primário se concentre fazendo com que o fluxo magnético na bobina se torne maior e suprimindo o campo secundário, fatores que elevam a reatância. Finalmente, a presença de trincas seguirá um padrão semelhante ao que

ocorre no alumínio, com queda na resistência e aumento da reatância (entre pontos 3 e 4) (NDT, 2017).

Cabe ainda ressaltar que na Figura 2.12 o caminho entre os pontos 0 e 1 e entre os pontos 0 e 3 é denominado de “*lift-off*”, termo é utilizado para descrever o espaço existente entre a sonda e a peça.

### 2.2.3 Profundidade de penetração

Em um material a ser analisado, as correntes parasitas encontram-se densamente na superfície e conforme vai penetrando no material ela diminui gradativamente até sumir, fenômeno chamado de efeito pelicular. Esse efeito pode ser explicado onde hipoteticamente o material apresenta várias camadas onde as correntes passam criando um campo magnético que se opõe ao campo primário. Dessa forma as camadas superiores interferem no campo magnético das camadas mais profundas diminuindo as correntes parasitas à medida que a profundidade aumenta. A profundidade de penetração das correntes parasitas pode ser calculada pela Equação 5 (ASM, 2015a e HANSEN, 2004).

$$\delta = 50 \sqrt{\frac{\rho}{f\mu_r}} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo que  $\delta$  é a profundidade de penetração padrão em milímetros, definida pela profundidade onde haja 37% de correntes parasitas em comparação com a quantidade de correntes parasitas na superfície,  $\rho$  é a resistividade elétrica em microohms por centímetro,  $f$  é a frequência de inspeção em “Hertz” e  $\mu_r$  é a permeabilidade magnética relativa.

Quando a densidade das correntes parasitas é igual a 5% da densidade de corrente na superfície, geralmente é três vezes a profundidade de penetração padrão, a densidade das correntes parasitas já não contribui para a resposta da bobina. Na Figura 2.13 podemos ver a queda da densidade das correntes parasitas com o aumento da profundidade (ASM, 2015 e HANSEN, 2004).

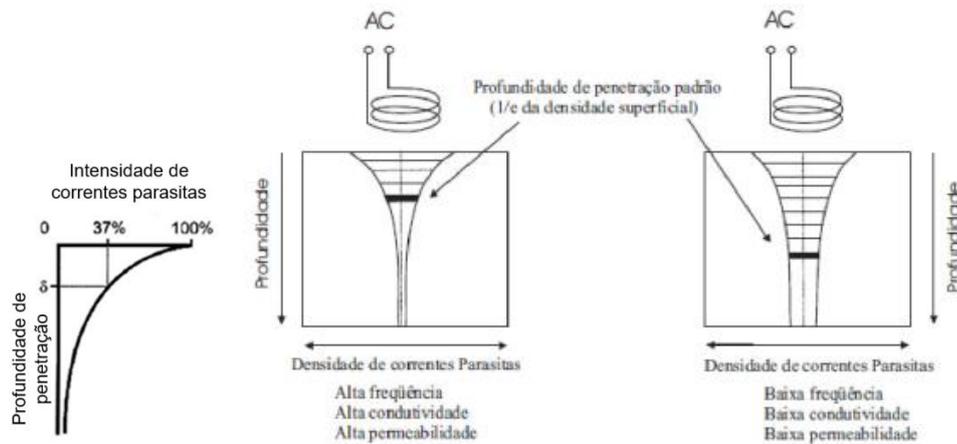


Figura 2. 13: Esquema da queda de densidade de correntes parasitas com o aumento da profundidade.

Adaptado de (HANSEN, 2004).

As análises da fase do sinal são importantes para determinar o tamanho da trinca e sua localização, pois uma trinca grande na subsuperfície pode gerar um mesmo sinal, uma variação na impedância igual, que uma trinca pequena na superfície. Devido ao efeito pelicular, a resposta do sinal de uma trinca depende da amplitude e da fase de corrente que foi interferida (ASM, 2015a).

#### 2.2.4 Fatores que influenciam as correntes parasitas

Uma série de fatores além de discontinuidades tem influência no fluxo de correntes parasitas em um material, tais como, composição química, dureza, resistência, desgaste por corrosão, grau de encruamento e microestrutura. Entretanto nenhuma dessas propriedades ou estados é medida diretamente, a inspeção por correntes parasitas é sensível quando as propriedades em estudo alteram a resistividade elétrica e/ou permeabilidade magnética, sendo assim uma medida indireta das propriedades do material e é preciso uma compreensão boa dos princípios da técnica e padrões apropriados para obtenção de resultados desejados. Desta forma, para sucesso da inspeção, seja ela na detecção de defeitos ou na caracterização do material se baseia em eliminar a influência das variáveis que não se deseja inspecionar no ensaio (ASM, 2015a).

- Frequência

A frequência é um importante parâmetro que indica a frequência de oscilação da corrente alternada que passa pela bobina, influenciando diretamente na profundidade de penetração das correntes parasitas e na sensibilidade para encontrar trincas. É um parâmetro instrumental, ou seja, pode ser selecionada pelo operador. Quando se usa baixa frequência, maior a profundidade das correntes parasitas, mas apresenta uma sensibilidade menor aos defeitos (ASM, 2015a).

- Condutividade elétrica

A condutividade elétrica é uma propriedade intrínseca ao material e pode ser descrita como a resistência que o material possui ao fluxo de correntes elétricas. A condutividade elétrica possui um efeito de como as correntes parasitas fluem no material, ou seja, quanto maior a condutividade do material, maior é o fluxo de correntes parasitas que vai passar na superfície da matéria. Dessa forma podemos classificar os materiais como isolantes, possuem maior resistência, semicondutores, possuem resistência intermediária, e os condutores, possuem pouca resistência. Alguns fatores podem modificar a condutividade elétrica de um material, como a composição química, tratamento térmico, materiais encruados a frio, tratamento térmico, temperatura, mudança da microestrutura local, tamanho de grão e dureza (HANSEN, 2004 e MARTIN, 2011).

- Permeabilidade magnética

A capacidade de um material poder se magnetizar é chamada de permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ) e quanto maior é a sua permeabilidade magnética mais fácil de magnetizar o material. Para materiais não ferrosos a permeabilidade magnética é igual ao ar ( $\mu_r = 1$ ) e para materiais ferrosos a permeabilidade magnética pode chegar até uma ordem de grandeza de centenas. Se ocorrer uma variação na intensidade do campo magnético indireto pode apresentar um grande efeito sobre a impedância da bobina, mesmo que a variação seja bem pequena. Normalmente essas variações da impedância da bobina são grandes, em comparação as variações provocadas pela mudança da condutividade ou dimensão, que impossibilita de identificar outras variações. Dessa forma, é mais comum o uso de correntes parasitas em materiais não magnéticos como o aço inoxidável austenítico. Alguns fatores podem alterar a permeabilidade magnética

como composição química, dureza, tensões residuais, defeitos, tratamento térmico (PEREIRA, 2007 e HANSEN, 2004).

- Geometria do material ensaiado e efeito de borda

Um fator importante para análise com correntes parasitas é a espessura do material ensaiado, onde todo o material abaixo de certa espessura irá deixar de ser detectado, pois o campo magnético gerado não consegue percorrer direito toda a espessura, como podemos ver na ilustração da Figura 2.14. Porém um material com uma fina espessura tem o seu campo magnético ultrapassando a espessura deste e nesse caso um aumento na espessura do objeto apareceria na inspeção como se houvesse um aumento na condutividade elétrica do material (HANSEN, 2004 e PEREIRA, 2007).

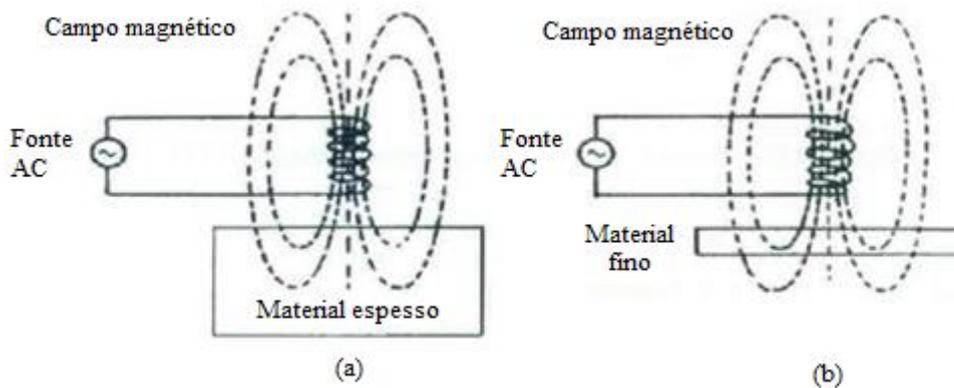


Figura 2. 14: Efeito da espessura do material no ensaio de correntes parasitas. a) material espesso e b) Material fino. Adaptado de (HANSEN, 2004).

Outro efeito importante que influencia na análise com as correntes parasitas é o efeito de borda. Perto de curvaturas, furos e bordas o fluxo das correntes parasitas é alterado, pois o campo magnético primário gerado pela bobina vai estar fora do material e dessa forma a resposta do ensaio foi modificada. Adaptado de (ASM, 2015a).

- Proximidade entre material ensaiado e a bobina (“*lift-off*”)

O termo “*lift-off*” se dá a distância entre a bobina e o material. Essa distância causa uma variação na impedância quando a bobina se aproxima do material. A posição da bobina longe do material, é chamada de “*lift-off*” infinito e sua impedância é a do ar. Ao se aproximar do material ocorre variação da impedância até que a bobina entra em

contato com o material, chamado de “*lift-off*” zero. A variação da impedância em função da distância entre essas duas posições da bobina (longe e no material) gera a curva de “*lift-off*”, sendo importante nos ensaios de correntes parasitas (NDT, 2017). Apesar de ser sensível a algumas variações entre a bobina e o material, informações importantes podem ser mascarados dificultando a realização do ensaio. Mas esse efeito pode ser usado para medir a espessura de um revestimento não condutor (ASM, 2015a e HANSEN, 2004).

### 2.2.5 Saturação magnética parcial (SMP)

A técnica de saturação magnética parcial é uma técnica de inspeção que utiliza o mesmo princípio de funcionamento das correntes parasitas com saturação parcial do material utilizando campo magnético externo DC permitindo uma melhor detecção de pequenas fissuras e pontos de corrosão em superfícies em maiores profundidades de penetração, auxiliando na obtenção de resultados mais precisos e confiáveis e suprime informações magnéticas da superfície do material (INNOSPECTION, 2017 e KASAI, 2010). A configuração básica da sonda com SMP é apresentada na Figura 2.15.

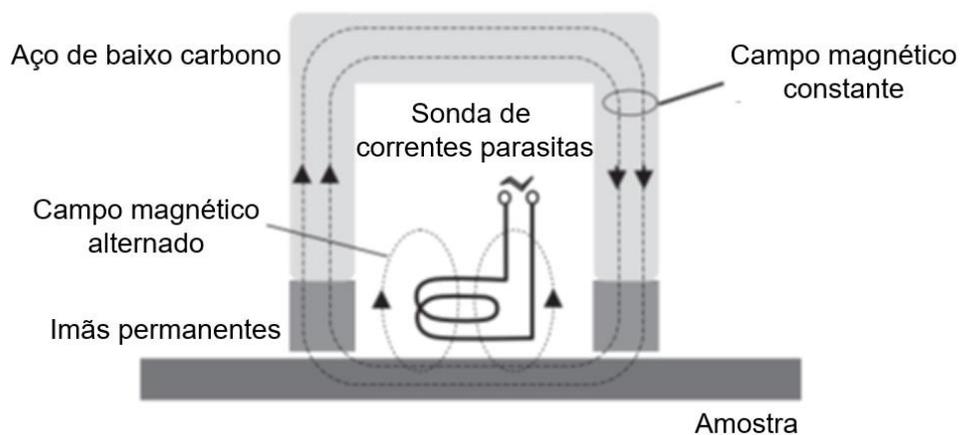


Figura 2. 15: Configuração básica de uma sonda de SMP. Adaptado de (CAMERINI, 2015).

Na Figura 2.16, é possível observar um modelo da resposta de um ensaio com SMP com a presença de dois diferentes tipos de defeitos na borda interna, um local e outro gradual. Para um defeito local as linhas do campo magnético terão maior densidade na espessura da parede remanescente, do que no defeito gradual, mudando a

permeabilidade relativa desta região e conseqüentemente também mudará a resposta da sonda de correntes parasitas (INNOSPECTION, 2017).

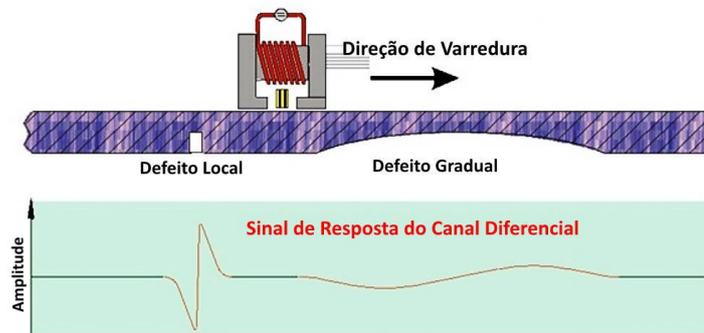


Figura 2. 16: Modelo de resposta de SMP para dois diferentes tipos de defeito. Adaptado de (INNOSPECTION, 2017).

### 2.2.6 Sondas

Em um ensaio de correntes parasitas, as sondas podem possuir diferentes tamanhos, Figura 2.17, sendo usadas para diferentes aplicações dependendo de seu formato. Essas sondas podem ser classificadas como absolutas, diferenciais e reflexivas. Devido ao objetivo deste trabalho, somente as sondas absolutas e diferenciais foram discutidas.



Figura 2. 17: Diferentes tamanhos de sondas de correntes parasitas (EXTENDE, 2017).

As sondas de bobina são os sensores mais utilizados na inspeção de correntes parasitas. Diferentes estruturas de sonda de bobina estão disponíveis para detectar uma grande variedade de trincas. Em geral, as sondas de bobina fornecem alta sensibilidade à fissura quando o fluxo de correntes parasitas é fortemente alterado por descontinuidades.

- Sondas de tipo “*pancake*”

As sondas de tipo “*pancake*” são bobinas cujo eixo é perpendicular à superfície da peça de prova (Figura 2.18). Essas sondas são muito sensíveis ao deslocamento e

inclinação em relação à superfície e ainda podem ter núcleo de ar ou de ferrita. As ferritas possuem alta permeabilidade e a impedância inicial da bobina é maior do que a permeabilidade das bobinas com núcleo de ar. As sondas de tipo panqueca são muito sensíveis ao deslocamento e inclinação em relação à superfície plana (THEODOULIDIS, 2005).

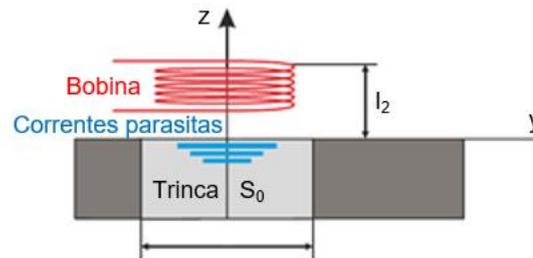


Figura 2. 18: Sonda de bobina de tipo “pancake” e fluxo de correntes parasitas. Adaptado de (SHAO, 2004).

Estes tipos de sensores são usados na inspeção de superfície plana. As correntes parasitas no corpo de prova são circunferências paralelas à superfície como ilustra a Figura 2.18. Quando ocorre uma trinca que penetra pela superfície, o fluxo de corrente é fortemente alterado e a trinca pode ser detectada. As sondas do tipo panqueca não são adequadas para detectar falhas laminares à medida que as correntes fluem paralelamente à superfície e não são fortemente distorcidas (SHAO, 2004).

- Sondas de função dupla e sondas de função separada (“*pick-up*”)

As sondas de função dupla, também chamadas de sondas de reflexão, usam a mesma bobina ou as mesmas bobinas para gerar fluxo das correntes parasitas no corpo de prova e para receber o campo secundário das correntes parasitas. A Figura 2.19 (a) mostra uma sonda de função dupla formada por uma única bobina (LOPES, 2009).

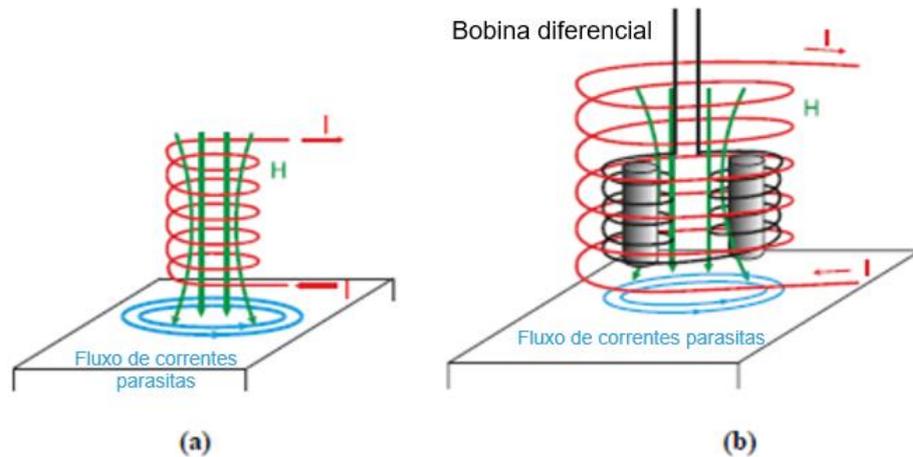


Figura 2. 19: (a) Sonda de bobina única de função dupla. (b) Sonda de função separada diferencial.

Adaptado de (LOPES, 2009).

As sondas de função separada, também chamadas de “*pick-up*”, usam duas bobinas, uma para gerar fluxo de correntes parasitas e outra bobina menor para receber o campo secundário conforme mostra a Figura 2.19 (b). A vantagem das sondas de função separada é que o projeto da bobina pode ser otimizado, podendo ajustara impedância da bobina primária produzindo um campo magnético primário forte e uniforme através de ajustes de parâmetros como o diâmetro da bobina, diâmetro do fio e o número de voltas. Já as bobinas secundárias podem ser projetadas para capturar o campo secundário máximo, minimizando as fontes de ruído e adaptando o tamanho da bobina ao tamanho da trinca (LOPES, 2009).

- Sondas absolutas

As sondas absolutas são constituídas de uma única bobina que geram as correntes parasitas e captam as mudanças no campo das correntes parasitas. Essas sondas permitem obter informações de longas falhas ou variações dimensionais lentas em tubos ou barras e informações sobre grão, dureza e medição de tensão. Na Figura 2.20 podemos ver uma bobina com seu campo magnético gerado. A desvantagem destas sondas de bobina é a sua alta sensibilidade às variações de temperatura (NDT, 2017).

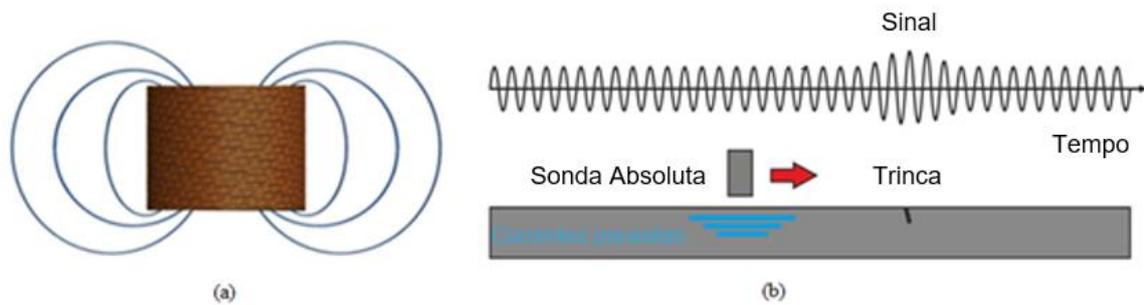


Figura 2. 20: (a) Exemplo de configuração de bobina para sondas absolutas (NDT, 2017) e (b) Sinal absoluto da sonda de bobina circundante absoluta não compensada quando uma barra quebrada é testada. Adaptado de (MARTIN, 2011).

- Sonda Diferencial

Para a detecção de trincas bem pequenas, as sondas diferenciais são mais vantajosas por possuírem duas bobinas acopladas, normalmente enroladas em direções opostas, que varrem áreas diferentes do material ensaiado. Se as duas bobinas estão sobre uma área de mesmo material sem defeito, o sinal entre elas é igual, mas se uma bobina estiver sobre um defeito e a outra não, foi formada um sinal diferenciado. Na Figura 2.21 podem-se visualizar os sinais gerados pela sonda diferencial nas três situações citadas (MARTIN, 2011).

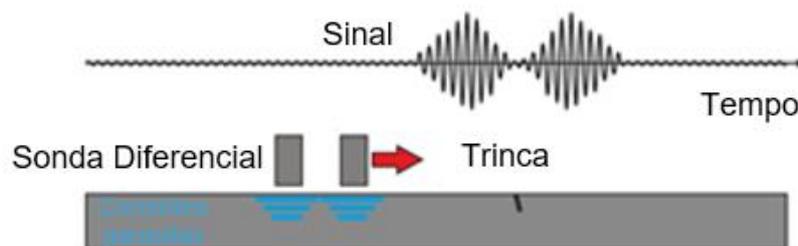


Figura 2. 21: Ilustração de sinais gerados por uma sonda diferencial. Adaptado de (MARTIN, 2011).

Outras vantagens desse tipo de sonda são: sensibilidade aos defeitos e relativamente insensível a pequenas variações de propriedades como variações de temperatura, variações pequenas de dimensão, redução das oscilações do sinal de “*lift-off*” da sonda. Uma desvantagem é se o defeito é maior do que o espaçamento entre as

duas bobinas, pois somente as bordas foram detectadas. Isso ocorre devido ao cancelamento dos sinais quando as duas bobinas estão sobre a trinca (NDT, 2017 e MARTIN, 2011).

De forma geral, este tipo de sonda vem sendo não apenas utilizado para detecção de trincas, mas também aperfeiçoadas. Alguns autores aperfeiçoaram, variáveis sondas de bobina diferencial em termos de sensibilidade à detecção de trinca. Foi proposto por (XU, 2010) um novo sensor diferencial composto por bobinas de enrolamento de duplo gradiente e foi usado por (BAE, 2001) uma sonda diferencial em materiais aquecidos.

- Sonda híbrida: “*Giant Magneto Resistance*” (GMR)

O princípio básico do magneto resistência (MR) é a variação da resistividade de um material ou de uma estrutura em função de um campo magnético externo. Pode ser encontrado em semicondutores clássicos e, em particular, em semicondutores magnéticos (REIG, 2013).

O magneto resistência gigante (GMR) é um efeito de magneto resistência mecânica quântica observado em multicamadas constituídas por camadas condutoras alternadas ferromagnéticas e não magnéticas. O efeito é observado como uma alteração significativa na resistência elétrica dependendo se a magnetização de camadas ferromagnéticas adjacentes está em um alinhamento paralelo ou antiparalelo. A resistência global é relativamente baixa para o alinhamento paralelo e relativamente alto para o alinhamento antiparalelo (REIG, 2013).

A principal aplicação do GMR são os sensores de campo magnético, que são utilizados para ler dados em unidades de disco rígido, biosensores, sistemas microelectromecânicos (MEMS) e outros dispositivos (REIG, 2013). As estruturas multicamadas GMR também são usadas na memória de acesso aleatório magneto resistivo (MRAM) como células que armazenam um pouco de informação.

Em 1988, (BAIBICH, 1988) e (BINASCH, 1989), relataram pela primeira vez o que eles chamaram de magnetorresistência gigante (do inglês *Giant Magneto Resistance*) medida em multicamadas finas Fe/Cr. Eles demonstraram que a corrente elétrica em uma multicamada magnética constituída por uma sequência de finas camadas magnéticas separadas por camadas metálicas não magnéticas igualmente finas é fortemente influenciada pela orientação relativa das magnetizações das camadas

magnéticas. A causa dessa gigante variação da resistência é atribuída à dispersão dos elétrons nas interfaces de camadas.

- Comparação de diferentes estruturas de sonda e sensores magnéticos

Existem alguns parâmetros, incluindo o alcance do campo magnético, a banda de frequência de operação e as dimensões do sensor que permitem a seleção do tipo de sensor mais adequado para testes de correntes parasitas para um determinado material a ser analisado (YAMADA, 2006). As bobinas também podem ser acopladas com sensores magneto resistivos, sensores de efeito-hall e SQUID, por exemplo. Os sensores não foram discutidos em detalhes por não fazerem parte do objetivo deste trabalho.

As vantagens de usar bobinas como sensores para a correntes parasitas são a simplicidade de sua construção, a enorme faixa dinâmica, a possibilidade de focar o sensor (HAAN, 2006) e fornecem alta sensibilidade aos defeitos quando o tamanho do defeito é comparável ao transdutor da bobina (GRIMBERG, 2000). Algumas desvantagens são a alta tensão de indução no início do sinal e o fato de serem difíceis de diminuir (HAAN, 2006).

Os sensores magneto resistivos podem ser usados em vez de bobinas, mas precisam de um coeficiente de temperatura bem alto (RASSON, 2006). Os sensores Hall são sensores de campo magnético cujo alcance dinâmico não é suficientemente grande para algumas aplicações e possuem alto nível de ruído (HAAN, 2006). Os SQUIDS são difíceis, caros e precisam de refrigeração com criogenia para diminuir níveis de ruídos (HAAN, 2006), embora forneçam ruídos de campo muito baixos em comparação às bobinas de indução.

Alguns trabalhos com diferentes sondas foram organizados na Tabelas 2.2 ressaltando os parâmetros de maior importância utilizados durante inspeção. O intuito da construção desta tabela não se dá no aprofundamento de cada um dos trabalhos apresentados, mas sim para caracterizar os parâmetros para a utilização das correntes parasitas na detecção de defeitos. Na Figura 2.22, observa-se um esquema geométrico da localização dos parâmetros utilizados na Tabela 2.2, onde:

$B^{(p)}$  – Campo magnético primário;

$B^{(s)}$  – Campo magnético secundário;

J – Distribuição das correntes parasitas;

$h$  – Distância do “*lift-off*”;

$d$  – Profundidade;

$X_d$  – Largura do defeito;

$Y_d$  – Comprimento do defeito;

$Z_d$  – Altura do defeito.

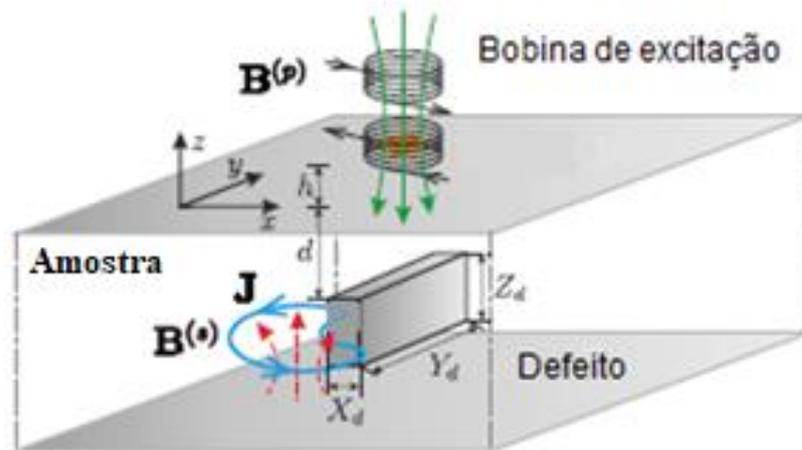


Figura 2. 22: Esquema das dimensões geométricas da trinca detectada ( $X_d$ ,  $Y_d$  e  $Z_d$ ) e sua profundidade ( $d$ ) utilizada na Tabela 3.3. Adaptado de (WEISE, 2016).

Tabela 2. 2: Estudos sobre correntes parasitas usando diferentes sensores de campo magnético para detecção de trincas na subsuperfície. Extraído e adaptado de (WEISE, 2016; MOOK, 2006; ALMEIDA, 2013; CARLSTEDT, 2014; DOGARU, 2001; SIKORA, 2003; TSUKADA, 2006; YAMADA, 2006; WINCHESKI, 2010; HAMIA, 2010; CACCIOLA, 2010; ROSELL, 2012; LU, 2012; BOHACOVA, 2013; KIM, 2012 e DIRAISON, 2009)

<i>Autor</i>	<i>Ano</i>	<i>Freq.</i>	<i>Xd (mm)</i>	<i>Yd (mm)</i>	<i>Zd (mm)</i>	<i>d (mm)</i>	<i>Núcleo</i>
<b>Pick-up</b>							
Mook	2006	350 Hz	3	100	3	8,5	Ar
		100 Hz	<0,1	>100 <sup>i</sup>	25	22,5	Ar
		50 Hz	<0,1	>100 <sup>i</sup>	25	28,8	Ar
Almeida	2013	100 kHz	2 – 3 <sup>?</sup>	2 – 3 <sup>?</sup>	7	3	Ar
Carlstedt	2014	100 Hz	12	2	2	6	Ar
<b>Sensor GMR</b>							
Dogaru	2001	1,5 kHz	15	0,5	2	1,5	Ar
Sikora	2003	10 – 120 Hz	0,5	>50 <sup>?</sup>	4	16	Ar
Tsukada	2006	50 Hz	1	25	1	6	Ar
Yamada	2006	50 Hz	1	25	1	8/14*	Ar
Wincheski	2010	185 Hz	0,13	14	1	9	Ar
Hamia	2010	325 Hz	0,5	50	2	8	Ar
Cacciola	2010	60 kHz	2	2	4	4	Ar
<b>Convencional</b>							
Rosell	2012	900 Hz	0,28	12,6	5	3,04	Ar
Lu	2012	100 Hz a 10 kHz	-	-	-	5*	Ar e ferrita
Bohacova	2013	450 Hz	-	-	-	4	Ar
<b>Diferencial</b>							
Kim	2012	300 kHz	0,15	2 a 8	-	3	Ar
Diraison	2009	200 Hz a 4 kHz	0,5	2 a 10	2	7,7	Ar

? aproximado; valor explicito não fornecido.

\* profundidade de detecção máxima da trinca para amostras sólidas e em camadas respectivamente.

<sup>i</sup> a trinca foi considerada muito longa e se estende através de toda a amostra; o valor não foi fornecido.

O grande desafio da utilização das correntes parasitas para a detecção de defeitos é o atrelamento entre a frequência utilizada e o campo de atenuação da profundidade das correntes parasitas. A Tabela 2.2 mostra, de forma ilustrativa, não apenas uma visão geral da limitação da detecção de defeitos sub-superficiais por correntes parasitas, mas também diferentes tipos de sondas utilizadas e materiais submetidos aos ensaios.

Ao comparar os diferentes trabalhos relatados na Tabela 2.2, observa-se que de forma geral a detecção de defeitos mais profundos está relacionada a frequências mais baixas, porém os materiais onde estão localizados os defeitos são, em maioria, alumínio onde a grande eficácia e penetração das correntes parasitas já é conhecida. Entretanto, percebe-se que em grande maioria são utilizadas não apenas sondas convencionais de correntes parasitas, mas sim estas sondas junto a sensores magnéticos. Sondas junto a sensores magnéticos para detecção de trincas são, de forma geral, de delicada operação. Este trabalho propõe-se a desenvolver uma sonda baseada em sondas convencionais de correntes parasitas, de modo a atender sua aplicação em campo.

## **2.3 Caracterização magnética e microestrutural**

### **2.3.1 Magnetômetro de amostra vibrante**

Magnetômetro de amostra vibrante (VSM) é uma técnica de medida magnética usada para medir a magnetização do material para um determinado valor de campo magnético aplicado. Essa técnica é comumente utilizada em laboratório por causa de sua simplicidade e sensibilidade permitindo a obtenção das curvas de magnetização  $B \times H$ , permitindo entender corretamente o comportamento magnético de um material e a reprodução destas propriedades em trabalhos de simulação (FONER, 1959).

O magnetômetro é constituído por duas bobinas de cobre, onde é passada corrente elétrica de modo a gerar um campo magnético na região. A amostra se localiza no centro deste campo magnético presa em uma haste vibratória, por sua vez, a amostra gera um campo induzido que é detectado por um sensor. Dessa forma é possível obter o momento magnético de um determinado valor de campo aplicado sobre a amostra (FONER, 1959)

Na Figura 2.23 apresenta o esquema do VSM e seus principais componentes de funcionamento.

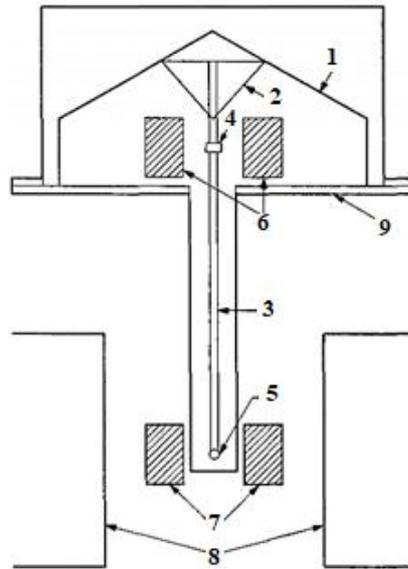


Figura 2. 23: Esquema de um VSM. 1) Transdutor lineal; 2) Suporte; 3) Canudo; 4) Amostra de referência; 5) Amostra; 6) Bobinas de referência.;7) Bobinas; 8) Pólos magnéticos; 9) Caixa metálica.

Adaptado de (FONER, 1959).

### 2.3.2 Ferrofluido

O ferrofluido utilizado, para a caracterização magnética das camadas próximas a superfície externa das amostras, trata-se de uma solução coloidal de partículas superparamagnéticas com diâmetro de cerca de 10 nm. Estas partículas são capazes de interagir com ínfimos campos magnéticos, sendo então atraídas por estes campos sem exercer nenhuma influência sobre a informação magnética da amostra.

Estas partículas são na verdade partículas de magnetita, que por sua vez é magnética. Entretanto, materiais com dimensões extremamente reduzidas, como no caso destas nanopartículas magnéticas, o volume total da partícula corresponde a um único domínio magnético sendo por isso denominado monodomínio magnético. Assim, cada átomo de uma partícula faz parte de um arranjo magneticamente ordenado com os momentos magnéticos alinhados em uma única direção espacial. Devido a isto, estas partículas assumem a propriedade chamada de superparamagnetismo (CARDOSO, 2011).

Devido ao superparamagnetismo, a forma pela qual um sólido composto por um grande número de momentos magnéticos reduz a energia magnética no espaço em torno do material é formar domínios magnéticos nas direções de fácil magnetização, de modo que a soma dos momentos dos domínios seja essencialmente zero. Embora dois

domínios vizinhos tenham orientações diferentes, os momentos magnéticos em cada domínio são paralelos por causa da interação de troca. Desta forma, partículas superparamagnéticas conseguem reagir a uma informação magnética, sem que esta informação seja modificada ou influenciada.

A disputa entre a energia de troca e a energia de anisotropia magnetocristalina irá determinar a espessura das regiões de transição entre os domínios, ou seja, as paredes de Bloch. Se o tamanho das partículas é menor ou da mesma ordem que a espessura das paredes de Bloch, a configuração energeticamente mais favorável é um arranjo no qual todos os momentos magnéticos da amostra estão paralelos, conhecido como monodomínio, como pode ser visto na Figura 2.24 (CARDOSO. 2011).

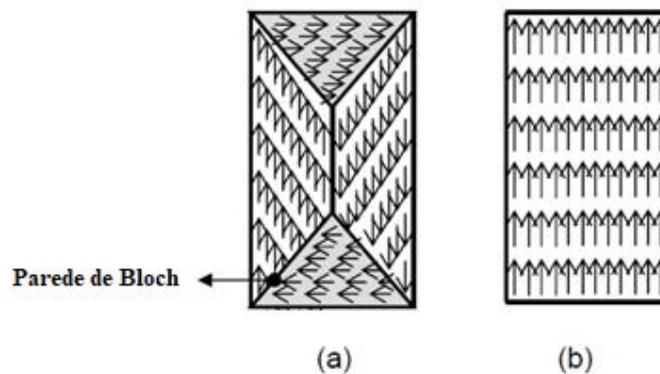


Figura 2. 24: Ilustração de (a) uma região que contém vários domínios e (b) uma região que contém um único domínio. Adaptado de (SILVA, 2015).

Em 1949, Louis Néel (SMART, 1995) mostrou que partículas magnéticas extremamente pequenas podem apresentar um estado magnético peculiar. Este estado, chamado mais tarde de superparamagnetismo, pode ser descrito de modo bastante simples. Uma partícula com monodomínio está magnetizada uniformemente, com todos os momentos magnéticos paralelos. A energia de anisotropia necessária para manter o momento magnético alinhado em uma determinada direção é expressa pela equação:

$$E(\theta) = EB.f(\theta) \qquad \text{Equação 6}$$

Sendo EB a barreira de energia que separa duas direções de fácil magnetização e f(θ) uma função do ângulo entre os eixos de anisotropia e magnetização.

No caso de partículas de dimensões nanométricas, essa energia é relativamente pequena e pode ser comparável à energia térmica, dada por:

$$E_T = K_B \cdot T_a \quad \text{Equação 7}$$

Sendo  $K_B$  a constante de Boltzman e  $T_a$  a temperatura absoluta.

Para partículas de dimensões nanométricas, o momento magnético da partícula como um todo sofre os efeitos da agitação térmica. O efeito dessa agitação sobre as propriedades magnéticas da partícula depende do tempo de medida. Se o tempo característico de uma medida é muito maior que o tempo de relaxação do sistema, que é função da temperatura e do volume das partículas, o sistema se encontra no estado superparamagnético, logo a agitação térmica faz com que os momentos magnéticos não tenham uma orientação preferencial. Porém o tempo da medida é muito menor que o tempo de relaxação, os momentos magnéticos das partículas se mantêm paralelos durante o período de observação. A temperatura que separa os dois regimes é chamada de temperatura crítica de desbloqueio (GRIJALBA, 2010).

## **2.4 Simulação computacional de correntes parasitas**

Este trabalho utilizará a simulação computacional pelo método de elementos finitos em sondas de correntes parasitas, visando não apenas seu aperfeiçoamento, mas também o levantamento de parâmetros em geral para melhor se detectar e monitorar trincas de fluência em tubos de aços austeníticos HP modificados ao nióbio.

Para a simulação de correntes parasitas é de fundamental importância o cálculo do vetor potencial magnético, pois a partir do seu valor é possível a obtenção de outras grandezas eletromagnéticas como: densidade de fluxo magnético, impedância da bobina e etc. O método de cálculo mais comum em simuladores de correntes parasitas é o método dos elementos finitos (MEF). Este é um método de análise de modelos matemáticos que representam problemas físicos. Esta modelagem matemática é normalmente feita através de equações diferenciais com as suas respectivas condições de contorno. O método para a resolução das equações diferenciais consiste na divisão do domínio de integração em um número finito de pequenas regiões, denominadas de ‘elementos finitos’. Essa divisão do domínio se dá o nome de malha ou do inglês “*mesh*”. A partir desta divisão, ao invés de buscar uma função que satisfaça as

condições para todo o domínio, essas funções devem ser definidas em cada elemento (SILVA, 2007 e RIBEIRO, 2004)

Os fenômenos eletromagnéticos são descritos pelas equações de Maxwell. Estas equações envolvem cinco grandezas vetoriais, dependentes da posição e do tempo, sendo elas: campo elétrico  $\vec{E}$ , campo magnético  $\vec{H}$ , densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$ , densidade de fluxo elétrico  $\vec{D}$  e densidade de corrente  $\vec{J}$  (COSTA, 1995 e SILVA, 2007). Através destas equações, os softwares de simulação computacional resolvem, por meio de elementos finitos, os modelos construídos, que neste trabalho foram para a visualização da penetração das correntes parasitas de diferentes sondas nas amostras estudadas. De modo geral, a simulação computacional mostra-se como uma eficaz ferramenta para o projeto de construção das sondas a serem realizadas neste trabalho.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Dado o objetivo deste trabalho de detectar trincas de fluência em diferentes amostras dos tubos de aço austenítico HP retirados dos fornos de reforma a vapor, foi estudada a aplicabilidade das técnicas não destrutivas de inspeção por correntes parasitas.

O trabalho de (FIRTH, 2013), *“Reformer Component Management After an Overheating Incident that Resulted in Tube Failures”*, deixa claro que a detecção de trincas nesta classe de material é um grande desafio, pois há duas respostas ao ensaio de correntes parasitas, sendo uma delas a resposta relacionada aos defeitos e a outra relacionado a variação microestrutural, sendo a separação destes sinais uma grande complexidade.

Desta forma, o estudo foi baseado no desenvolvimento experimental de sondas de correntes parasitas, de modo a aperfeiçoar não apenas sua sensibilidade, mas também sua profundidade de penetração nos materiais de estudo. Dado este objetivo fez-se com que estas sondas possam não apenas ser aplicadas em escala laboratorial, mas também em campo. Portanto, é imprescindível o desenvolvimento de sondas de simples manuseio e robustas, porém com alta eficiência.

#### 3.1 Material

Foram analisados tubos de aço inoxidável austeníticos de grau HP modificado ao nióbio, fundido por centrifugação, retirados de serviço de uma mesma unidade de refino. Os critérios de escolha das amostras foram a composição química em função do teor de Nb, tempo de operação de 100.000 a 140.000 h e altura da coluna, a fim de abranger dois diferentes estados de envelhecimento microestrutural das amostras, sendo a primeira uma amostra representativa do estado de envelhecimento I do aço austenítico HP e a segunda uma amostra representativa deste aço após sofrer um surto de temperatura (aumento inesperado e abrupto de temperatura por um período de tempo) juntamente com a formação de trincas de fluência. As amostras foram denominadas segundo seus estados de envelhecimento ou condição e fabricante, sendo então denominada amostra HP-I-A a amostra com envelhecimento I e fabricada por “A”, amostra a qual foi introduzido entalhes. Foi também analisada uma amostra com trinca de fluência formada durante serviço, sendo esta amostra denominada HP-S-B, ou seja, a

amostra após sofrer surto de temperatura e fabricada por “B”. A Tabela 3.1 mostra o tempo de operação dos tubos recebidos, seu diâmetro externo e sua espessura.

Tabela 3. 1: Tempo de operação, diâmetro externo e espessura das amostras recebidas dos fornos de reforma.

<b>Tubo</b>	<b>Tempo de Operação (horas)</b>	<b>Diâmetro externo nominal (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>
HP-I-A	107.000	128,0	11,2
HP-S-B	138.000	112,7	10,7

A composição química de cada tubo foi determinada através de técnicas de fluorescência de raios-X e de espectroscopia de plasma no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), e são apresentadas na Tabela 3.2. Os tubos se caracterizam por apresentar diferentes teores de Nb, de forma geral.

Tabela 3. 2: Composição química das amostras estudadas (% em peso).

<b>Tubo</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>C</b>	<b>Nb</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>W</b>
HP-I-A	34,0	26,1	0,44	0,92	1,34	0,85	0,13
HP-S-B	33,8	26,9	0,44	0,74	1,23	0,94	0,05

Um seguimento de cada tubo foi retirado, sendo suas localizações em alturas estratégicas onde ficaram expostos a uma faixa de temperatura, apresentando tanto o estado de envelhecimento I quanto a amostra submetida a surto de temperatura e posterior envelhecimento, conforme esquematizado na Figura 3.1. Foi utilizado o critério de estado de envelhecimento determinado por (QUEIROZ, 2017).

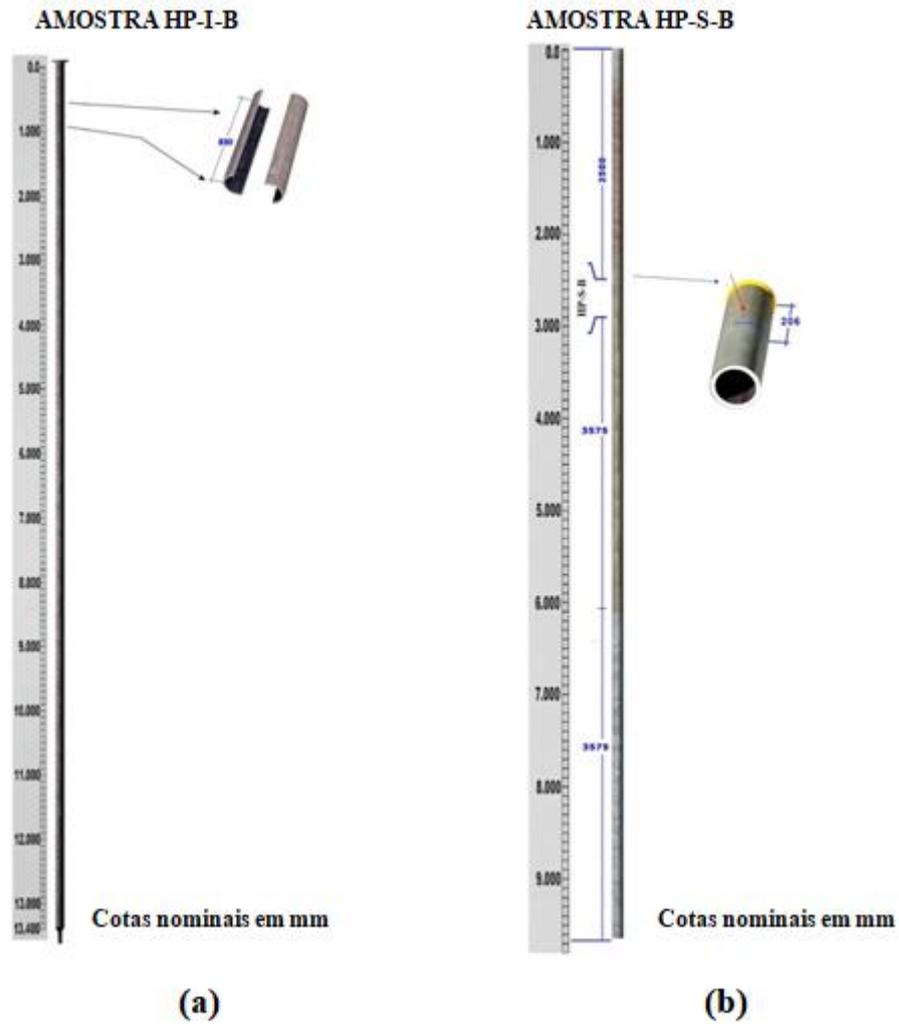


Figura 3. 1: Esquema de retirada das amostras, sendo (a) a amostra HP-I-A e (b) a amostra HP-S-B. Eixo vertical representa a altura de retirada das amostras em milímetros.

Em cada uma das amostras, foi cortado um anel com aproximadamente 20 mm de altura, de onde inicialmente foi retirada uma amostra para a caracterização metalográfica do material utilizando microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), Figura 3.2.



Figura 3. 2: Anel de onde foram retiradas as amostras para caracterização.

Foram usinados oito entalhes de mesmo comprimento e largura, porém com diferentes profundidades, distribuídos uniformemente ao longo do comprimento da amostra HP-I-A, previamente cortada em duas meias-canas detectar defeitos que possam a vir configurar estágios de dano nesta classe de material,. Estes entalhes foram introduzidos na região interna da meia cana, a fim de simular estágios avançados de trincas de fluência. Estes entalhes foram realizados por uma empresa terceirizada de cortes por eletro-erosão (EDM – Eletric Discharge Machining). Um desenho esquemático do corpo de prova pode ser visto na Figura 3.3, a discriminação das dimensões dos entalhes pode ser observada na Tabela 3.3.

Tabela 3. 3: Comprimento, largura e profundidade dos entalhes distribuídos uniformemente ao longo do corpo de prova.

<b>ENTALHE</b>	<b>DIMENSÃO (C × L × P) (mm)</b>
E1	40 × 0,5 × 0,5
E2	40 × 0,5 × 1,0
E3	40 × 0,5 × 1,5
E4	40 × 0,5 × 2,0
E5	40 × 0,5 × 3,0
E6	40 × 0,5 × 4,0
E7	40 × 0,5 × 6,0
E8	40 × 0,5 × 8,0

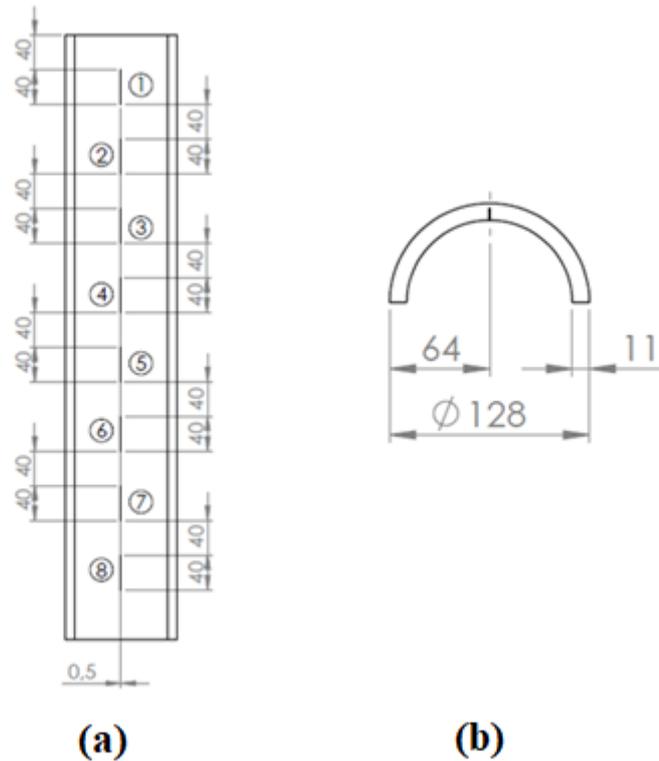


Figura 3. 3: (a) Desenho do corpo de prova HP-I-A com a distribuição dos oito entalhes ao longo de seu comprimento. (b) Vista frontal.

### 3.2 Preparação metalográfica e caracterização microestrutural

#### 3.2.1 Preparação metalográfica

As amostras para a caracterização microestrutural foram cortadas e em seguida cada corpo de prova foi embutido em resina condutora, facilitando, desta forma, as consequentes etapas de preparação e evitando problemas quanto ao escoamento eletrônico no MEV. Após o embutimento, os corpos de prova foram lixados utilizando-se lixas de granulometria a partir de #120 $\mu\text{m}$  até #1500 $\mu\text{m}$ . Posteriormente, foram polidos utilizando partículas de alumina de 3 $\mu\text{m}$  e 1 $\mu\text{m}$  em meio líquido e os respectivos panos de polimento DAC 3 $\mu\text{m}$  e NAP 1 $\mu\text{m}$ , fabricados pela empresa Struers, obtendo uma superfície espelhada. Para revelação microestrutural com bom contraste, foi utilizado o ataque químico por imersão em água régia, sendo a amostra imersa em água régia (10 ml de  $\text{HNO}_3$ , 20 ml de  $\text{HCl}$  e 60 ml de  $\text{H}_2\text{O}$ ) saturada com  $\text{Cl}_2\text{Cu}$  durante 30 segundos.

### 3.2.2 Microscopia óptica

Foi utilizado o microscópio ótico confocal modelo Axio CSM 700 da empresa Zeiss para a caracterização da microestrutura das amostras com diferentes estágios de envelhecimento. Foram construídos mosaicos ao longo de toda a extensão das paredes externas das amostras, pois estas são regiões de interesse e suas propriedades podem influenciar diretamente nos mecanismos físicos da metodologia de inspeção aplicada (SILVEIRA, 2017).

### 3.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

A transformação microestrutural dos diferentes estados de envelhecimento e do óxido formado ao longo da parede externa do material foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura pelo VEGA3 da empresa TESCAN, sem ataque e com elétrons retroespalhados. Foi, também, realizada a caracterização microestrutural da secção transversal da amostra, com especial ênfase na microestrutura próxima a parede externa das amostras.

### 3.2.4 Informação magnética microestrutural

Para a caracterização da informação magnética das diferentes microestruturas presentes nos materiais a serem analisados, foi utilizada a técnica Bitter modificada (SILVA, 2015). Esta técnica utilizará o ferrofluido, comprado da empresa FERROTEC, junto à microscopia ótica para a revelação da informação magnética microestrutural, esta, que por sua vez, pode vir a influenciar na técnica de detecção de trincas proposta neste trabalho. As partículas superparamagnéticas constituintes do ferrofluido irão se direcionar e se depositar sobre as fases da microestrutura que possuam informações magnéticas revelando assim uma micrografia da informação magnética microestrutural das amostras.

## **3.3 Magnetômetro de amostra vibrante – VSM**

Foram levantadas as propriedades magnéticas das amostras pelo VSM a fim de compreender a natureza macroscópica das informações magnéticas, como magnetização de saturação e permeabilidade magnética do material, para serem utilizadas não apenas como parâmetros para a simulação computacional, mas também para estimar a profundidade de penetração das correntes parasitas. Para tal, foram obtidas as curvas de

magnetização de cada amostra utilizando o VSM. A Figura 3.4, adaptado de (CORREA, 2013) mostra a disposição da amostra durante o ensaio. Em suma, com esta técnica é possível avaliara de forma qualitativa o comportamento magnético do material em diferentes regiões (centro de parede, parede externa).

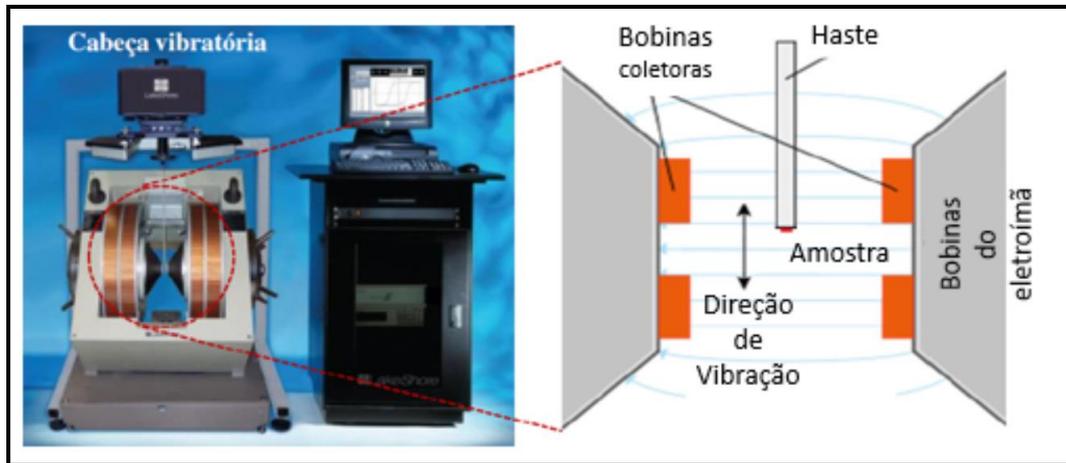


Figura 3. 4: Ilustração do equipamento VSM e disposição da amostra no mesmo. Adaptado de (CORREA, 2013).

O equipamento utilizado para realização das medidas é o fabricado pela empresa LakeShore® modelo EM4 – HVA. Através da aplicação de um campo magnético (H) que varia entre 0 e 17000 Gauss, foram obtidos os valores do campo magnético induzido (B) e as medidas de magnetização (M). Cabe ainda ressaltar que as amostras para este ensaio foram cortadas no formato de prisma ortogonal de base quadrada com dimensões de 1,0x1,0x6,0mm, aproximadamente, para garantir a resposta magnética da superfície externa do material (STEVENS, 2001).

### 3.4 Simulação computacional

Neste trabalho, foi utilizado o software de simulação computacional OPERA-3D no módulo 3D/ELEKTRA. O intuito da abordagem computacional se dá apenas no levantamento de parâmetros que não apenas irão orientar na fabricação de sensores mais apropriados para a solução do problema em questão, mas também indicaram os melhores parâmetros durante a inspeção. O software foi alimentado com dados provindos do VSM e de análises previamente reportadas na literatura (CORREA, 2013).

De modo geral, o principal objetivo da simulação computacional foi a tentativa de se realizar uma análise qualitativa dos principais parâmetros que compõem uma sonda de correntes parasitas (geometria do núcleo e da bobina, densidade de corrente aplicada, propriedades metalúrgicas do núcleo, frequência de operação dentre outros fatores), para que a partir desta avaliação, seja possível definir parâmetros ideais para a sua construção.

A princípio foi adaptada uma rotina já existente, utilizando seus parâmetros para esta classe de material e aplicando as dimensões geométricas das sondas desenvolvidas neste trabalho, do software OPERA-3D feita por (CORREA, 2013) para simular a profundidade de penetração de duas sondas absolutas com diferentes características entre si. Desta forma, saber-se-á previamente os resultados a serem esperados.

### 3.5 Correntes parasitas

O equipamento comercial que foi utilizado para o ensaio de correntes parasitas é o *OmniScan MX ECA –Olympus*, o qual apresenta diversas funcionalidades para o usuário, devido a sua interface intuitiva, podendo-se utilizar tanto em laboratório quanto em campo. Uma grande vantagem deste aparelho é sua fácil adaptação às sondas desenvolvidas em laboratório, haja vista que aceita como entrada conexões do tipo BNC. Sua faixa de frequência de operação é de 20Hz – 20MHz e para a calibração do *OmniScan* utiliza-se um bloco de calibração com oito materiais diferentes, como pode ser observado na Figura 3.5 adaptado de (CORREA, 2013).

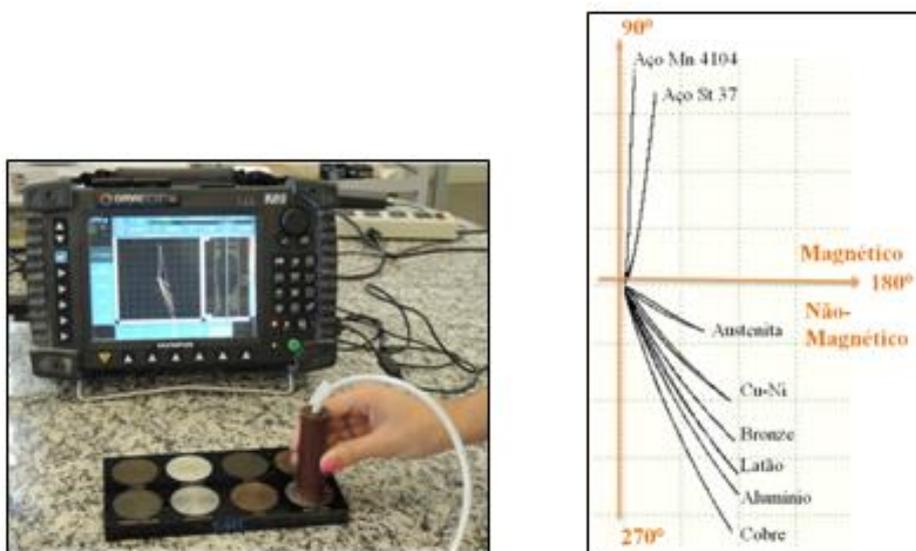


Figura 3. 5: Processo de calibração do OmniScan. Adaptado de (CORREA, 2013).

### 3.5.1 Sondas absolutas de correntes parasitas

Foram construídas sondas segundo a simulação computacional e revisão da literatura (MORAES, 2016). Inicialmente, foi reproduzida a sonda absoluta desenvolvida por MORAES, onde foi impresso um carretel com dimensão de 26mm de diâmetro e 8,3mm de altura. Este carretel foi enrolado com 1200 voltas de fio de cobre AWG 36 e posteriormente foi conectado um cabo BNC nas duas extremidades da bobina, então já enrolada. Após as conexões serem feitas, foi impresso um suporte para a bobina que em seguida foi encapsulada, formando assim, a sonda denominada de ST1. A Figura 3.6 mostra maiores detalhes das dimensões do carretel onde foi enrolado o fio de cobre, enquanto a Figura 3.7 mostra uma representação esquemática do processo de construção e montagem do sensor ST1. Os parâmetros utilizados por (MORAES, 2016) podem ser observados na Tabela 3.4:

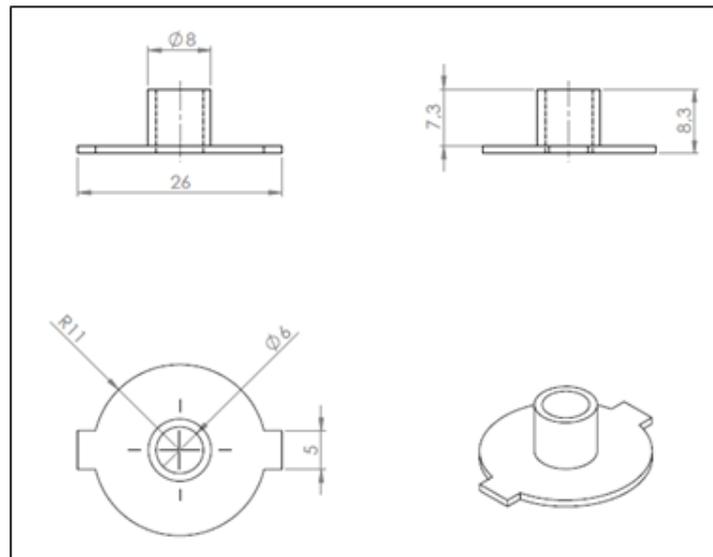


Figura 3. 6: Desenho com cotas do carretel onde foi enrolada a bobina de cobre.

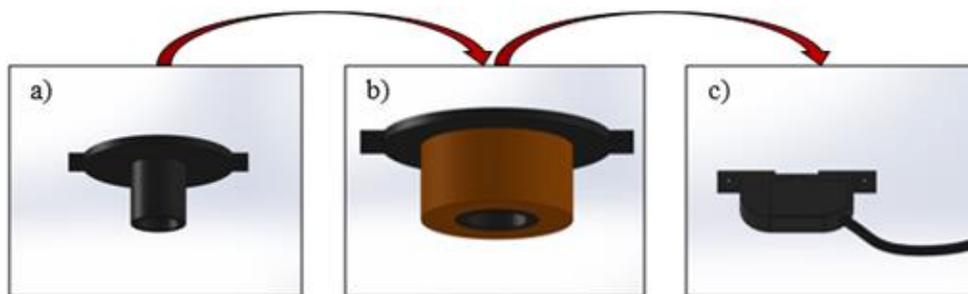


Figura 3. 7: (a) Carretel impresso. (b) Carretel enrolado com 1200 voltas de fio de cobre AWG36, formando a bobina. (c) Protótipo de sonda absoluta para realização dos testes.

:

Tabela 3. 4: Parâmetros utilizados por (MORAES, 2016).

	Correntes Parasitas	Correntes Parasitas com SMP
Parâmetro	Valor	Valor
Frequência (kHz)	2	2
Amplitude (V)	4	4
Ganho Horizontal (V)	45	45
Rotação (°)	215	215
Ganho Vertical (V)	10	10

A partir dos resultados obtidos da aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho junto a calibração feita por (MORAES, 2016), será proposta uma nova calibração que possui o objetivo de anular a componente resistiva, ou seja, a resposta no plano de impedância do *lift-off* se dará apenas no eixo vertical, reatância indutiva ( $X_L$ ). Desta forma, os efeitos prejudiciais do *lift-off* são minimizados e a resposta aos defeitos se dará de forma mais notável nas variações da amplitude do sinal. Esta calibração foi referida neste texto como calibração proposta, sendo especificada no item 4.4.2.

### 3.5.2 Aprimoramento das sondas absolutas de correntes parasitas

Baseado nos resultados do item 3.5.1 desenvolveu-se um aprimoramento na geometria da sonda almejando uma melhor detecção dos entalhes. Este aprimoramento consistiu em manter a mesma indutância da sonda ST1, porém aperfeiçoou-se o projeto da sonda almejando a maior concentração do campo induzido. Para tal, foi construída uma sonda absoluta através da impressão de um carretel com dimensão de 19,2mm de

diâmetro e 9,4mm de altura. Este carretel foi enrolado com 1985 voltas de fio de cobre AWG 40 e posteriormente foi conectado um cabo BNC nas duas extremidades da bobina, então já enrolada. Após as conexões serem feitas, foi impresso um suporte para a bobina que foi então encapsulada, formando assim, o sensor que foi denominado de ST2. A Figura 3.8 mostra maiores detalhes das dimensões do carretel onde foi enrolado o fio de cobre, enquanto o processo de montagem é o mesmo apresentado, esquematicamente, na Figura 3.7.

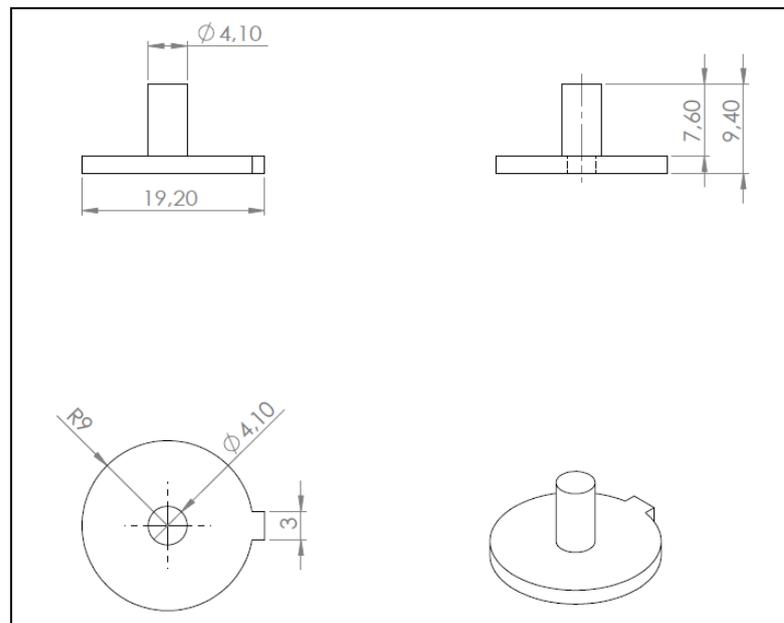


Figura 3. 8: Desenho com cotas do carretel da sonda ST2 onde foi enrolada a bobina de cobre.

### 3.5.3 Correntes parasitas com saturação magnética parcial

As sondas absolutas de correntes parasitas desenvolvidas foram testadas utilizando-se uma magnetização externa de modo a saturar magneticamente a superfície da amostra. Desta forma, permite-se evitar qualquer influência magnética que possa provir, por exemplo, da camada de óxido presente ao longo de toda superfície externa do tubo. Para tal foi utilizado um “yoke” com ímãs permanentes de 440mT e dimensão retangular de 20x6x6 mm, como pode ser observado no esquema da Figura 3.9.

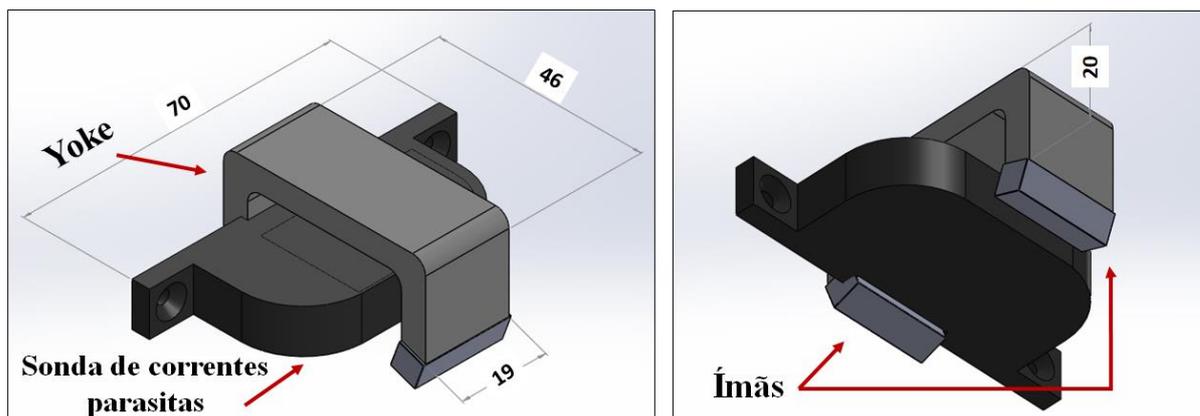


Figura 3. 9: Desenho esquemático do sistema de saturação magnética parcial com cotas em milímetros.  
Sonda, “yoke” e ímãs

### 3.5.4 Metodologia de ensaio

A metodologia de ensaio realizada segue os procedimentos a baixo, sendo realizado sempre através da parede externa das amostras.

I – Mapa de resposta magnética: Foi traçado um mapeamento das amostras, de modo a identificar a variação da resposta das correntes parasitas ao longo de toda sua extensão. Para tal, o sensor foi calibrado no ar e irão ser adquiridas as respostas de amplitude e de fase das correntes parasitas nas regiões mapeadas ao longo da amostra. Um esquema da metodologia “I” pode ser observado na Figura 3.10.

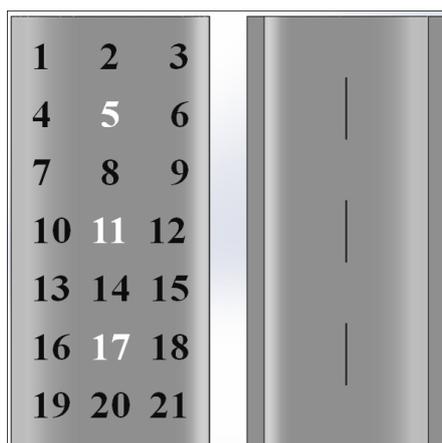


Figura 3. 10: Esquema de mapeamento das amostras para realizar o mapa de resposta magnética. Cada número representa três medidas de amplitude e fase a serem adquiridas.

A partir do procedimento I pode-se filtrar os dados de modo a gerar dois outros sub-procedimentos, sendo eles a aquisição de informações no sentido longitudinal e transversal à amostra. Estes sub-procedimentos foram denominados de IA e IB, sendo equivalentes aos ensaios:

IA – Inspeção longitudinal ponto a ponto: Uma vez a sonda calibrada no ar, adquire-se, ao longo do sentido longitudinal da amostra, três medidas na região da amostra anterior ao entalhe, três medidas na região do entalhe e, por fim, três medidas na região posterior ao entalhe. Sendo em cada medida adquiridos não apenas os valores de amplitude e da fase, mas também o plano de impedância da resposta das correntes parasitas. Um esquema da metodologia “IA” pode ser observado na Figura 3.11.

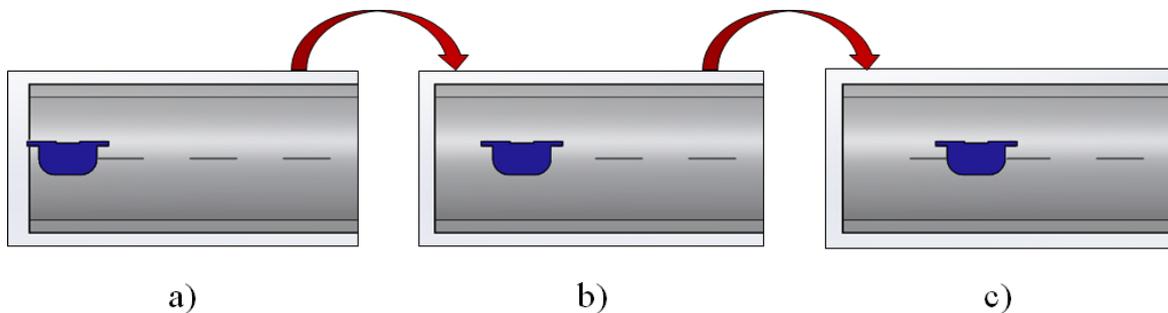


Figura 3. 11: (a) Adquire-se três medidas na região longitudinal anterior ao entalhe. (b) Adquire-se três medidas na região do entalhe. (c) Adquire-se três medidas na região longitudinal posterior ao entalhe.

IB – Inspeção circunferencial ponto a ponto: Uma vez a sonda calibrada no ar, adquire-se, ao longo do sentido circunferencial da amostra, três medidas na região da amostra anterior ao entalhe (RA), três medidas na região do entalhe (RB) e, por fim, três medidas na região posterior ao entalhe (RC). Sendo em cada medida adquiridos não apenas os valores de amplitude e fase, mas também o plano de impedância da resposta das correntes parasitas. Um esquema da metodologia “IB” pode ser observado na Figura 3.12.

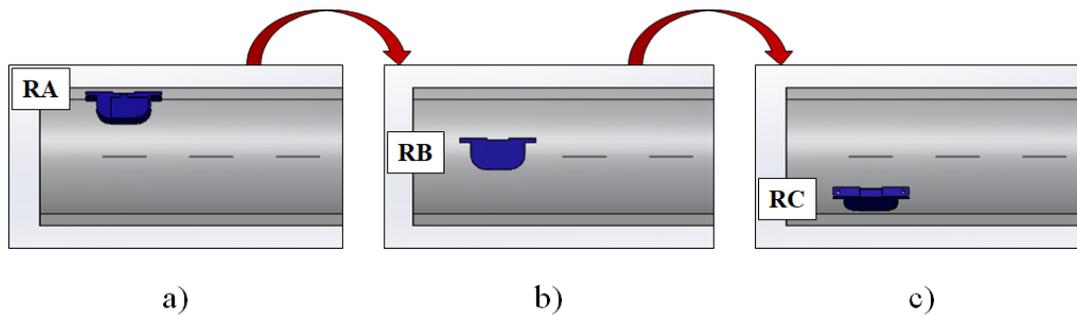


Figura 3. 12: (a) Adquire-se três medidas na região radial anterior ao entalhe. (b) Adquire-se três medidas na região do entalhe. (c) Adquire-se três medidas na região radial posterior ao entalhe.

A Figura 3.13 mostra, de forma geral, a metodologia empregada para se atingir o objetivo deste trabalho. Em uma primeira etapa emprega-se a saturação magnética parcial (SMP) de modo a impedir que qualquer influência magnética superficial das amostras possa vir a prejudicar os resultados dos ensaios de correntes parasitas, em uma segunda etapa emprega-se o procedimento de inspeção orientado para os resultados desejados, otimizando e facilitando a interpretação dos resultados, em uma terceira etapa projeta-se a melhor geometria da sonda, de modo a concentrar o campo magnético da bobina e por último calibra-se o sistema de forma favorecer a detecção dos defeitos no material em questão.



Figura 3. 13: Etapas do desenvolvimento da metodologia de inspeção desenvolvida neste trabalho.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização Microestrutural

#### 4.1.1 Amostra HP-I-A

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram o resultado da caracterização microestrutural da amostra HP-I-A tanto via microscopia ótica, quanto por microscopia eletrônica de varredura, respectivamente.

Observando as Figuras 4.1 e 4.2 percebe-se que a microestrutura da amostra HP-I-A corrobora com a microestrutura dos aços de grau HP modificados ao nióbio reportados na literatura (QUEIROZ, 2017), por apresentar não apenas a estrutura de “escrita chinesa”, mas também por possuírem nos contornos das dendritas, os carbeto com forma de plaquetas. Pode-se ainda observar, pela Figura 4.1, que a amostra apresenta pouca quantidade de óxido, cerca de  $18 \pm 2 \mu\text{m}$ , e está isenta de camada transformada, camada esta, com empobrecimento de carbeto de cromo (SILVEIRA, 2017).

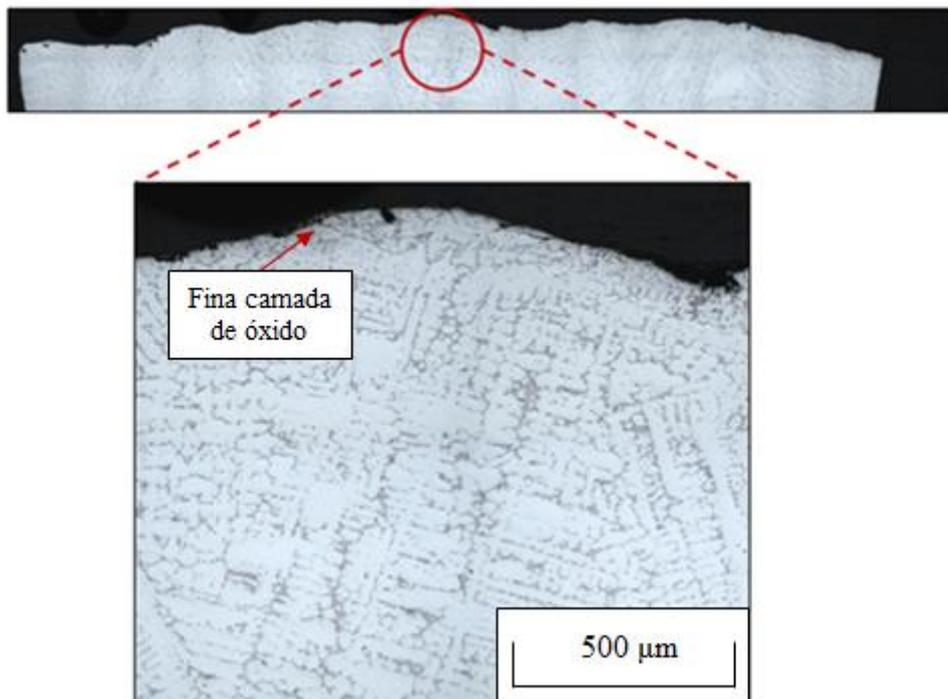


Figura 4. 1: Microestrutura da amostra HP-I-A por microscopia ótica.

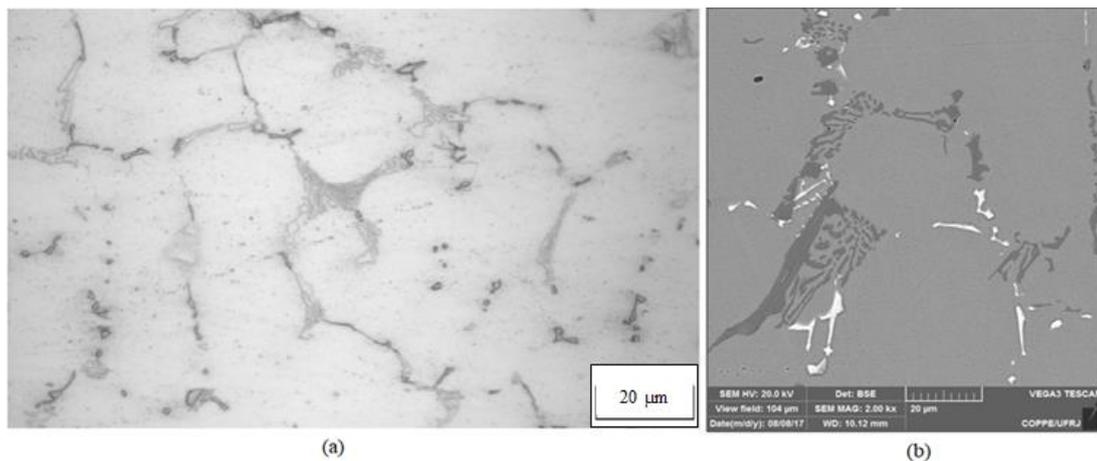


Figura 4. 2: Em (a) micrografia revelada por microscopia ótica e (b)micrografia por MEV da amostra HP-I-A.

A Figura 4.3 mostra a caracterização da informação magnética da amostra pelo método com ferrofluido.

Nota-se que não há resposta magnética de forma homogênea e clara ao longo da parede externa da amostra, o que nos permite inferir que tanto o óxido da parede externa da amostra HP-I-A, quanto à região de interface entre óxido e parede apresentam muito pouca ou nenhuma informação magnética.

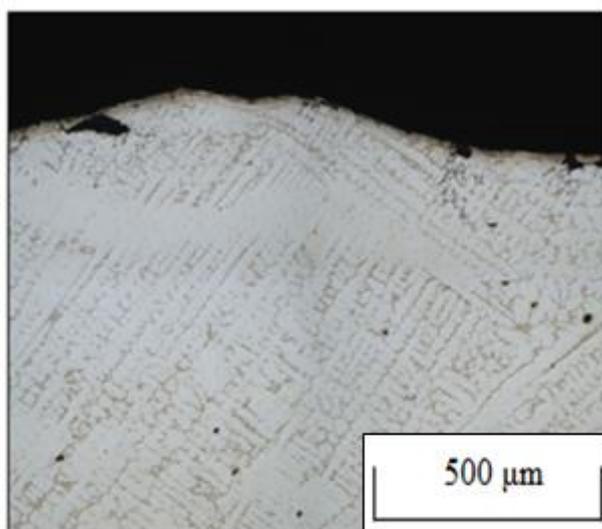


Figura 4. 3: Microscopia ótica, informação magnética da amostra HP-I-A revelada através de aplicação de ferrofluido.

#### 4.1.2 Amostra HP-S-B

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram o resultado da caracterização microestrutural da amostra HP-S-B tanto via microscopia ótica, quanto por microscopia eletrônica de varredura, respectivamente.

Observando as Figuras 4.4 e 4.5 percebe-se que a microestrutura da amostra HP-S-B, amostra que passou por surto de temperatura com posterior envelhecimento, apresenta a morfologia dos carbeto primários, coalescimento dos carbeto secundários, perda de carbeto secundários ao longo dos limites dendríticos devido à difusão do carbono para os carbeto primários e presença da fase G próximos aos carbeto de Ni e carbeto de Cr. Pode-se ainda observar, pela Figura 4.4, que a amostra apresenta uma camada de óxido pouco maior em relação a amostra HP-I-A, com cerca de  $47 \pm 3 \mu\text{m}$  de espessura. Além disto, ainda apresenta uma camada transformada de  $148 \pm 9 \mu\text{m}$  de espessura, camada esta, com empobrecimento de carbeto de cromo (SILVEIRA, 2017).

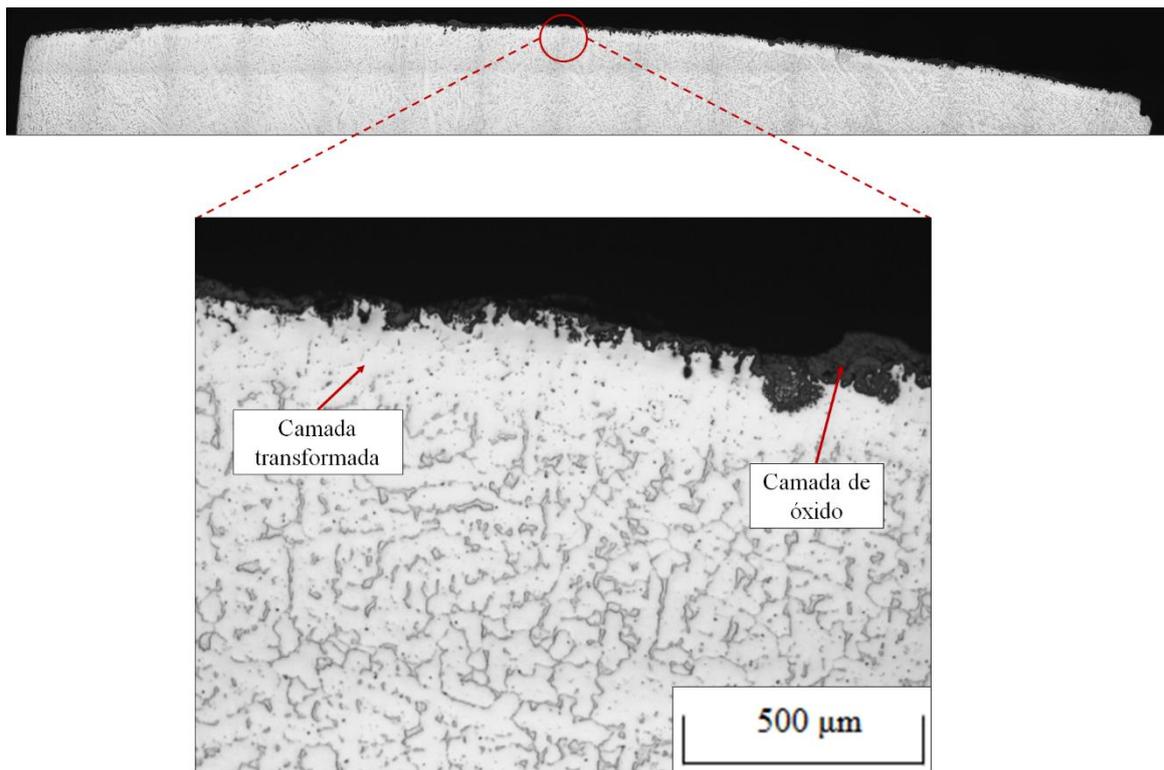


Figura 4. 4: Microestrutura da amostra HP-I-A por microscopia ótica.

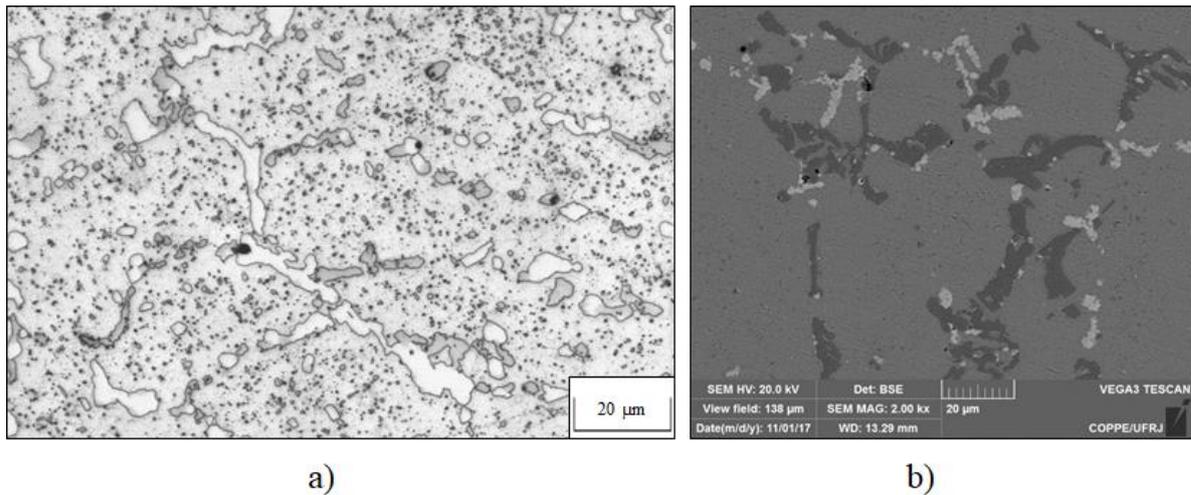


Figura 4. 5: Em (a) micrografia revelada por microscopia ótica e (b) micrografia por MEV da amostra HP-I-A.

A Figura 4.6 mostra a caracterização da informação magnética da amostra pelo método com ferrofluido. Nota-se que há resposta magnética de forma homogênea e clara ao longo da camada transformada da amostra, sendo que a região com informação magnética mede cerca de  $68 \pm 6 \mu\text{m}$  de espessura, ou seja, entorno de 46% da camada transformada possui informação magnética.

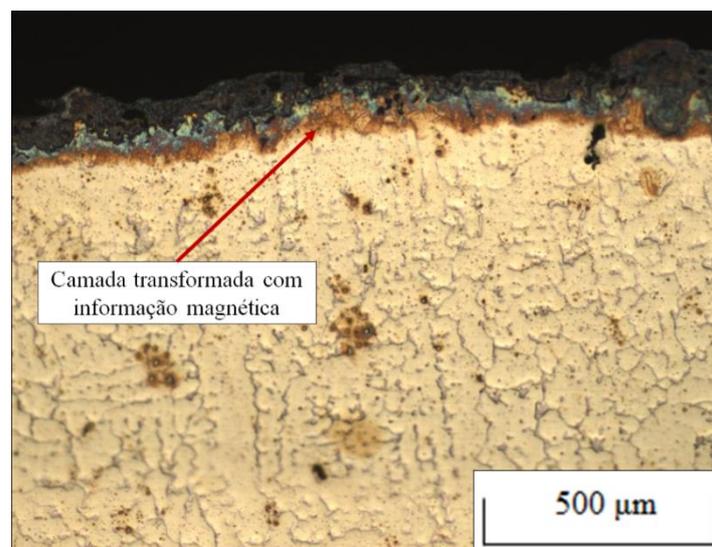


Figura 4. 6: Microscopia ótica, informação magnética da amostra HP-I-A revelada através de aplicação de ferrofluido.

## 4.2 Magnetômetro de amostra vibrante (VSM)

As curvas de magnetização da superfície externa e do centro de parede das amostras HP-I-A e HP-S-B foram obtidas de amostras com as mesmas geometrias, já que as geometrias das amostras influenciam o resultado diretamente, como visto no item 3.3.

A Figura 4.7 representa as curvas de magnetização para a amostra HP-I-A em (a), bem como para a amostra HP-S-B em (b). Na Figura 4.7 (a), é observado um incremento rápido da magnetização até um valor aproximado de 80 mT, partir do qual a magnetização cresce mais lentamente sem chegar a saturação total do material. Já na Figura 4.7 (b), no centro de parede é evidente uma resposta linear característica de materiais paramagnéticos, já a parede externa apresenta valores de magnetização de 15 Am<sup>2</sup>/Kg para campos aplicados de 200 mT sendo o incremento lento e a partir de 200 mT é mais lento ainda.

De forma geral, as curvas de magnetização da parede externa apresentam valores mais intensos se comparados com as curvas do centro de parede para as duas amostras, confirmando que a superfície externa exerce uma forte influência na resposta magnética das amostras. Destaca-se na Figura 4.7 (b) uma grande diferença entre as respostas da parede externa e do centro de parede, isto ocorre devido a maior informação magnética existente na parede externa da amostra HP-S-B, confirmando o que foi visto no resultado do item 4.1.2, Figura 4.6. É importante ressaltar que estas curvas de magnetização não se devem unicamente à resposta da superfície externa, pois existe uma forte influência do centro de parede. Além disso, foram utilizados imã de 440mT para realizar a saturação magnética parcial das amostras estudadas e percebe-se pelos resultados apresentados na Figura 4.7 que já a partir de cerca de 200mT o incremento de magnetização já começa a ser mais lento.

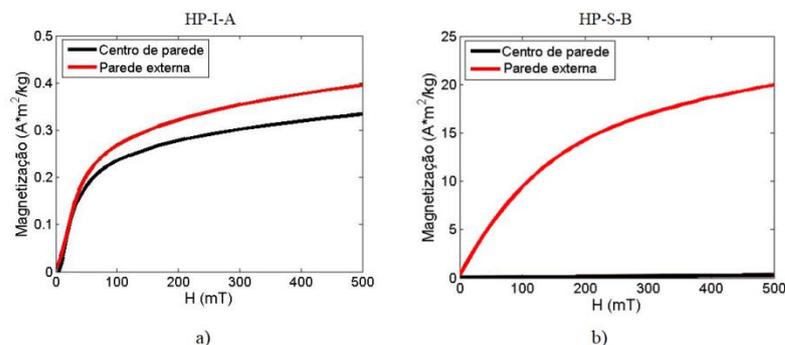


Figura 4. 7: Curvas de magnetização para a amostra HP-I-A em (a) e para a amostra HP-S-B em (b).

### 4.3 Simulação Computacional

Para uma melhor compreensão do comportamento das correntes parasitas nas sondas ST1 e ST2 propostas, realizou-se a simulação computacional pelo software OPERA-3D com o intuito de observar a diferença entre a profundidade de penetração de cada um dos sensores. Para tal, foram utilizadas como parâmetros de simulação as geometrias das sondas ST1 e ST2 descritas no item 3 sendo submetidas a uma frequência de 2 kHz, bem como os valores de 1 MS/m e 1,025, respectivamente para a condutividade elétrica e permeabilidade relativa do aço HP modificado ao nióbio. A Figura 4.8 mostra os resultados da simulação para a sonda ST1, enquanto a Figura 4.9 mostra os resultados da simulação para a sonda ST2.

É possível observar nas Figuras 4.8 e 4.9 não apenas o campo de atuação das correntes parasitas, mas também o sentido horário da corrente imposto na bobina.

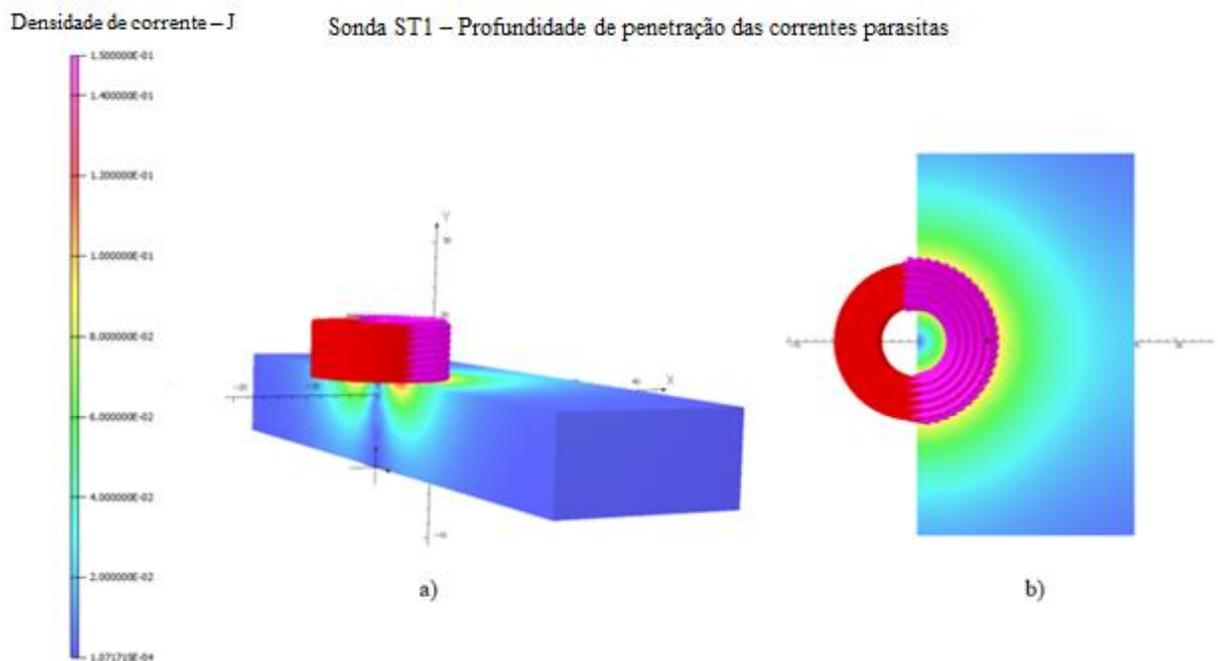


Figura 4. 8: (a) Imagem em perspectiva da simulação da sonda ST1, onde pode ser observada a profundidade de penetração das correntes parasitas em uma espessura de 12 mm de material. (b) Vista de topo, onde pode ser observada a área de atuação das correntes parasitas da sonda ST1

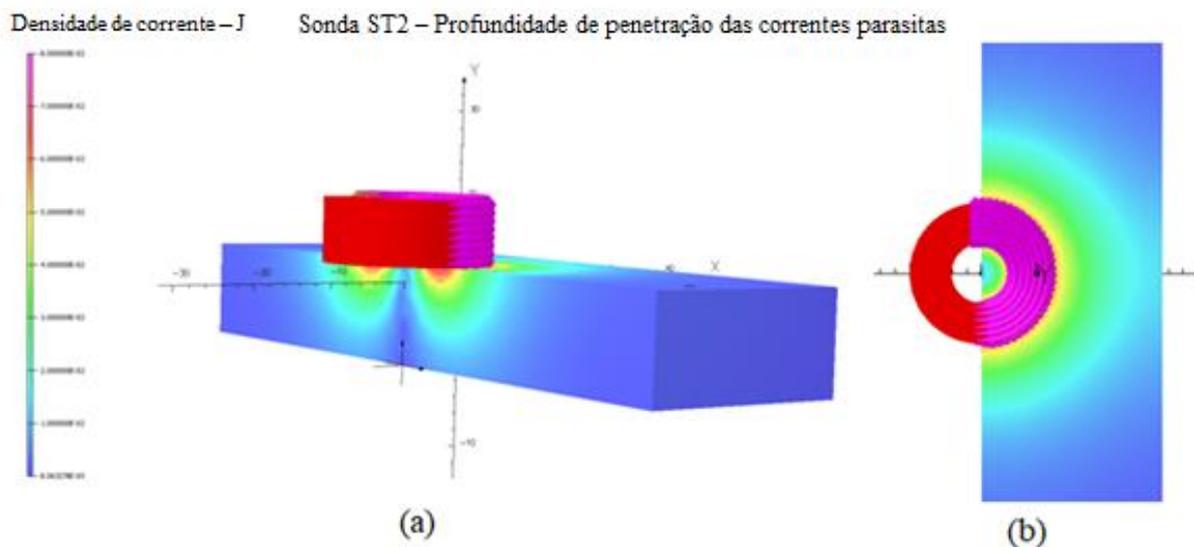


Figura 4. 9: (a) Imagem em perspectiva da simulação da sonda ST2, onde pode ser observada a profundidade de penetração das correntes parasitas em uma espessura de 12 mm de material. (b) Vista de topo, onde pode ser observada a área de atuação das correntes parasitas da sonda ST2.

Ao compararmos os resultados apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9, percebe-se que a penetração das correntes parasitas da sonda ST2 apresenta-se ligeiramente mais profunda para a profundidade de penetração padrão. Para comparar de forma mais precisa essa informação, pode-se observar a Figura 4.10.

A Figura 4.10 é, na verdade, a representação gráfica das penetrações das sondas absolutas ST1 e ST2. O eixo y da curva representa, de forma decrescente, o alcance ao longo da espessura do material que varia de 0 até 12 mm. O eixo x do gráfico indica a porcentagem de correntes parasitas como indicado pela literatura (MARTIN, 2011; NDT e ASM, 2015). Observando a profundidade de penetração padrão, ou seja, a profundidade onde a densidade das correntes parasitas atinge 37% da densidade da corrente na superfície, percebe-se que a sonda absoluta ST2 possui uma penetração ligeiramente maior que a sonda ST1. Este resultado é coerente com a proposta deste trabalho uma vez que se manteve constante a indutância das duas sondas e focou-se na otimização da sonda via sua geometria. Tal geometria foi implementada à sonda ST2 de modo a gerar uma maior concentração do campo magnético induzido, o que conseqüentemente aperfeiçoa a relação sinal ruído e, assim, a detecção de defeitos.

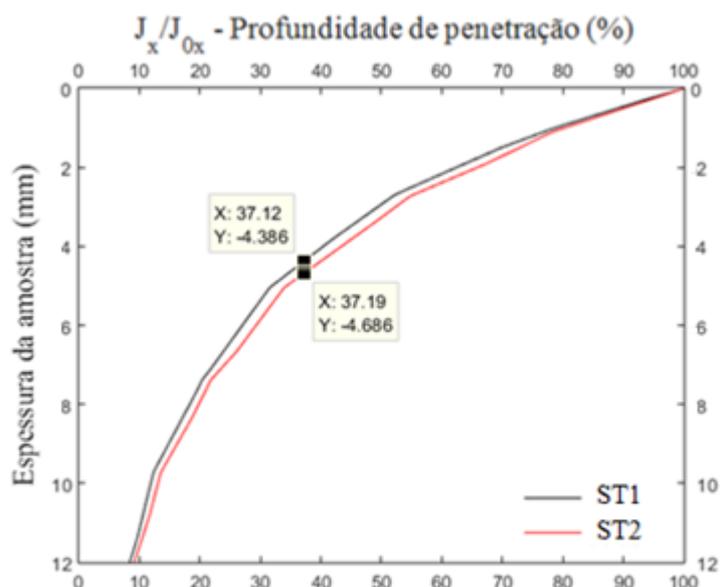


Figura 4. 10: Profundidade de penetração ST1xST2.

#### 4.4 Correntes Parasitas

Foram apresentados a seguir os resultados obtidos tanto da sonda ST1 quanto da sonda ST2 para diferentes calibrações.

##### 4.4.1 Sonda ST1 – Calibração segundo (MORAES, 2016) – Amostra HP-I-A

Primeiramente foram aliados os parâmetros e a calibração utilizados por (MORAES, 2016) junto a metodologia proposta neste trabalho de modo a compreender as limitações de tal calibração. Foram apresentados os principais resultados aplicando-se a calibração utilizada por (MORAES, 2016), para tal foram aplicados os parâmetros da Tabela 3.4.

- Correntes parasitas convencional sem saturação magnética

Podem-se observar na Figura 4.11 os resultados do mapeamento da amostra HP-I-A pela sonda ST1, segundo calibração da Tabela 3.4, utilizando-se apenas correntes parasitas.

Tanto no mapeamento da amplitude na Figura 4.11 (a), quanto da fase em (b), percebe-se uma mudança de comportamento da resposta das correntes parasitas em cerca de 500mm de comprimento, tornando-se mais intenso a partir de 550mm de

comprimento. Além disso, no mapeamento de amplitude, percebe-se nas coordenadas (100,50) e (100,150) uma resposta diferente do seu entorno. Sendo estas regiões onde estão, respectivamente, localizados os entalhes E8 e E7, pode-se intuir que há um indício de detecção destes entalhes. De modo geral, os mapas de contraste gerados graças a metodologia desenvolvida no atual trabalho já se mostram eficiente quanto a clareza dos resultados, de forma a não apenas ilustrar os defeitos, mas também torná-los de mais fácil interpretação.

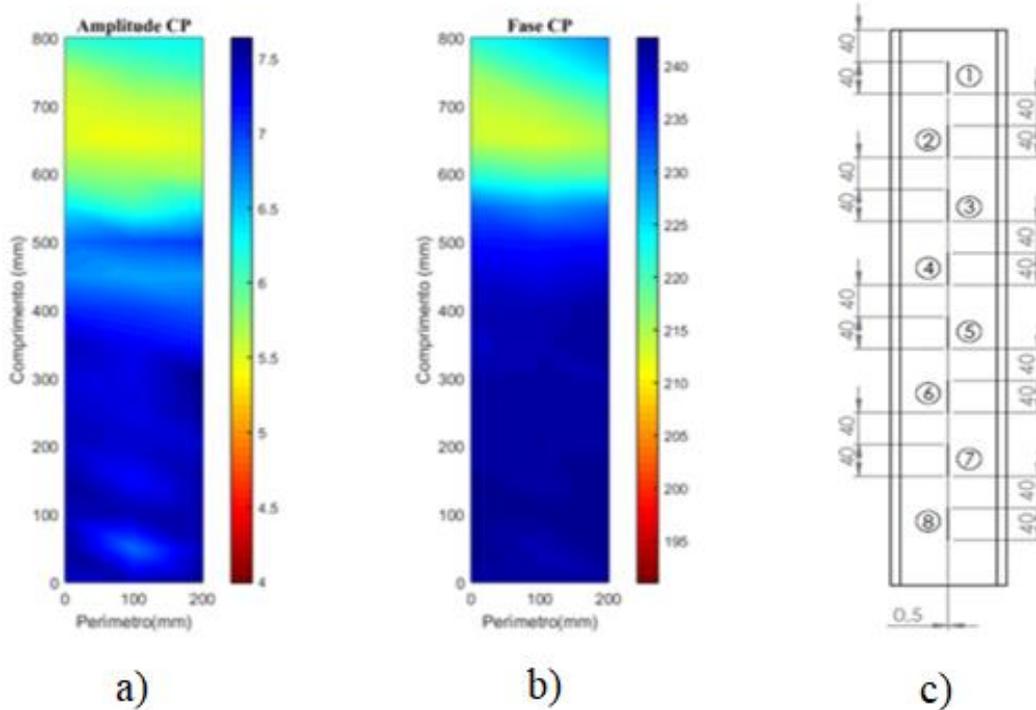
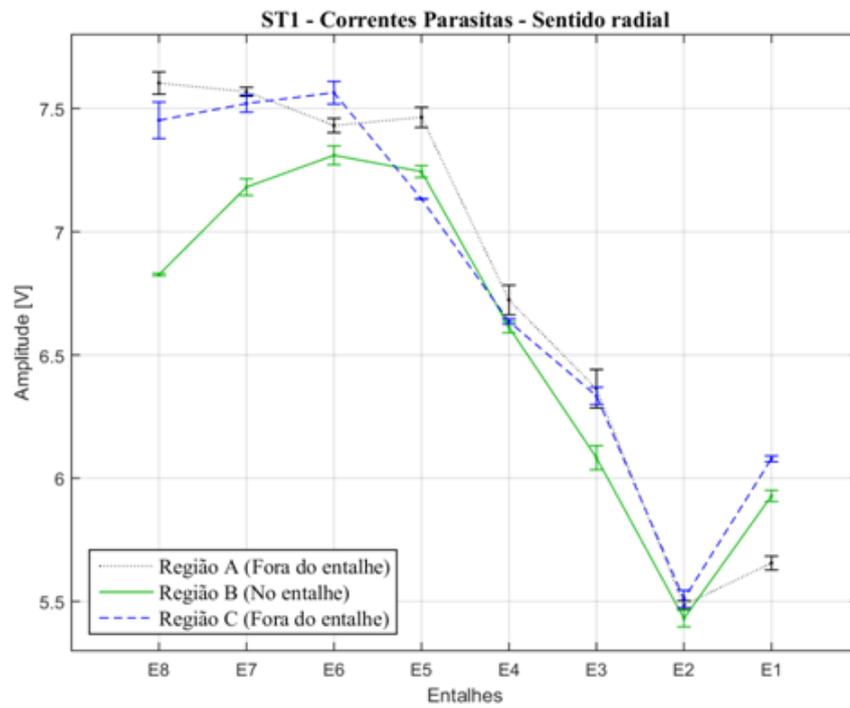


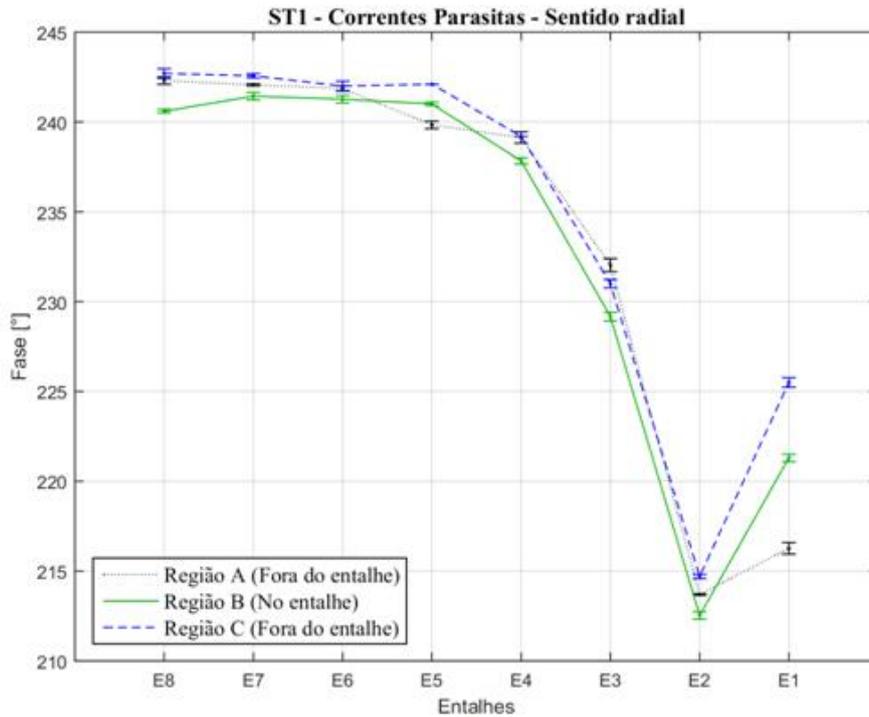
Figura 4. 11: Para a calibração segundo (MORAES, 2016), têm-se (a) mapeamento da amplitude de resposta de correntes para a amostra HP-I-A, (b) mapeamento da fase de resposta de correntes parasitas para HP-I-A e (c) Desenho do corpo de prova HP-I-A com a distribuição dos oito entalhes ao longo de seu comprimento.

A Figura 4.12 apresenta os resultados dos sub-procedimentos IA (sentido circunferencial) e IB (sentido longitudinal), tanto para amplitude, quanto para fase, propostas neste trabalho. A Figura 4.12 (a) mostra que os resultados de amplitude para o procedimento IB conseguindo diferenciar os entalhes E8, E7 e E6, das respostas fora dos entalhes. Ao analisar a resposta da fase, Figura 4.12 (b), ainda do procedimento IB, observa-se o mesmo comportamento da resposta em amplitude, porém com um grau de diferenciação menor. Observando-se os resultados de amplitude e fase do procedimento

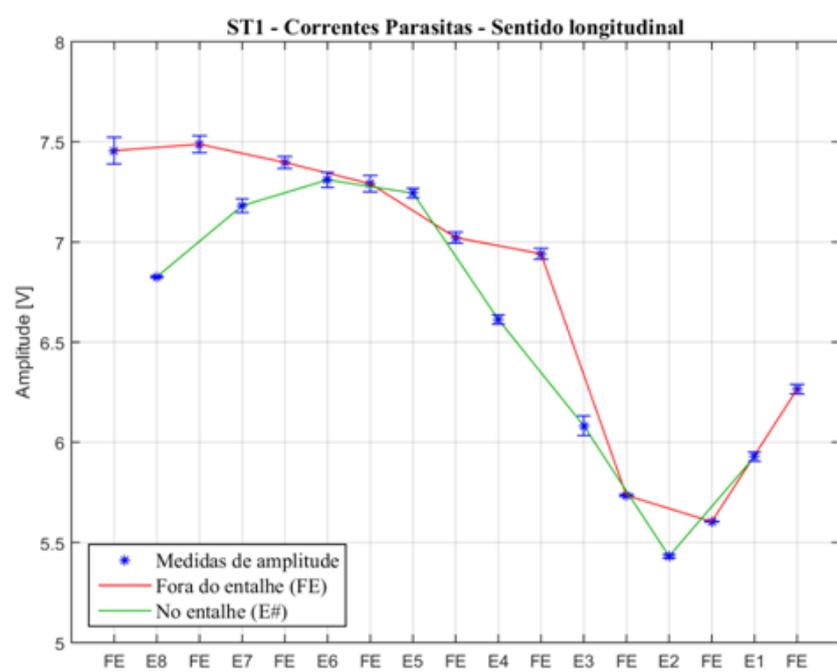
IA, Figura 4.12 (c) e (d), percebe-se resultados semelhantes ao procedimento IB. É ainda importante ressaltar que nem sempre as respostas fora dos entalhes irão se sobrepôr, pois os materiais analisados podem possuir pequenas variações microestruturais fazendo com que as respostas fora dos entalhes sejam ligeiramente diferentes.



(a)



(b)



(c)

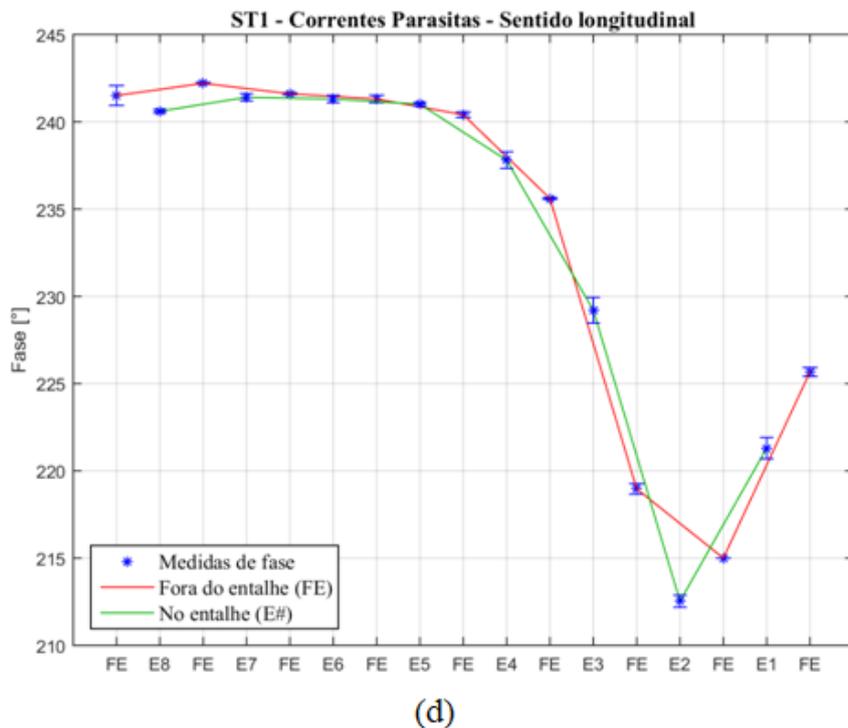


Figura 4. 12: a) Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas, segundo procedimento IB. (b) Gráfico de fase por entalhes, por correntes parasitas, segundo procedimento IB. (c) Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas, segundo metodologia IA. (d) Gráfico de fase por correntes parasitas, entalhes segundo metodologia IA.

- Correntes parasitas com saturação magnética parcial - SMP

Podem-se observar na Figura 4.13 os resultados do mapeamento da amostra HP-I-A pela sonda ST1, calibrado segundo (MORAES, 2016), utilizando-se correntes parasitas com saturação magnética parcial (SMP). Vale ainda ressaltar que foram utilizados imã de 440mT para a realização da saturação magnética parcial sendo este suficiente, já que, como visto na Figura 4.7. A partir de 200mT o incremento de magnetização já começa a ser mais lento.

Tanto no mapeamento da amplitude na Figura 4.13 (a), quanto da fase em (b), percebe-se uma mudança de comportamento da resposta das correntes parasitas em cerca de 400mm de comprimento, tornando-se mais intenso a partir de 500mm de comprimento. Além disso, no mapeamento de amplitude, percebe-se, que há nas coordenadas (100,50), (100, 150) e (100, 250) uma resposta diferente do seu entorno. Sendo estas regiões onde estão, respectivamente, localizados os entalhes E8, E7 e E6, podendo-se, assim, intuir que há um indício de detecção destes entalhes através desta

metodologia. Em comparação com o resultado apresentado na Figura 4.11, percebe-se que a saturação magnética parcial deixa a diferenciação dos entalhes mais evidente.

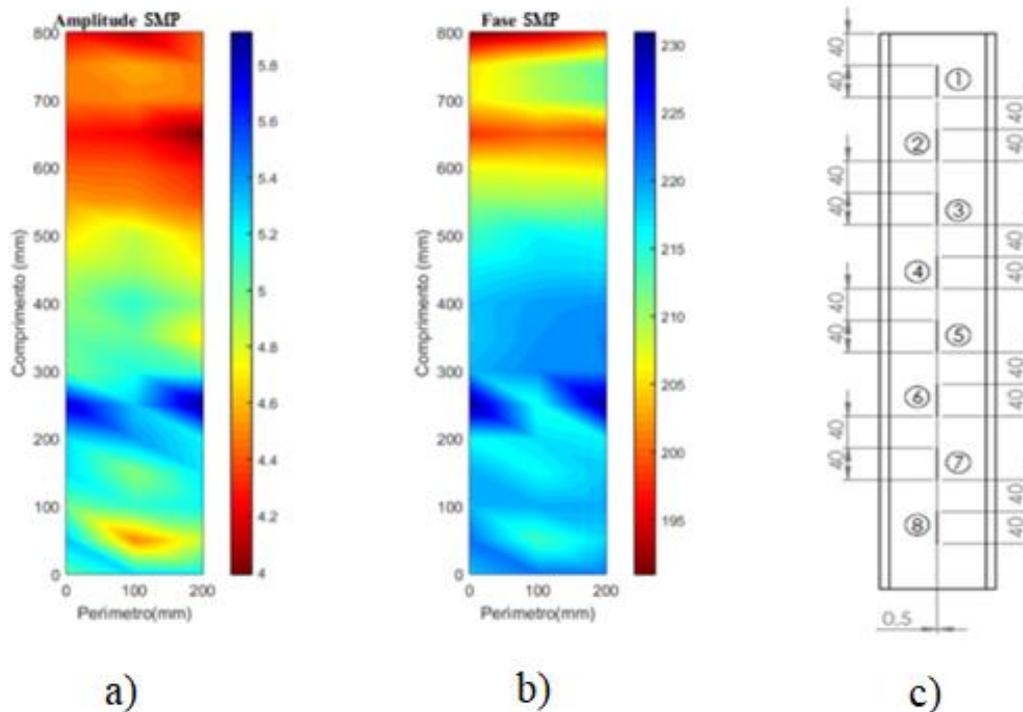


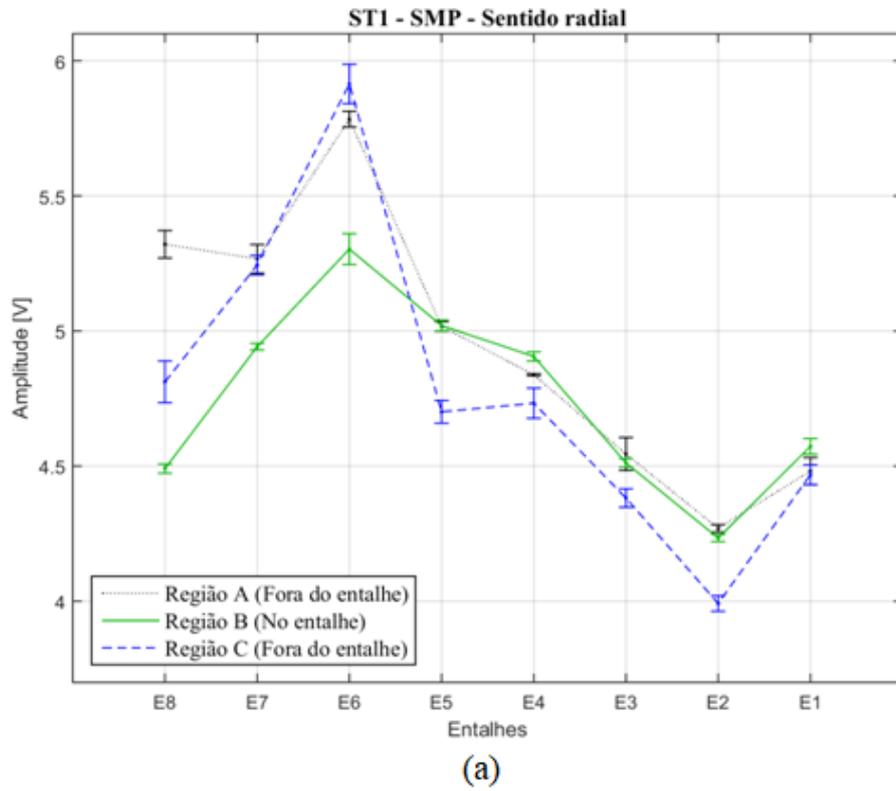
Figura 4. 13: Para a calibração segundo (MORAES, 2016), tem-se (a) mapeamento da amplitude de resposta de correntes parasitas com SMP para a amostra HP-I-A, (b) mapeamento da fase de resposta de correntes parasitas com SMP para a amostra HP-I-A e (c) desenho do corpo de prova HP-I-A com a distribuição dos oito entalhes ao longo de seu comprimento.

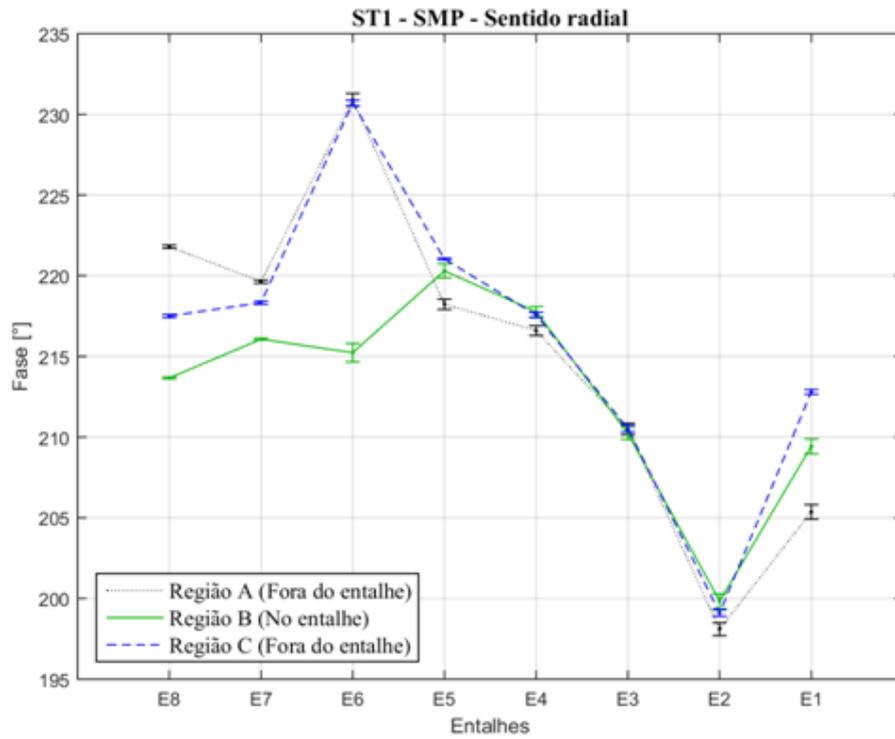
A Figura 4.14 apresenta os resultados dos procedimentos IA e IB através das correntes parasitas com SMP, tanto para amplitude, quanto para fase, propostas neste trabalho.

Novamente a metodologia de inspeção desenvolvida neste trabalho se mostra de grande valia e, além disso, são perceptíveis os ganhos de se saturar parcialmente o material, uma vez que, os poucos entalhes detectados segundo calibração de (MORAES, 2016) tornam-se mais distinguíveis, sendo eles o E8, E7 e E6.

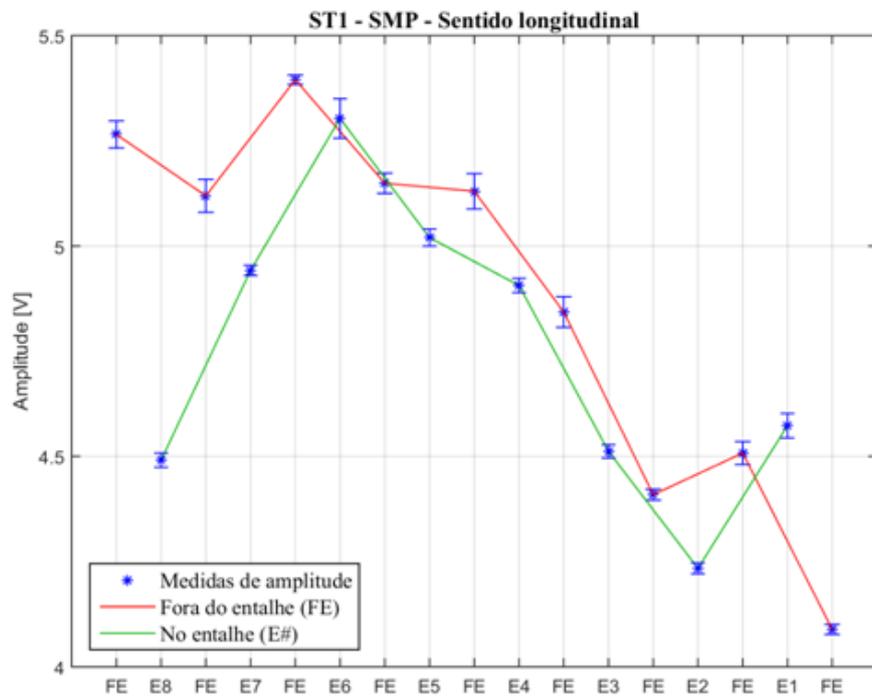
A Figura 4.14 (a) mostra que os resultados de amplitude para o procedimento IB conseguem diferenciar os entalhes E8, E7 e E6, das respostas fora dos entalhes. Ao analisar a resposta da fase, Figura 4.14 (b), ainda do procedimento IB, observa-se o mesmo comportamento da resposta em amplitude para os entalhes E8, E7 e E6.

Observando-se os resultados de amplitude e fase do procedimento IA, Figura 4.14 (c) e (d), corroboram, em parte, os resultados obtidos segundo o procedimento IB, Figura 4.14 (a) e (b).

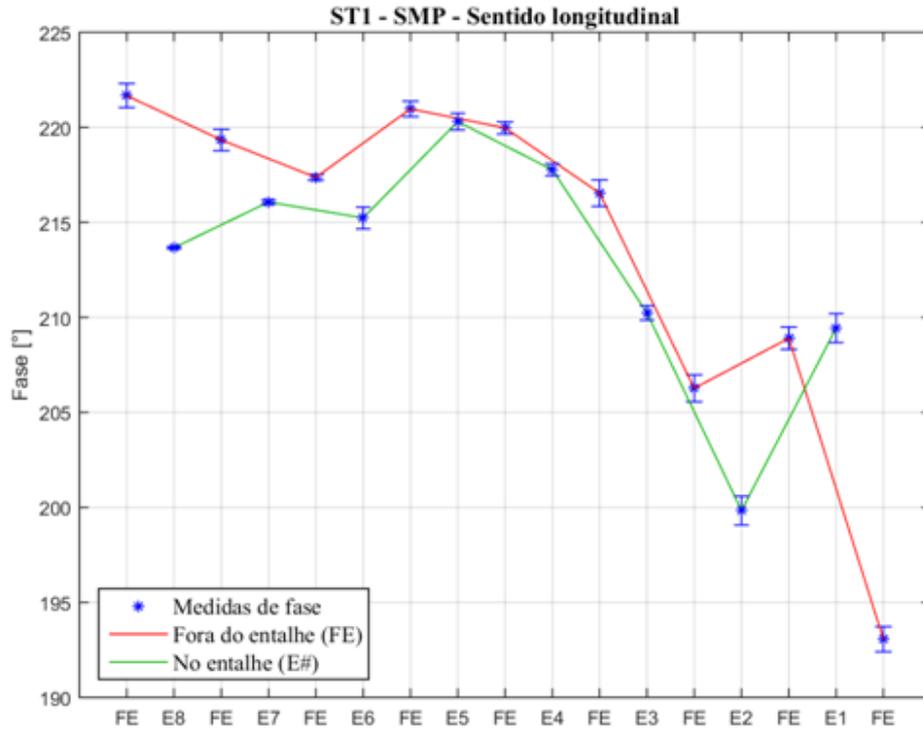




(b)



(c)



(d)

Figura 4. 14: Para a amostra HP-I-A tem-se (a) gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo procedimento IB. (b) Gráfico de fase por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo procedimento IB. (c) Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo metodologia IA. (d) Gráfico de fase por correntes parasitas com SMP, entalhe segundo metodologia II.

A Figura 4.15 (a) e (b) mostra, de forma representativa, os resultados da detecção de dois diferentes entalhes, um segundo o procedimento IB e outro segundo o procedimento IA.

Ao analisar os resultados da Figura 4.15, torna-se de clara compreensão o sentido vertical da nova forma de calibração proposta neste trabalho. Esta calibração tem em vista não apenas aplicar uma rotação no sinal de resposta do plano de impedância de modo a alinhá-la ao eixo vertical, mas também de aplicar um ganho vertical. Com isto, na verdade projeta-se toda a resposta do plano de impedância no eixo da reatância indutiva ( $X_i$ ), que na verdade é a componente onde é detectado o defeito. Isto ocorre, pois na região de defeito há uma diminuição da densidade de correntes parasitas, enquanto a resistência do sistema mantém-se praticamente constante, porém levando assim a um aumento considerável da reatância indutiva ( $X_i$ ). Todavia, a variação da

resistência é muito baixa ao ser comparada a variação da intensidade da reatância indutiva ( $X_L$ ), uma vez que esta provém da alteração da soma do campo magnético secundário com o primário é alta. De toda via pequenas variações de densidade de corrente geram grandes alterações no campo magnético secundário e conseqüentemente na reatância indutiva ( $X_L$ ), dando assim a oportunidade de detecção dos defeitos através desta componente.

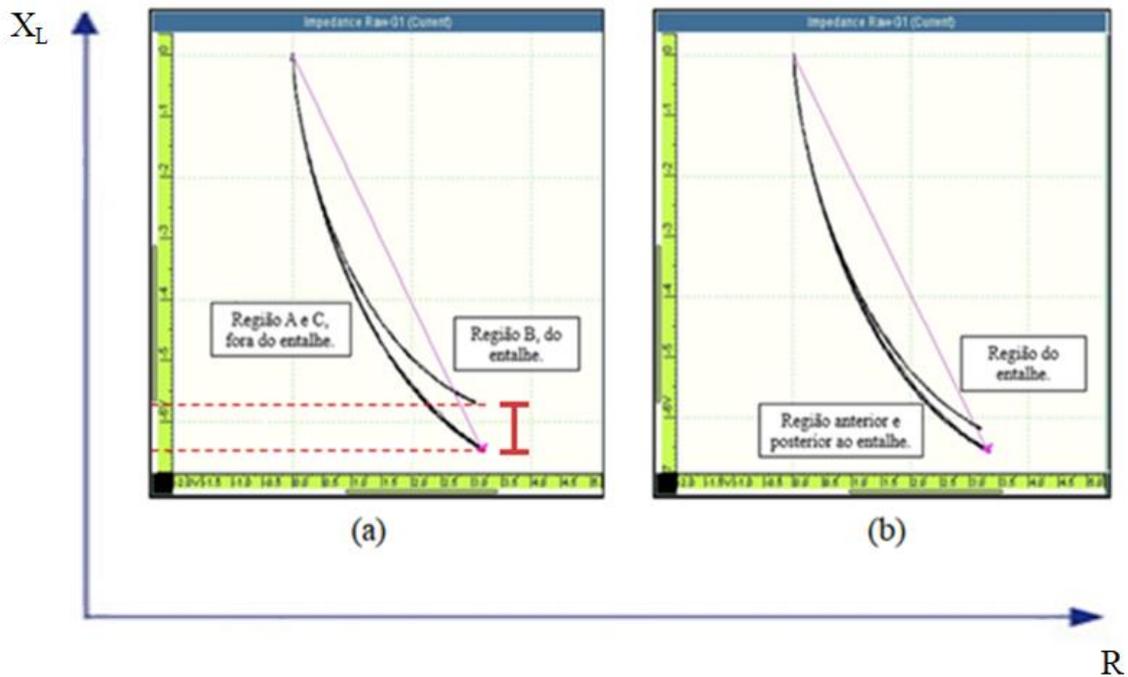


Figura 4. 15: Para amostra HP-I-A e segundo a calibração de (MORAES, 2016) têm-se (a) resposta no plano de impedância do procedimento IB, com correntes parasitas com SMP, para o entalhe E8. (b) Resposta no plano de impedância do procedimento IA, com correntes parasitas com SMP, para o entalhe E7.

#### 4.4.2 Sonda ST1 – Calibração proposta – Amostra HP-I-A

Uma vez já demonstrado que o procedimento de inspeção desenvolvido neste trabalho traz grandes benefícios à detecção dos defeitos, aliou-se este procedimento à calibração proposta também neste trabalho, que de forma geral irá destacar as variações indutivas ao longo da amostra. Prezando o desenvolvimento gradual e bem fundamentado tanto da metodologia quanto dos parâmetros de ensaio propostos foram realizados os testes ainda com a sonda ST1, sonda esta que não passou por otimização de sua geometria. Serão apresentados os principais resultados aplicando-se a calibração

de modo a anular a componente resistiva, ou seja, privilegiar a componente indutiva de interesse, que para tal foram aplicados os parâmetros da Tabela 4.1 para a sonda ST1.

Tabela 4. 1: Parâmetros para calibração proposta para sonda ST1.

	Correntes Parasitas	Correntes Parasitas com SMP
Parâmetro	Valor	Valor
Frequência (kHz)	2	2
Amplitude (V)	4	4
Ganho Horizontal (V)	22	22
Rotação (°)	98	87
Ganho Vertical (V)	25	25

Calibrações que fazem parâmetros do plano de impedância se tornarem constantes e/ou fazem com que a resposta de defeitos ocorra em determinada direção do mesmo são reportadas como práticas para detecção de defeitos, sendo comumente mantida constante a componente indutiva. Foi realizado um teste calibrando-se de forma a manter a resposta do “*lift off*” na horizontal, no plano de impedância, e ver a resposta aos defeitos na componente indutiva, também do plano de impedância, como é reportado por (SOARES, 2005). Entretanto não houve uma resposta positiva quanto a detecção dos defeitos, com esta calibração, como pode ser observado no Anexo A deste trabalho.

A contribuição para a detecção de trincas deste trabalho se dá no conjunto de calibração, metodologia e projeto de sonda na calibração proposta, tendo a calibração o objetivo de anular a componente resistiva, ou seja, a resposta no plano de impedância do *lift-off* se dará apenas no eixo vertical, reatância indutiva ( $X_L$ ). Desta forma, os efeitos prejudiciais do *lift-off* são minimizados e a resposta aos defeitos se dará de forma mais notável nas variações da amplitude do sinal. Esta calibração é justificável, pois para o aço austenítico HP e seu comportamento paramagnético, na região onde estiver o defeito ocorrerá a queda da densidade de correntes parasitas o que, por sua vez, implicará em uma variação resistência do sistema, porém acarretará no aumento da reatância indutiva ( $X_L$ ). Entretanto enquanto a variação da resistência é muito pouca ou quase nenhuma, a alteração do campo primário projetada no campo secundário é alta provocando assim uma intensa resposta na reatância indutiva ( $X_L$ ).

O fato de ocorrer a variação quase nula da resistência durante a detecção dos defeitos e com uma grande variação da reatância indutiva ( $X_L$ ) é explicado porque, como visto na Figura 4.15, a resistência do sistema depende basicamente da lei de Ohm. Como a resistência está diretamente relacionada a passagem dos elétrons, percebe-se que a resistência é uma medida volumétrica que pode ser dependente dos defeitos. Assim sendo, quanto maior o defeito maior é a resistência, porém esta variação de resistência pode ser difícil de medir, haja visto que tanto os entalhes como as trincas de fluência possuem uma geometria pequena e restrita, levando assim a uma não percepção da variação da resistência.

Entretanto a resposta da reatância indutiva ( $X_L$ ) é alta. Isto ocorre, porque, a impedância do sistema possui três contribuições, sendo elas a resistência, a indutância e capacitância. Como fora dito a resistência não irá contribuir em nada para nosso problema e a capacitância tão pouco, devido a configuração dos equipamentos utilizados. Desta forma, toda a resposta proveniente dos defeitos se dará na indutância que por sua vez relaciona-se diretamente a reatância indutiva ( $X_L$ ). A reatância indutiva não se anula, pois ela depende diretamente da frequência aplicada ao sistema, da geometria e número de voltas da bobina. Assim sendo, o módulo da reatância indutiva aumenta com os defeitos no material, uma vez que estes defeitos irão perturbar o campo magnético secundário, tornando assim a medida da reatância mais sensível que da resistência, já que está ligada a um volume menor de defeitos.

Além disso, com o intuito de maximizar a diferença na amplitude dos sinais das regiões com e sem defeitos, aplica-se ainda um ganho vertical, isto, pois o ganho vertical junto à calibração definida neste trabalho irá não apenas elucidar, mas também intensificar a resposta da componente indutiva que foi responsável pela detecção dos defeitos.

- Correntes parasitas sem saturação magnética

Podem-se observar na Figura 4.16 os resultados do mapeamento da amostra HP-I-A através da sonda ST1 utilizando-se apenas CP sem saturação magnética.

Mesmo para correntes parasitas sem saturação magnética parcial, é clara uma extrema melhora na detecção dos entalhes dada a calibração proposta neste trabalho ao se comparar com os resultados do item 4.4.1, calibração segundo (MORAES, 2015). Os resultados gerados tanto graças a calibração proposta quanto a metodologia

desenvolvida apresentam-se não apenas com maior clareza, mas também com áreas bem definidas e homogêneas o que representa a qualidade e reprodutividade dos resultados.

Tanto no mapeamento de amplitude na Figura 4.16 (a), quanto da fase em (b), percebe-se uma mudança de comportamento da resposta das correntes parasitas a partir do entorno de 450mm de comprimento, tornando-se mais intenso a partir de 500mm de comprimento. Além disso, no mapeamento de amplitude, percebe-se nas coordenadas (100,50), (100,150), (100,250) e (100,350) uma resposta diferente do seu entorno. Sendo estas regiões onde estão, respectivamente, localizados os entalhes E8, E7, E6 e E5, pode-se intuir que há a detecção destes entalhes.

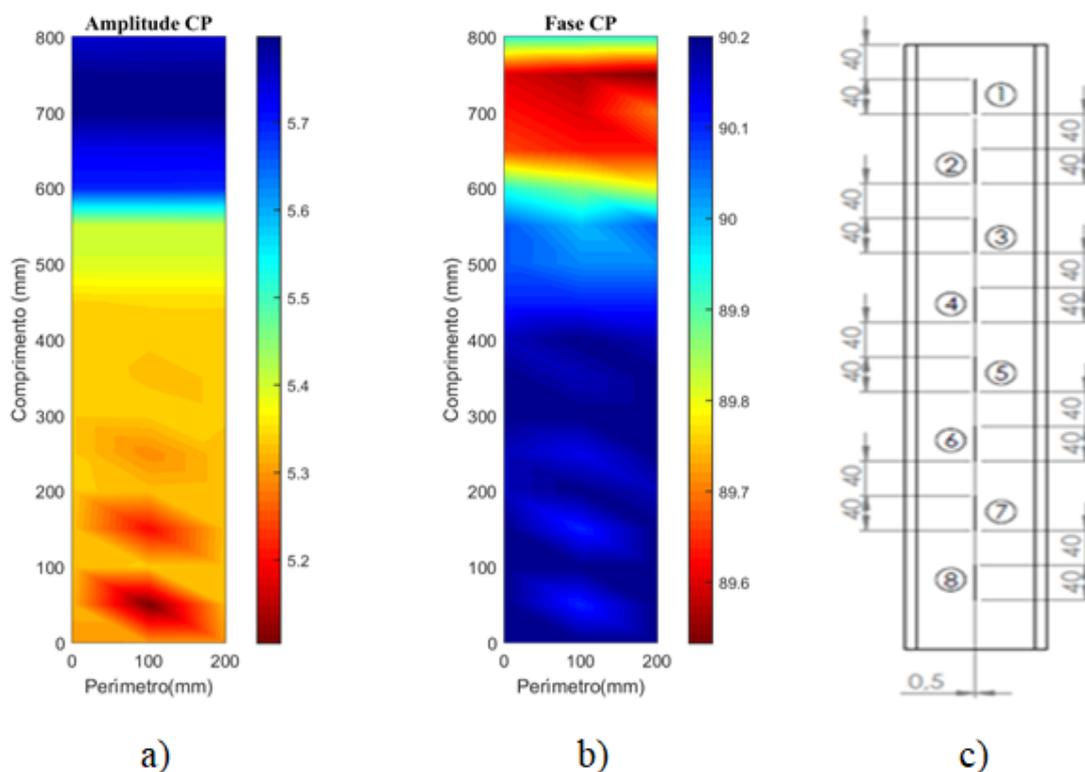
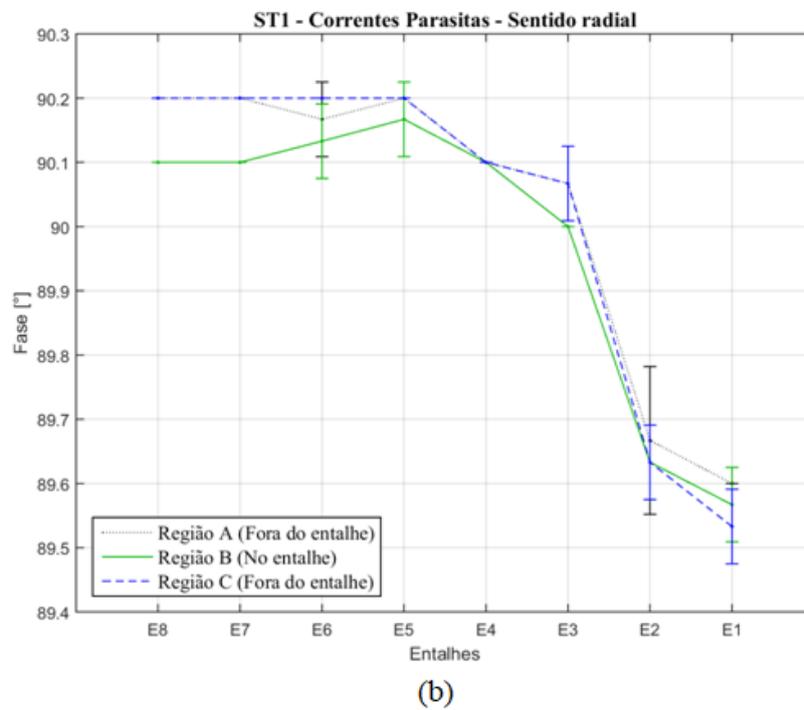
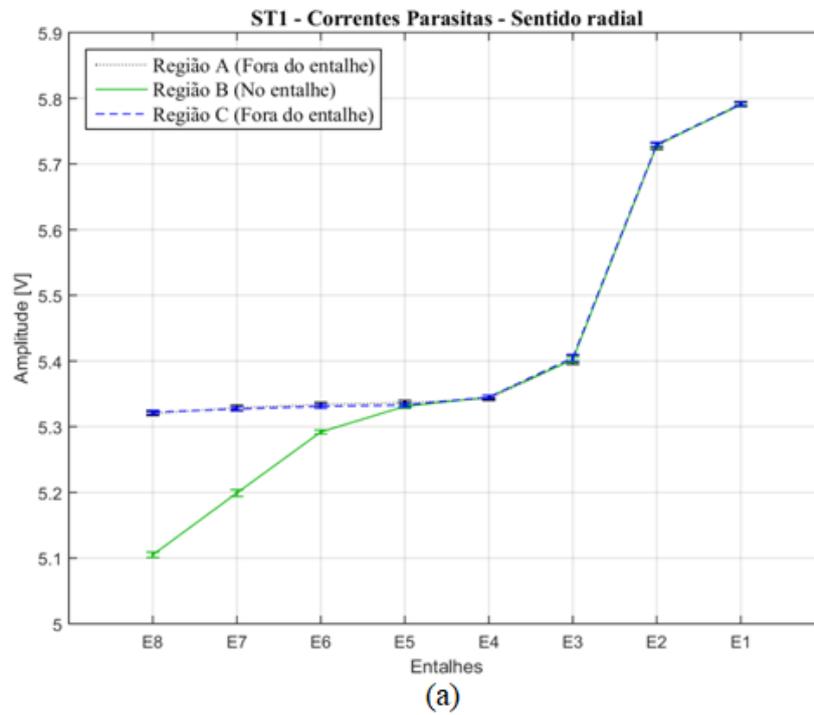
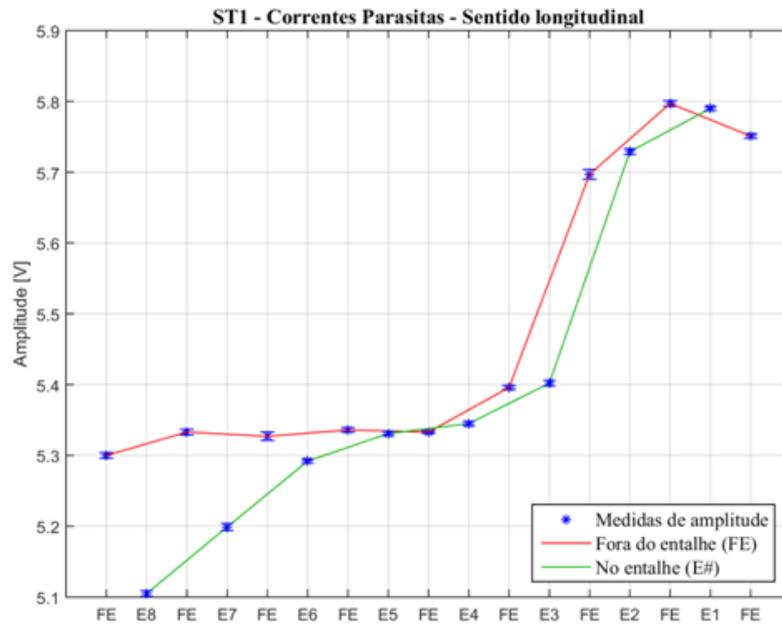


Figura 4. 16: Para a calibração proposta têm-se (a) mapeamento da amplitude de resposta de correntes para a amostra HP-I-A, (b) mapeamento da fase de resposta de correntes parasitas para HP-I-A e (c) desenho do corpo de prova HP-I-A com a distribuição dos oito entalhes ao longo de seu comprimento.

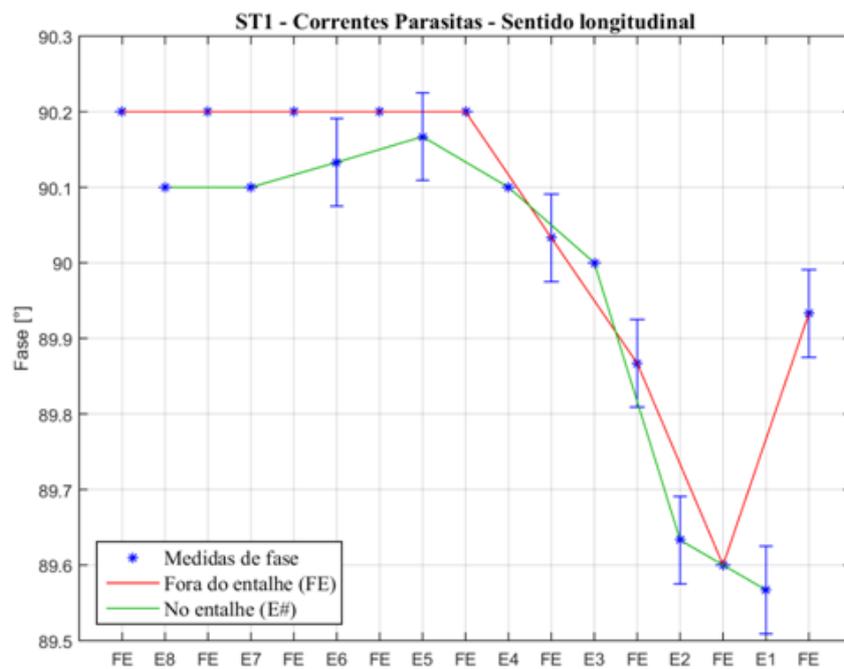
A Figura 4.17 apresenta os resultados dos procedimentos IA e IB, tanto para amplitude, quanto para fase, propostas neste trabalho. A Figura 4.17 (a) mostra que os resultados de amplitude para o procedimento IB conseguem diferenciar os entalhes E8, E7 e E6, das respostas fora dos entalhes. Ao analisar a resposta da fase, Figura 4.17 (b), ainda do procedimento IB, observa-se o mesmo comportamento da resposta em

amplitude. Observando-se os resultados de amplitude e fase do procedimento IA, Figura 4.17 (c) e (d), percebem-se resultados semelhantes à procedimento IB.





(c)



(d)

Figura 4. 17: Para a calibração proposta nos ensaios da amostra HP-I-A têm-se (a) Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas, segundo procedimento IB. (b) Gráfico de fase por entalhes, por correntes parasitas, segundo procedimento IB. (c) Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas, segundo metodologia IA. (d) Gráfico de fase por correntes parasitas, entalhes segundo metodologia IA.

De modo geral aliando-se os resultados tanto do mapa de contrastes quanto das análises gráficas pode-se chegar a conclusões assertivas quanto a detecção dos entalhes.

- Correntes parasitas com saturação magnética parcial - SMP

Podem-se observar na Figura 4.18 os resultados do mapeamento da amostra HP-I-A através da sonda ST1 utilizando-se correntes parasitas com saturação magnética parcial (SMP).

É de imediata percepção o quão poderoso se torna a aliança entre a metodologia de inspeção desenvolvida, a calibração - que preza a anulação da influência negativa da componente resistiva e ao mesmo tempo amplifica a amplitude da componente de interesse indutiva - e à aplicação de um campo magnético externo de modo a visar a saturação magnética parcial do material. A união destes três fatores permitiu que se superasse a barreira de detecção de apenas dois entalhes como reportado por (MORAES, 2016) para agora detectar-se, com a mesma sonda, todos os oito entalhes.

Tanto no mapeamento da amplitude na Figura 4.18 (a), quanto da fase em (b), percebe-se uma mudança de comportamento da resposta das correntes parasitas a partir de 450mm de comprimento, tornando-se mais intenso a partir de 500mm de comprimento. Além disso, no mapeamento de amplitude, percebe-se, com grande clareza, que nas coordenadas (100,50), (100,150), (100, 250), (100,350), (100,450) e (100, 550) uma resposta diferente do seu entorno. Sendo estas regiões onde estão, respectivamente, localizados os entalhes E8, E7, E6, E5, E4 e E3, podendo-se, assim, perceber que há a detecção destes entalhes através desta metodologia. Além disso, ainda percebe-se nas coordenadas (100, 650) e (100, 750) o destacamento de duas regiões onde estão localizados os entalhes E2 e E1. Já em (b), percebe-se a detecção dos entalhes de E8 a E4.

Os resultados em amplitude foram os resultados de maior importância para detecção dos defeitos, haja visto que a calibração proposta age de modo a enaltecer as variações de amplitude da componente indutiva.

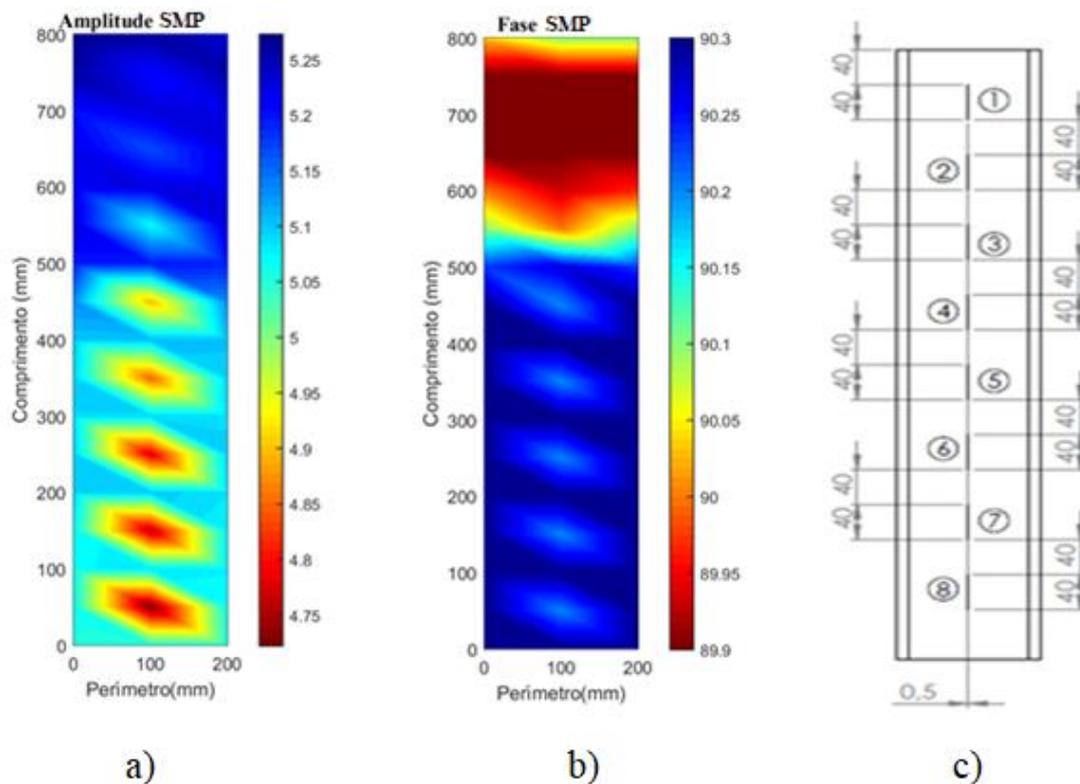
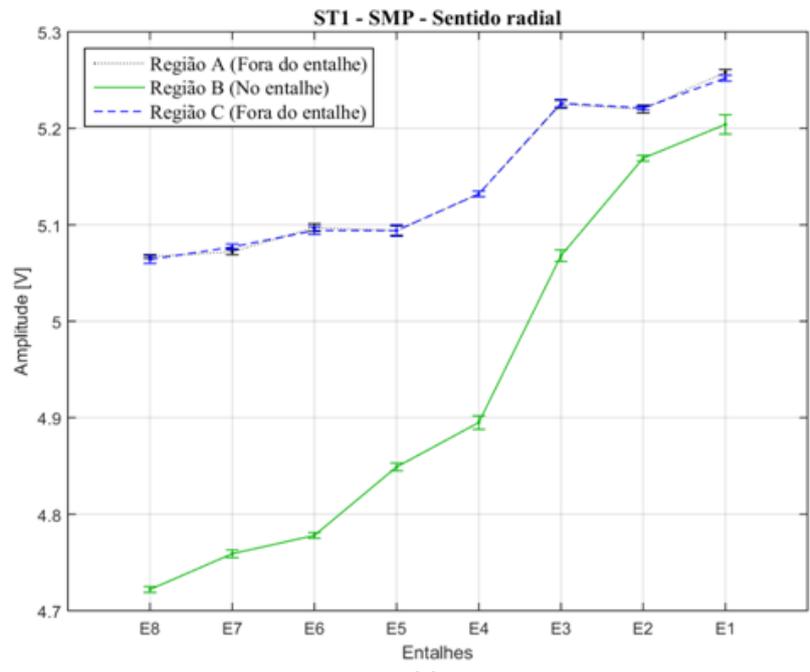


Figura 4. 18: Para a calibração proposta têm-se(a) Mapeamento da amplitude de resposta de correntes parasitas como SMP para a amostra HP-I-A, (b) Mapeamento da fase de resposta de correntes parasitas com SMP para a amostra HP-I-A e (c) desenho do corpo de prova HP-I-A com a distribuição dos oito entalhes ao longo de seu comprimento.

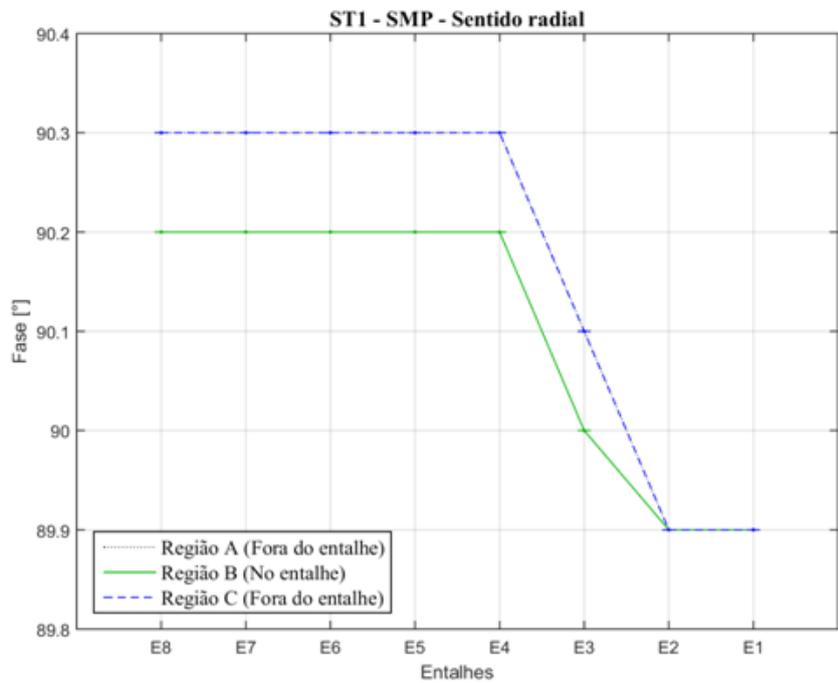
A Figura 4.19 apresenta os resultados dos procedimentos IA e IB através das correntes parasitas com SMP, tanto para amplitude, quanto para fase, propostas neste trabalho.

Não apenas na análise do mapa de contraste, mas também na análise gráfica dos resultados é clara a detecção dos entalhes gerada pela calibração e procedimentos de inspeção propostos junto a saturação magnética parcial do material. A Figura 4.19 (a) mostra que os resultados de amplitude para o procedimento IB conseguem diferenciar os entalhes E8, E7, E6, E5, E4, E3, E2 e E1 das respostas fora dos entalhes. Porém, os entalhes E3, E2 e E1 estão em um patamar que se aplicado um valor de corte, podem ser confundidos com regiões fora dos entalhes. Ao analisar a resposta da fase, Figura 4.19 (b), ainda do procedimento IB, observa-se o mesmo comportamento da resposta em amplitude para os entalhes de E8 a E4.

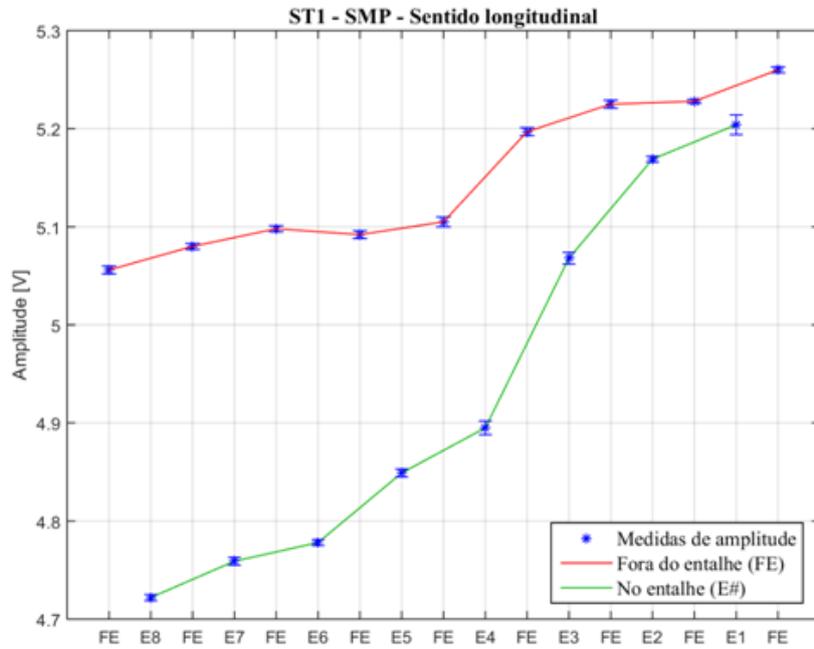
Observando-se os resultados de amplitude e fase do procedimento IA, Figura 4.19 (c) e (d), corroboram os resultados obtidos segundo o procedimento IB.



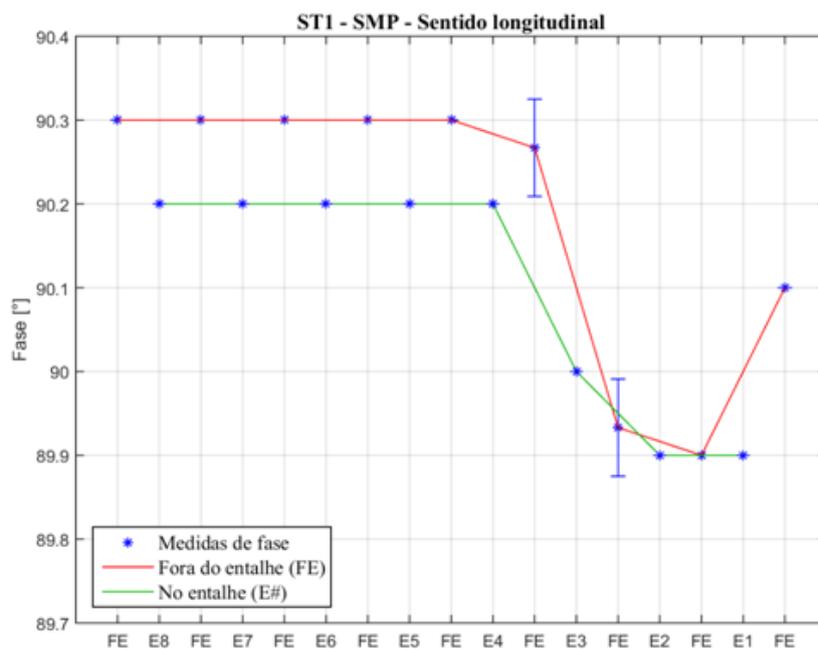
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4. 19: Para a calibração proposta têm-se (a) gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo procedimento IB. (b) Gráfico de fase por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo procedimento IB. (c) Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo metodologia IA. (d) Gráfico de fase por correntes parasitas com SMP, entalhe segundo metodologia II.

Dados os resultados apresentados no item 4.4.2 percebeu-se que a calibração proposta junto aos procedimentos de ensaio e a saturação magnética parcial da amostra são responsáveis por significativo avanço para a detecção de defeitos em tubos de aço de grau HP. Aliado a estes promissores resultados e o empenho de se aperfeiçoar ainda mais a detecção e avaliação dos defeitos, foi construída a sonda ST2 que tem por objetivo otimizar, graças a sua geometria especialmente desenvolvida, os resultados obtidos pela sonda ST1.

#### 4.4.3 Sonda ST2 – Calibração proposta – Amostra HP-I-A

Uma vez já comprovadas as eficiências não apenas da calibração proposta, mas também da metodologia desenvolvida, desenvolveu-se uma sonda com o projeto especial de modo a concentrar o campo magnético induzido e assim obter-se resultados ainda melhores. Sendo assim, foram apresentados os principais resultados aplicando-se a calibração de modo a anular a componente resistiva e ampliar as respostas indutivas que para tal, foram aplicados os parâmetros da Tabela 4.2.

Tabela 4. 2: Parâmetros para calibração proposta para sonda ST2.

	Correntes Parasitas	Correntes Parasitas com SMP
Parâmetro	Valor	Valor
Frequência (kHz)	2	2
Amplitude (V)	4	4
Ganho Horizontal (V)	22	22
Rotação (°)	90	90
Ganho Vertical (V)	25	25

- Correntes parasitas sem saturação magnética

Podem-se observar na Figura 4.20 os resultados do mapeamento da amostra HP-I-A através da sonda ST2 utilizando-se apenas CP sem saturação magnética.

Tanto no mapeamento da amplitude na Figura 4.20 (a), quanto da fase em (b), percebe-se uma mudança de comportamento da resposta das correntes parasitas no entorno de 450 mm de comprimento, tornando-se mais intenso a partir de 500 mm de comprimento. Além disso, no mapeamento de amplitude, percebe-se nas coordenadas

(100,50), (100,150), e (100,250) uma resposta diferente do seu entorno. Sendo estas regiões onde estão, respectivamente, localizados os entalhes E8, E7 e E6, pode-se perceber que há a detecção destes entalhes.

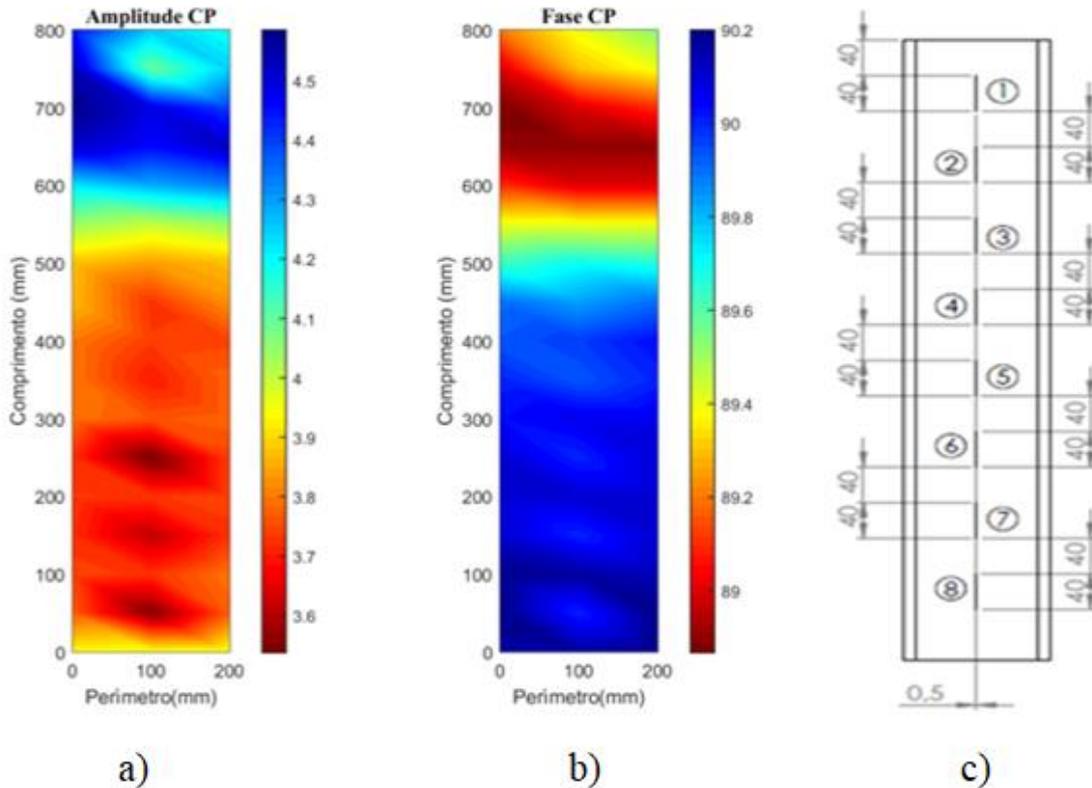


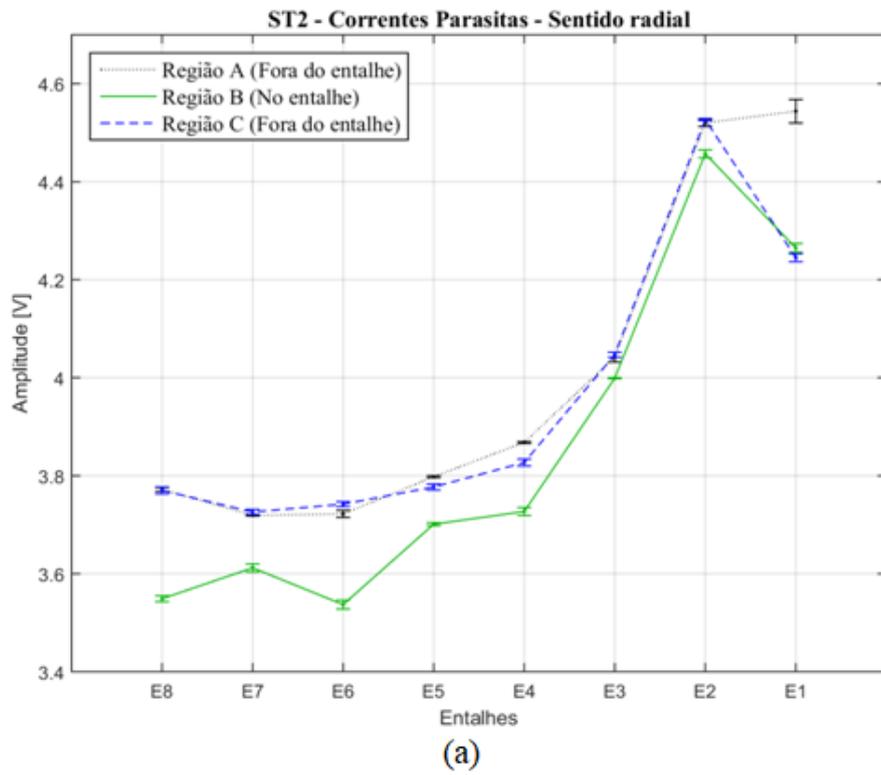
Figura 4. 20: Para a calibração proposta têm-se (a) mapeamento da amplitude de resposta de correntes para a amostra HP-I-A, (b) mapeamento da fase de resposta de correntes parasitas para HP-I-A e (c) desenho do corpo de prova HP-I-A com a distribuição dos oito entalhes ao longo de seu comprimento.

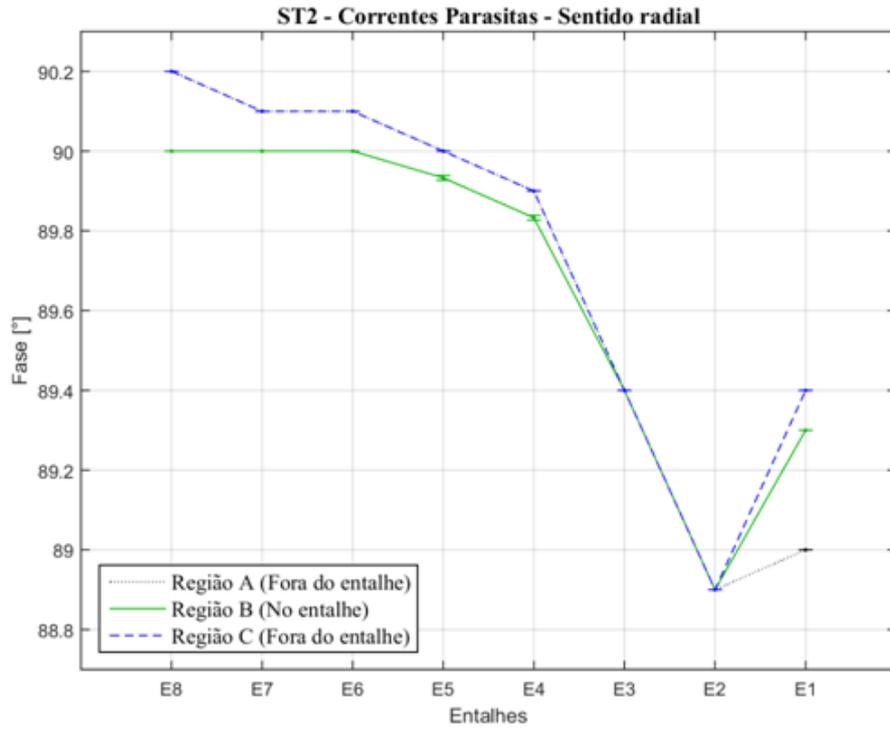
A Figura 4.21 apresenta os resultados dos procedimentos IA e IB, tanto para amplitude, quanto para fase, propostas neste trabalho.

A Figura 4.21 (a) mostra que os resultados de amplitude para o procedimento IB conseguem diferenciar os entalhes E8, E7, E6, E5 e E4, das respostas fora dos entalhes. Ao analisar a resposta da fase, Figura 4.21 (b), ainda do procedimento IB, observa-se o mesmo comportamento da resposta em amplitude. Observando-se os resultados de amplitude e fase do procedimento IA, Figura 4.21 (c) e (d), percebem-se resultados semelhantes ao procedimento IB.

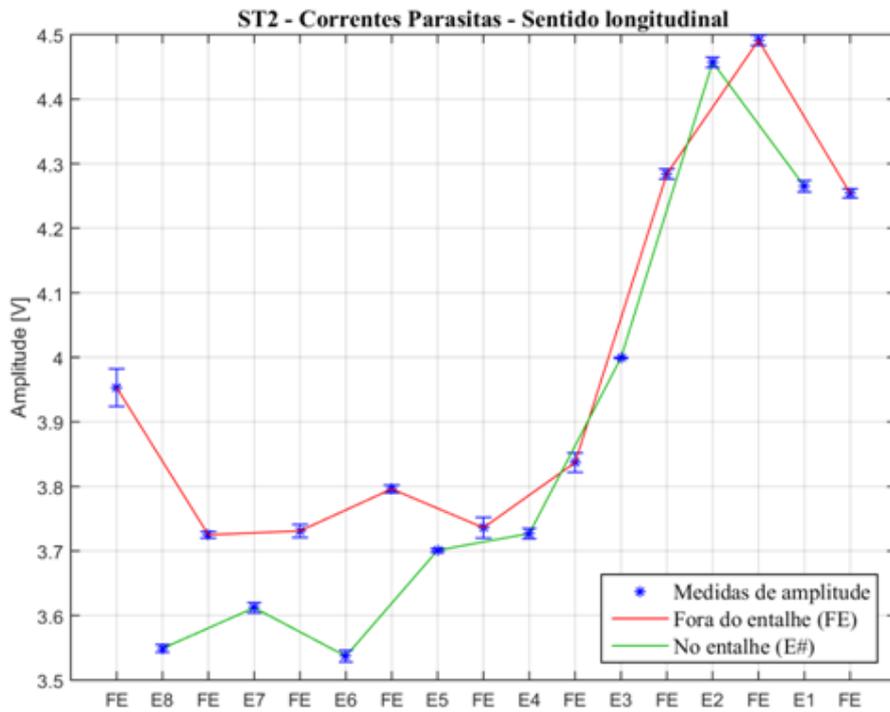
A melhoria do projeto da sonda ST2 já se mostra presente mesmo para a condição de correntes parasitas sem saturação magnética parcial, uma vez que os resultados tanto

dos mapas de contraste quanto da análise gráfica se apresentam com uma melhor relação sinal ruído.





(b)



(c)

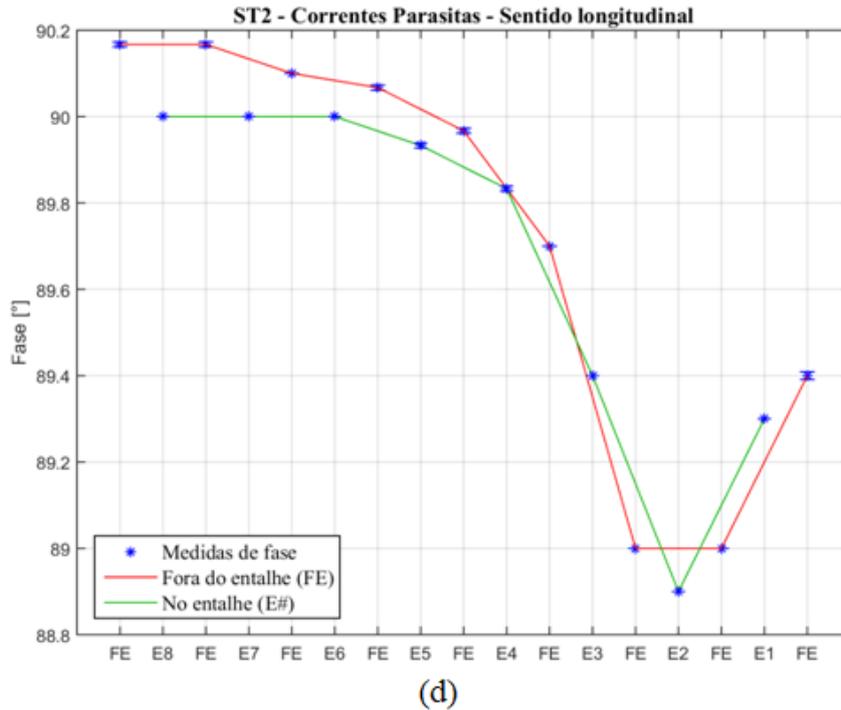


Figura 4. 21: Para a calibração proposta nos ensaios da amostra HP-I-A têm-se a)Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas, segundo procedimento IB. (b) Gráfico de fase por entalhes, por correntes parasitas, segundo procedimento IB. (c) Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas, segundo metodologia IA. (d) Gráfico de fase por correntes parasitas, entalhes segundo metodologia IA.

- Correntes parasitas com saturação magnética parcial - SMP

Os resultados a seguir são os frutos da utilização em conjunto da metodologia de inspeção desenvolvida, junto a calibração proposta com ênfase na detecção de defeitos para esta classe de material, junto a geometria ideal de concentração de campo magnético induzido para a sonda também desenvolvida e junto a saturação magnética parcial do material.

Podem-se observar na Figura 4.22 os resultados do mapeamento da amostra HP-I-A através da sonda ST2 utilizando-se correntes parasitas com saturação magnética parcial (SMP). É clara a melhora nos resultados gerados graças a união dos quatro fatores supracitados.

Tanto no mapeamento da amplitude na Figura 4.22 (a), quanto da fase em (b), percebe-se uma mudança de comportamento da resposta das correntes parasitas a partir de 450mm de comprimento, tornando-se mais intenso a partir de 500mm de

comprimento. O mapeamento de amplitude mostra-se, com grande clareza, que nas coordenadas (100,50), (100,150), (100, 250), (100,350), (100,450), (100,550), (100,650)e (100, 750) uma resposta diferente do seu entorno. Sendo estas regiões onde estão, respectivamente, localizados os entalhes E8, E7, E6, E5, E4, E3, E2 e E1, podendo-se, assim, afirmar a detecção destes entalhes através desta metodologia.

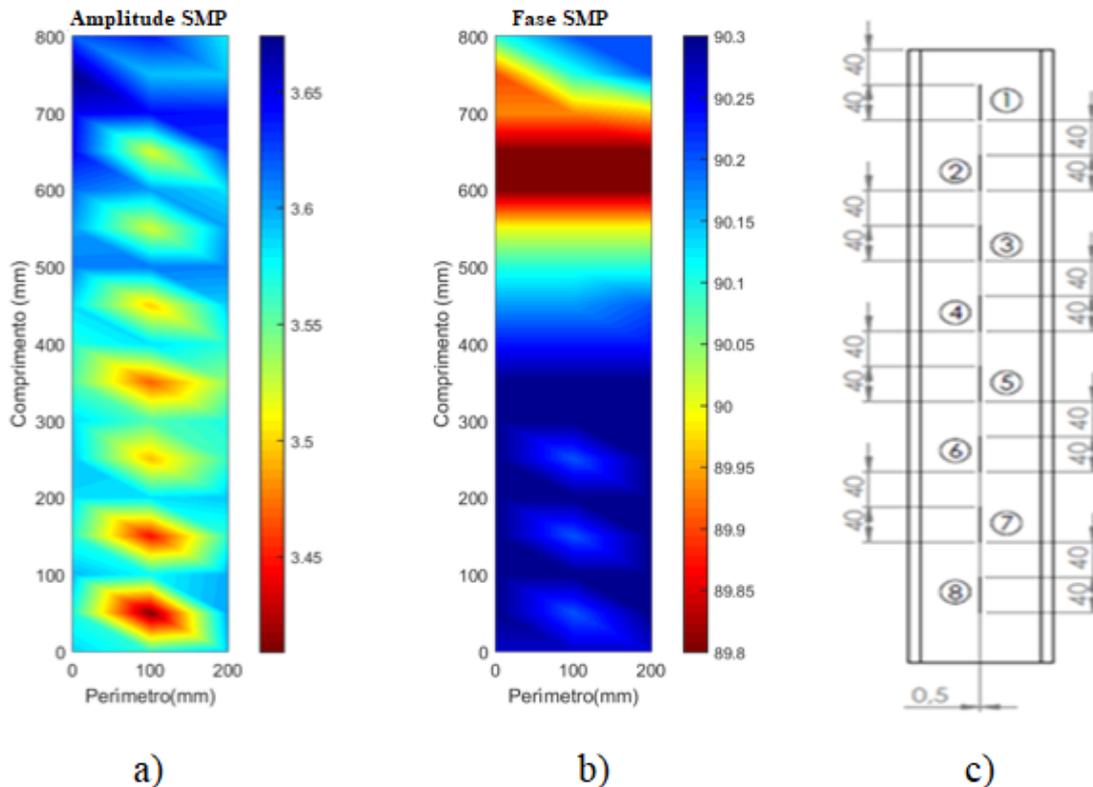


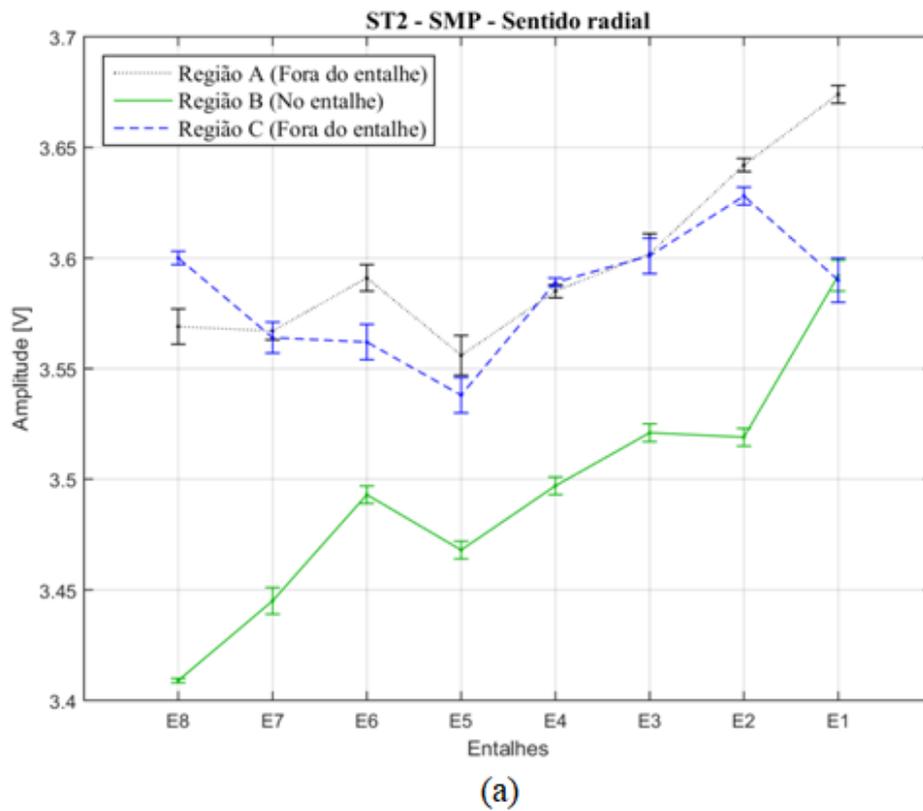
Figura 4. 22: Para a calibração proposta têm-se (a) Mapeamento da amplitude de resposta de correntes parasitas como SMP para a amostra HP-I-A, (b) Mapeamento da fase de resposta de correntes parasitas com SMP para a amostra HP-I-A e (c) desenho do corpo de prova HP-I-A com a distribuição dos oito entalhes ao longo de seu comprimento.

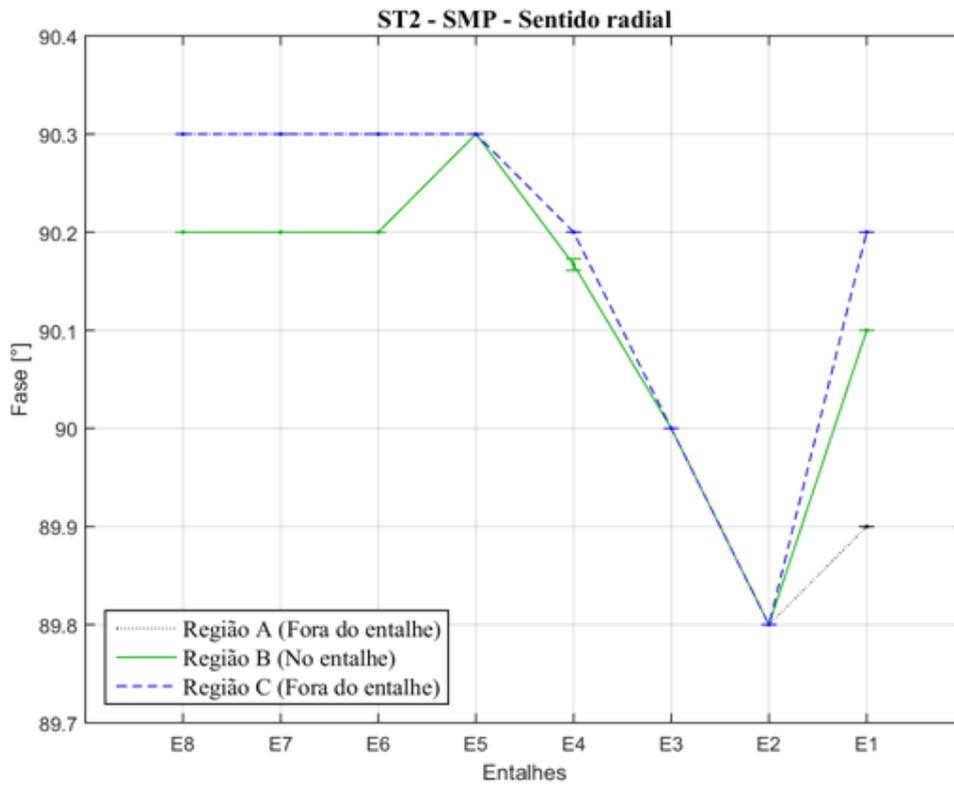
A Figura 4.23 apresenta os resultados dos procedimentos IA e IB através das correntes parasitas com SMP, tanto para amplitude, quanto para fase, propostas neste trabalho.

Na Figura 4.23 (a) é notória a detecção e diferenciação dos entalhes através dos resultados de amplitude para o procedimento IB, onde consegue-se observar com clareza os entalhes E8, E7, E6, E5, E4, E3 e E2 das respostas fora dos entalhes. Ao

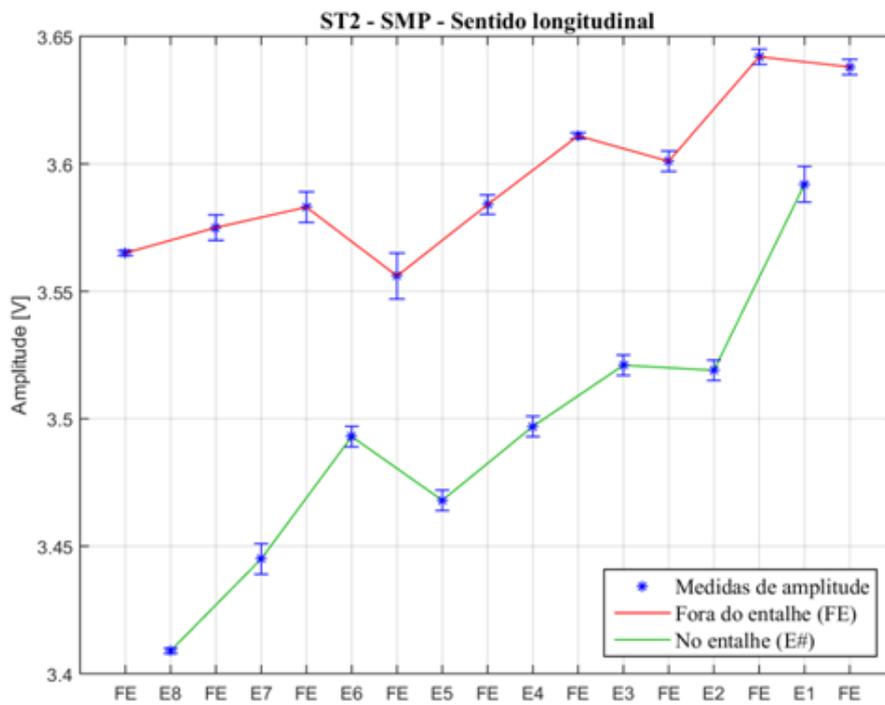
analisar a resposta da fase, Figura 4.23 (b), ainda do procedimento IB, observa-se o mesmo comportamento da resposta em amplitude para os entalhes de E8 a E6.

Entretanto, ao se observar os resultados de amplitude do procedimento IA, Figura 4.23 (c) é de imediata percepção a detecção dos entalhes de E8 a E1, ou seja, todos os entalhes da amostra foram detectados. Quanto aos resultados de fase na Figura 4.23 (d), corroboram os resultados obtidos na Figura 4.22 (b).

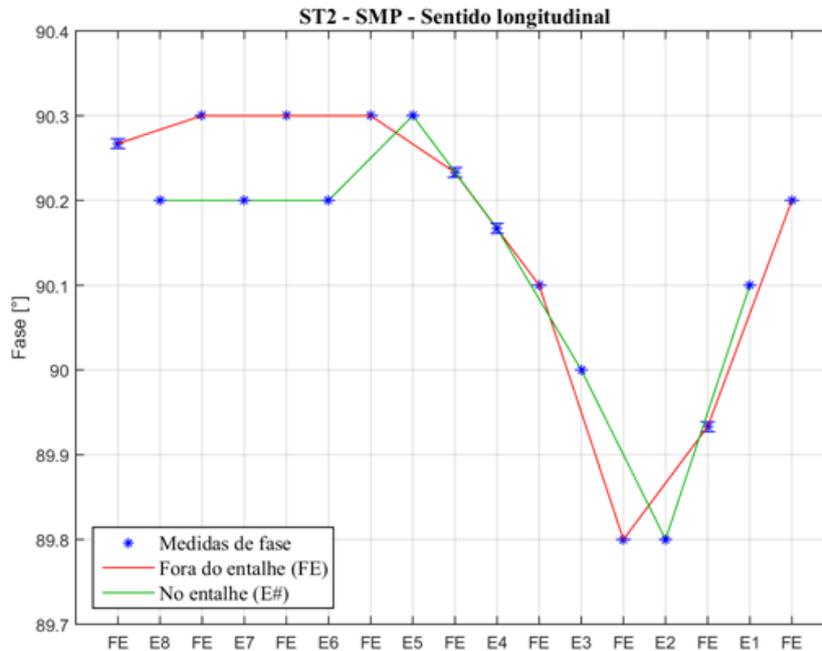




(b)



(c)



(d)

Figura 4. 23: Para a calibração proposta têm-se (a) gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo procedimento IB. (b) Gráfico de fase por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo procedimento IB. (c) Gráfico de amplitude por entalhes, por correntes parasitas com SMP, segundo metodologia IA. (d) Gráfico de fase por correntes parasitas com SMP, entalhe segundo metodologia II.

Em suma, o desenvolvimento gradual não apenas dos procedimentos de inspeção e calibrações, mas também de sondas aliadas a magnetização externa do material de ensaio mostrou-se ser uma eficaz e poderosa ferramenta para a detecção de defeitos nos aços de graus HP.

#### 4.4.4 Sonda ST2 – Calibração proposta – SMP – Amostra HP-S-B

Dado o sucesso dos resultados até o momento devido à junção da metodologia, sonda e calibração desenvolvidas neste trabalho à saturação magnética da amostra a ser ensaiada foi inspecionada uma amostra com trinca de fluência real oriunda de um surto de temperatura no forno de reforma.

Anterior ao ensaio de correntes parasitas com saturação magnética parcial a amostra HP-S-B foi radiografada para comprovação da existência de trinca de fluência. A amostra foi radiografada pelo método de parede simples, vista simples utilizando-se o

“*imageplate*”. Na radiografia, que pode ser observada na Figura 4.24, foi evidenciada a presença de uma trinca de fluência embebida.

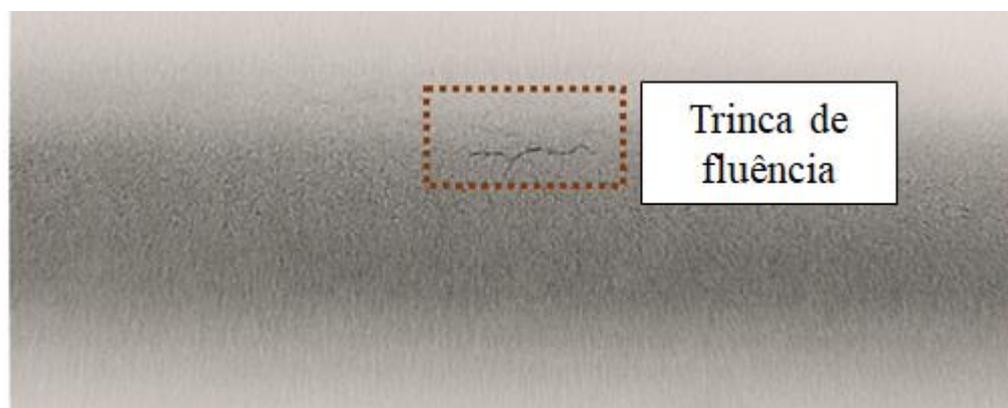


Figura 4. 24: Radiografia parede simples, vista simples da amostra HP-S-B contendo trinca real de fluência.

Após a radiografia a amostra HP-S-B foi submetida ao ensaio de correntes parasitas com saturação magnética parcial pela sonda ST2 através da metodologia I e calibração proposta neste trabalho. Os parâmetros para a aplicação da calibração proposta neste trabalho podem ser observados na Tabela 4.3, assim como o mapa de contraste gerado pode ser observado na Figura 4.25.

É com grande clareza que se percebe não apenas a detecção da trinca de fluência, mas também a variação do sinal ao longo do sentido circunferencial (podendo ser atrelado a mudanças microestruturais) e a sua homogeneidade ao longo do sentido longitudinal, mostrando novamente que a metodologia de ensaio desenvolvida contempla todas as possibilidades de variação nas respostas de ensaio.

Tabela 4. 3: Parâmetros para calibração da amostra HP-S-B anulando componente resistiva

Correntes Parasitas com SMP	
Parâmetro	Valor
Frequência (kHz)	2
Amplitude (V)	4
Ganho Horizontal (V)	22
Rotação (°)	103
Ganho Vertical (V)	28

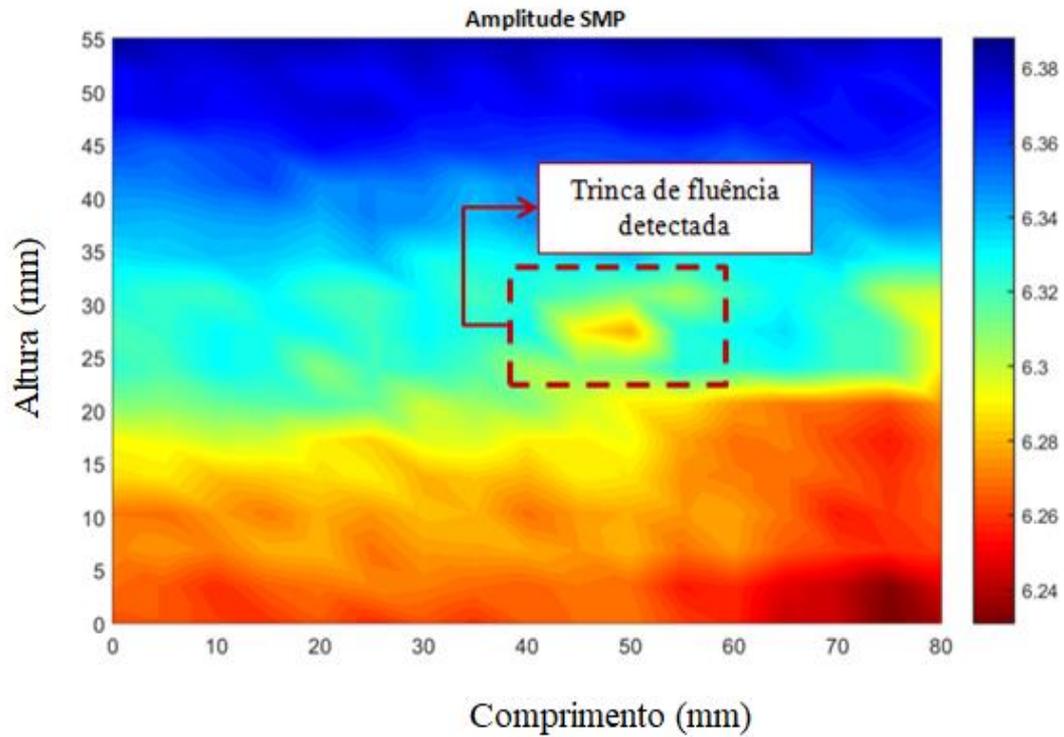


Figura 4. 25: Para a calibração proposta têm-se o mapeamento da amplitude de resposta de correntes parasitas como SMP para a amostra HP-S-B.

Desta forma, consagra-se a eficiência e aplicabilidade da técnica, metodologia e sondas desenvolvidas neste trabalho, visto que, através de sua aplicação foi possível a detecção de uma trinca real de fluência em uma amostra oriunda de um surto de temperatura em um forno de reforma.

## 5. CONCLUSÕES

Em suma, o conjunto da metodologia de ensaio desenvolvida, juntamente com a calibração definida e o aperfeiçoamento da geometria da sonda absoluta permitiram a detecção não apenas de entalhes, mas também de trincas de fluência reais no aço austenítico HP modificado ao nióbio. Cabe destacar que o conjunto da metodologia desenvolvida (procedimento de inspeção juntamente com a calibração definida e o aperfeiçoamento da geometria da sonda absoluta) permitiu a detecção não apenas de entalhes, mas também de trincas de fluência reais no aço austenítico HP modificado ao nióbio. Dessa forma a calibração utilizada neste trabalho mostrou-se ser um fator decisivo e indispensável para a detecção tanto dos entalhes, quanto da trinca de fluência real. Por outro lado o aperfeiçoamento da geometria da sonda de correntes parasitas também desempenhou um papel fundamental para o aperfeiçoamento do processo de detecção de defeitos. Outro ponto de relevância é a visualização dos dados no sentido longitudinal e no sentido circunferencial, mostraram-se ser complementar a detecção de defeitos.

A detecção de entalhe (com geometria até 40x0,5x0,5mm de CLP em uma espessura de parede de 12mm) e de trincas se mostrou eficaz e de fiel interpretação utilizando uma sonda absoluta com um carretel de 19,2x9,4mm, com 1985 voltas utilizando fio de cobre AWG40 e saturação magnética parcial através de um YOKE com ímãs de 440mT. Além disso o fator decisivo para este resultado foi a calibração no eixo da reatância indutiva do plano de impedância das correntes parasitas, já que, ao projetar todo o sinal da resposta da inspeção neste eixo maximiza-se a diferença de respostas das regiões com e sem defeitos.

## **6. TRABALHOS FUTUROS**

Apesar de grandes avanços realizados neste trabalho para a detecção de defeitos nos aços de grau HP modificados ao nióbio, ainda são necessários alguns estudos e otimização de modo que sugere-se para trabalhos futuros:

- Automatização da metodologia desenvolvida de modo a obter o monitoramento em tempo real de inspeção dos tubos dos fornos de reforma;
- Tornar o sistema de aquisição mais robusto como um todo;
- Construção de simulação computacional completa para obtenção e otimização de todos os parâmetros da metodologia;
- Estudo com os equipamentos adequados para distinção entre a calibração proposta neste trabalho e a calibração convencional.

## 7. REFERÊNCIAS

Almeida, G.; Gonzalez, J.; Rosado, L.; Vilaça, P. and Santos, T. G.; *Advances in NDT and Materials Characterization by Eddy Currents*. Procedia CIRP, vol. 7, pp. 359–364 (2013).

Almeida, L. H.; Ribeiro, A. F. and Le May, I.; *Microstructural characterization of modified 25Cr–35Ni centrifugally cast steel furnace tubes*. Materials Characterization, Elsevier, vol. 49, pp. 219-229 (2003).

Alvino, A.; Lega, D.; Giacobbe F.; Mazzocchi, V. and Rinaldi, A.; *Damage characterization in two reformer heater tubes after nearly 10 years of service at different operative and maintenance condition*. Engineering Failure Analysis, v. 17, pp. 1526- 1541 (2010).

“*American Petroleum Institute*” (API) STD 530

ASM; *Metals handbook - Non destructive evaluation and quality control*. ASM International, vol. 17, 10<sup>th</sup> (2015a).

ASM; *Metals handbook –Properties and selection: irons steels and high performance alloy*; ASM International, vol. 1, 10<sup>th</sup> (2015b).

ASM; *Metals handbook - Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials*; ASM International, vol. 2, 10<sup>th</sup> (2015c).

ASTM-A608/A608M; *Standard specification for centrifugally cast iron-chromium-nickel high-alloy tubing for pressure application at high temperatures*; Stand. ASTM, vol. 01, pp. 1–6 (2006).

Bae, J. and Kim, S.; *Hot wire inspection using eddy current*. In Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Budapest, Hungary, pp. 962-965 (2001).

Baibich, M.N.; Broto, J.M.; Fert, A.; Vandau, F.N.; Petroff, F.; Eitenne, P.; Creuzet, G.; Friederich, A. and Chazelas, J.; *Giant magneto resistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices*. Phys. Rev. Lett., vol. 61, pp. 2472-2475 (1988).

Ball, M. and Wietschel, M.; *The hydrogen economy - opportunities and challenges*. New York, Cambridge University Press, 1 ed. (2009).

Beeley, P. R.; *Production techniques 3: further casting techniques*; in Foundry Technology, Butterworth-Heinemann, pp. 628–635 (2001).

Binasch, G.; Grunberg, P.; Saurenbach, F. and Zinn, W.; *Enhanced magnet orestance in layered magnetic-structures with antiferromagnetic interlayer exchange*; Phys. Rev. B, vol. 39, pp. 4828-4830 (1989).

Bohacova, M.; *Methodology of short fatigue crack detection by the eddy current method in a multi-layered metal aircraft structure*. Engineering Failure Analysis, vol. 35, pp. 597-608 (2013).

Bonaccorsi, L.; *Damage analysis in Fe-Cr-Ni centrifugally cast alloy tubes for reforming furnaces*. Engineering Failure Analysis, vol. 36, pp. 65–74 (2014).

Cacciola, M.; Megali, G.; Pellicano, D.; Calcagno, S.; Versaci, M. and Morabito, F. C.; *Modelling and Validating Ferrite-core Probes for GMR-eddy Current Testing in Metallic Plates*. PIERS Online, vol. 6, pp. 237–241 (2010).

Camerini, C.; Sacramento, R.; Areiza, M. C.; Rocha, A.; Santos, R. and Rebello, J. M.; *Eddy current techniques for super duplex stainless steel characterization*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 388, pp. 96-100 (2015).

Cardoso, L. H. G.; *Nanopartículas magnéticas de ferritas mistas de cobalto e zinco*; Tese de doutorado em ciência dos materiais, Departamento de ciência e tecnologia, Instituto militar de engenharia, Ministério da defesa exército brasileiro (2011).

Carlstedt, M.; Porzig, K.; Uhlig, R. P.; Zec, M.; Ziolkowski, M. and Brauer, H.; *Application of Lorentz force eddy current testing and eddy current testing on moving nonmagnetic conductors*. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 45, pp. 519–526 (2014).

Colpaert, H.; *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*. Blücher, São Paulo, 4 ed., pp. 672 (2008).

Correa, M. P. A.; *Caracterização por ensaios magnéticos não destrutivos de aços hp provenientes de fornos de reforma*. Tese de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (2013).

Costa, E. S.; *Modelamento matemático tridimensional, usando o método de elementos finitos, para o ensaio não destrutivo por correntes parasitas, com alimentação em tensão*. Tese de mestrado, CEFET, Belo Horizonte (1995).

Cruz, F. E.; *Produção de hidrogênio em refinarias de Petróleo: Avaliação energética e custo de produção*. Projeto de Graduação, USP (2010).

Dieter, G. E.; *Mechanical metallurgy*. SI Metric ed. McGraw-Hill Book Co (1988).

Diraison, Y.; Joubert, P. and Placko, D.; *Characterization of subsurface defects in aeronautical riveted lap-joints using multi-frequency eddy current imaging*. NDT&E International, vol. 42, pp. 133-140 (2009).

Dogaru, T. and Smith, S. T.; *Giant Magnetoresistance-Based Eddy-Current Sensor*. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 37, pp. 3831–3838 (2001).

*Extende*; Disponível em: <http://www.extende.com/eddy-current-testing-with-civa>, acessado em 25/06/2017.

Firth, D. M.; Thakur, M.; Thomas, C. W. and FIRTH, R.; ***Reformer component management after an overheating incident that resulted in tube failures***. Source Ammonia Plant Safety and Related Facilities Symposium, vol. 54 (2013).

Foner, S.; ***Versatile and sensitive vibrating-sample magnetometer***. Review of Scientific Instruments, vol. 30, pp. 548-557 (1959).

Gary, J .H.; ***Petroleum refining: technology and economics***. Marcel Dekker Inc., vol. 5, EUA (2001).

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***. Tese de doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (2010).

Grimberg, R.; Savin, A.; Radu, E. and Mihalache, O.; ***Nondestructive evaluation of the severity of discontinuities in flat conductive materials by an eddy-current transducer with orthogonal coils***. IEEE Trans. Magn., vol. 36, pp. 299-307 (2000).

Haan, V.O.; de Jong, P.A.; Pérez, L. and Dolabdjian, C.; ***Towards material characterization and thickness measurements using pulsed eddy currents implemented with an improved giant magneto resistance magnetometer***. European NDT Conference, Berlin, Germany, pp. 1-8 (2006).

Hansen, J.; ***The eddy current inspection method, part 1 history and electrical theory***; Insight, vol. 46 (2004).

Hamia, R.; Cordier, C.; Saez, S. and Dolabdjian, C.; ***Eddy-Current Nondestructive Testing Using an Improved GMR Magnetometer and a Single Wire as Inducer: A FEM Performance Analysis***. IEEE Transactions on Magnetism, vol. 46, pp. 3731–3737 (2010).

***Innospection***. Disponível em: <http://www.innospection.com/techniques/#>, acessado em 03/05/2017.

Jorge L. M.; Gonçalves, G.; Onélia, A.; Santos, A. and Francisquini, D. R.; ***Desempenho de um reator integral de reforma a vapor de metano recheado com um catalisador industrial***. Acta Sci. Technol, vol. 27, pp. 119-122 (2005).

Kasai, N.; Ogawa, S.; Oikawa, T.; Sekine, K. and Hasegawa, K.; ***Detection of carburization in ethylene pyrolysis furnace tubes by a C core probe with magnetization***. J. Nondestruct. Eval., vol. 29, pp. 175–180 (2010).

Kim, Y. and Lee, S.; ***Eddy current probes of inclined coils for increased detectability of circumferential cracks in tubing***; NDT&E International, 49, 77-82 (2012).

Le May, I.; Ferreira, N. A. M. and Silveira, T. L.; ***Characteristic curves for damage assessment in reformer furnace tubes***. Materials Performance, Maintenance and Plant Life Assessment, ed. 1, pp. 181-191 (1994).

Liu, C. J. and Chen, Y.; *Variations of the microstructure and mechanical properties of HP40Nb hydrogen reformer tube with time at elevated temperature*. Materials & Design; vol. 32, pp. 2507-2512 (2011).

Lopes Ribeiro, A.; Alegria, F.; Postolache, O. and Ramos, H.; *Eddy current inspection of a duralumin plate*. In Proceeding of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC '09), Singapore, pp. 1367-1371 (2009).

Lu, Y.; Theodoulidis, T. P. and Bowler, J. R.; *An analytical model of a ferrite-cored inductor used as an eddy current probe*; Journal of Applied Physics (2012).

Martin, J. G.; Gil, J. G. and Sánchez, E. V.; *Non-destructive techniques based on eddy current testing*. Sensors, vol. 11, pp. 2525-2565 (2011).

Mateša, B.; Samardžić, I.; Bodenberger, R.; Sachs, B., P. and Pecić, V.; *Eddy current inspection in processing furnace remaining life prediction*. Safety and Reliability of Welded Components in Energy and Processing Industry (2008).

Mercier, D.; Lesage, J.; Decoopman, X. and Chicot, D.; *Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing*. NDT E Int., vol 39, pp. 652-660 (2006).

Mook, G.; Hesse, O. and Uchanin, V.; *Deep Penetrating Eddy Currents and Probes*. Proceeding of the ECNDT, pp. 1-14 (2006).

Moraes, T. R.; *Avaliação do comportamento em fluência em aço 1%Cr-0,5%Mo com 240.000 horas de operação em altas temperaturas*. Projeto de Graduação, Engenharia metalúrgica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (2014).

Moraes, G. B. D.; *Avaliação do método de correntes parasitas convencional e slofec para detecção de trincas em aço HP*. Projeto de Graduação, Engenharia metalúrgica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (2016).

Nagy, P. B.; Scruby, C.; Ward, C. and Sposito, G.; *A review of non-destructive techniques for the detection of creep damage in power plant steels*. NDT&E International, London, Vol. 43, pp. 555-567 (2010).

*NDT Resource Center*. Disponível em: < [https://www.nde-ed.org/index\\_flash.htm](https://www.nde-ed.org/index_flash.htm)>. Acessado em 28/06/2017.

*Olympus*. Disponível em: <http://www.olympus-ims.com/en/omniscan-eca/>, acessado em 05/07/2017.

Pedersen, L.B.; Magnusson, K.Å. and Zhengsheng, Y.; *Eddy current testing of thin layers using co-planar coils*. Res. Nondestruct. Eval, vol 12, pp. 53-64 (2000).

Pereira, P. A. de S.; *Estudo preliminar da aplicação da técnica de correntes parasitas visando a inspeção submersa de elementos combustíveis*. Tese de Mestrado, Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (2007).

Queiroz, F. S.; *Influência de surto de temperatura sobre o comportamento dos tubos de fornos de reforma fundidos por centrifugação em liga hp-40 modificada ao nióbio*.

Projeto de Graduação, Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (2012).

Queiroz, F. S.; *Caracterização Microestrutural em Função da temperatura de serviço de tubos de aço HP modificados ao Ni e Ti envelhecidos em fornos de reforma a vapor*. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro (2017).

Ray, A. K. et al. *Structural integrity of service exposed primary reformer tube in a petrochemical industry*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 137, pp. 46–57 (2016).

Rasson, J. and Delipetrov, T.; *Progress and limitations in magnetic field measurements*. In Geomagnetism for Aeronautical Safety, 1st ed.; Novkovski, N. Ed.; Springer: Dordrecht, TheNetherlands, vol 13, pp. 201-212 (2006).

Reig, C.; Cardoso, S. and Mukhopadhyay, S. C.; *Giant magnetoresistance (gmr) sensors - from basis to state-of-the-art applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, vol 6 (2013).

Ribeiro, E. G.; Papaléo, R.; and Guimarães, J. R. C.; *Microstructure and creep behavior of a niobium alloyed cast heat-resistant 26 pct Cr steel*. Metall. Trans. A, vol. 17, pp. 691–696 (1986).

Ribeiro, F.; *Apostila de Introdução ao método dos elementos finitos*. Programa de Engenharia Civil, Universidade Federa do Rio de Janeiro (2004).

Rosell, A. and Persson, G.; *Finite element modeling of closed cracks in eddy current testing*. International Journal of Fatigue, vol. 41, pp. 30-38 (2012).

Santos, F. F. M.; *Uso de extensômetros para altas temperaturas na estimativa de vida residual - monitoração em tempo real das deformações de tubulações em usinas de geração térmica*; Tese de mestrado, Engenharia Metalúrgica e de Materiais/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (2011).

Shao, K.R.; YouGuang, G. and Lavers, J.D.; *Multiresolution analysis for reconstruction of conductivity profiles in eddy current nondestructive evaluation using probe impedance data*. IEEE Trans. Magn., vol. 40, pp. 2101-2103 (2004).

Shi, S. and Lippold, J. C.; *Microstructure evolution during service exposure of twocast heat-resisting stainless steels - HP-Nb modified and 20-32Nb*. Mater Characterization; vol. 59, pp. 1029-1040 (2008).

Sikora, R.; Chady, T.; Gratkowski, S.; Komorowski, M. and Stawicki, K.; *Eddy Current Testing of Thick Aluminum Plates with Hidden Cracks*. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 22, pp. 427–434 (2003).

Silva, L. K.; *Caracterização magnética dos efeitos de deformação em aços ferríticos através da técnica Bitter modificada*. Projeto de graduação, Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (2015).

Silva, L. L.; *Caracterização de revestimentos de níquel compósito por correntes Parasitas*. Tese de doutorado, Engenharia Metalúrgica e de Materiais/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (2007).

Silveira, R. M. S.; *Caracterização da camada de óxido formada na superfície externa das colunas de fornos de reforma a vapor*. Tese de mestrado, Engenharia Metalúrgica e de Materiais/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (2017).

Silveira, T. L. and Le May, I.; *Effects of metallographic preparation procedures on creep damage assessment*. Materials Characterization, vol. 28, pp. 75-85 (1992).

Silveira, T.L. and Le May, I.; *Reformer furnaces: materials, damage mechanisms and assessment*. The Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 31, pp. 99-119 (2006).

Smart, J. S.; *The néel theory of ferrymagnetism*. American Association of Physics Teachers, vol. 23, pp. 356 (1995).

Soares, A.; *Correntes parasitas*. Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos (2005).

Stevens, K. J.; Tack, A. J.; Thomas, C. W. and Stewart, D.; *Through-wall carburization detection in ethylene pyrolysis tubes*. J. Phys. Dr. Appl. Phys. Vol. 34, pp. 814-822 (2001).

Theodoulidis, T.; *Analytical model for tilted coils in eddy-current nondestructive inspection*. IEEE Trans. Magn., vol. 41, pp. 2447-2454 (2005).

Tsukada, K.; Kiwa, T.; Kawata, T. and Ishihara, Y.; *Low-Frequency Eddy Current Imaging Using MR Sensor Detecting Tangential Magnetic Field Components for Nondestructive Evaluation*. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, pp. 3315–3317 (2006).

Xu, P.; Huang, S. and Zhao, W.; *Differential eddy current testing sensor composed of double gradient winding coils for crack detection*. In Proceedings of the IEEE Sensors Applications Symposium, Limerick, Ireland, pp. 59-63 (2010).

Yamada, S.; Chomsuwan, K. and Iwahara, M.; *Application of giant magnetoresistive sensor for nondestructive evaluation*. IEEE Sensors, Daegu, South Korea, pp. 927-930 (2006).

Wincheski, B.; *Deep flaw detection with giant magnetoresistive (GMR) based self-nulling probe*. 26th Annual review of progress in quantitative nondestructive evaluation, pp. 465–472 (2010).

Weise, W.; *Advanced modeling in lorentz force eddy current testing*. Tese de Doutorado, Technische University Ilmenau (2016).

Zhu, S.J.; Wang, Y. and Wang F.G.; *Comparison of the creep crack growth resistance of HK40 and HP40 heat resistant steels*. Journal of Mater Science Letter, vol. 9, pp. 520-521 (1990).

## ANEXO A

Este anexo tem como objetivo mostrar exemplarmente os resultados de correntes parasitas com saturação magnética parcial para a calibração, comumente utilizada para detecção de defeitos. Nesta mantêm-se a resposta do “*lift off*” das correntes parasitas na horizontal, no plano de impedância, e obtêm-se a resposta aos defeitos na componente vertical (reatância indutiva), também do plano de impedância (SOARES, 2005).

Para realizar a calibração no sentido horizontal utilizou-se o aparelho da marca ZETEC que é o que mais se aproximava da calibração horizontal para a realização dos testes. A Tabela A.1 mostra os parâmetros utilizados na sonda ST2 para a calibração com a resposta do “*lift off*” das correntes parasitas na horizontal do plano de impedância e para a calibração proposta neste trabalho. A Figura A.1 e A.2 mostram os resultados destes ensaios.

Tabela A.1: Parâmetros para calibração da sonda ST2 na amostra HP-I-A para a calibração vertical (calibração proposta) e calibração horizontal, mantendo-se a resposta do “*lift off*” das correntes parasitas na horizontal.

Correntes Parasitas com SMP		
Parâmetro	Calibração vertical (proposta)	Calibração horizontal
	Valor	Valor
Frequência (kHz)	2	2
Ganho (V)	50	50
Rotação (°)	93	185

Os resultados observados na Figura A.1 (a), ensaio com a calibração na horizontal para o entalhe oito E8, e (b) do ensaio com a calibração na horizontal para região fora do entalhe, não apresentam nenhuma diferença entre si, ou seja, para esta calibração não foi possível detectar os entalhes. Isto pode ter ocorrido seja, pois, o equipamento utilizado não é o adequado para o mesmo, uma vez que o equipamento da ZETEC não possui uma opção separada para ampliar o ganho horizontal e, além disto, não indica diretamente os valores de amplitude do plano de impedância, ou realmente a calibração convencional não é a mais adequada para a detecção de defeitos no material do presente estudo.

Entretanto ao comparar a figura A.2 (a) e (b), com a calibração vertical proposta neste trabalho, percebe-se uma pequena variação de resultado entre a região do E8 e a região fora do entalhe indicando assim uma boa resposta da calibração vertical.



Figura A. 1: (a) Resultado do ensaio com a calibração na horizontal para o entalhe oito E8, e (b) Resultado do ensaio com a calibração na horizontal para região fora do entalhe.



Figura A. 2: (a) Resultado do ensaio com a calibração proposta para o entalhe oito E8, e (b) Resultado do ensaio com a calibração proposta para região fora do entalhe.

Deste modo, recomenda-se para trabalhos futuros um melhor estudo com os equipamentos próprios para melhor compreensão da adequabilidade entre a calibração proposta neste trabalho e a calibração convencional.